

## DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA DE PURIFICAÇÃO DE BIOGÁS: INFLUÊNCIA DA PRESSÃO E RAZÃO LÍQUIDO/GÁS NA ABSORÇÃO DE CO<sub>2</sub>

Edney Alves Magalhães<sup>1</sup>, Samuel Nelson Melegari de Souza<sup>2</sup>, Adriano Divino de Lima Afonso<sup>3</sup>, Jadir Nogueira da Silva<sup>4</sup>

### RESUMO

A melhoria das características físicas e químicas do biogás é de grande importância à sua aplicação, sendo que a remoção do dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e do ácido sulfídrico (H<sub>2</sub>S) é necessária. Este trabalho teve, como objetivo, desenvolver um mecanismo de remoção do CO<sub>2</sub> por meio físicos, utilizando água como solvente. Desenvolveu-se uma coluna de absorção de 2,5 m de altura e 0,30 m de diâmetro. Seu interior foi preenchido com tubos de PVC rígido de 20 mm de diâmetro. Realizaram-se ensaios com pressões, variando entre 300 e 500 kPa e vazão de biogás entre 0,0114 e 0,039 m<sup>3</sup> min<sup>-1</sup>. O biogás possuía, originalmente, uma concentração de CO<sub>2</sub> de 33%. Com a utilização da coluna de absorção, a concentração foi reduzida para 15%, o que representou um aumento de 57% no poder calorífico do biogás, por unidade de massa.

**Palavras-chave:** Energia renovável, biogás, remoção de dióxido de carbono.

### ABSTRACT

#### Development and evaluation of a system of cleanness of biogas: influence of the pressure and reason liquid/gas in the CO<sub>2</sub> absorption

The improvement of the physical-chemical characteristics of biogas is greatly important for its application, and the removal of both carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) and sulfidric acid (H<sub>2</sub>S) is a need. This study was carried out to develop a mechanism for the removal of CO<sub>2</sub> by physical methods using water as solvent. A absorption column of 2,5 m height and 0,30 m diameter was developed. Inside was filled out with tubes of rigid PVC of 20 diameter mm. Assays with pressures varying 300 and 500 kPa and outflow of biogas 0,0114 and 0,039 m<sup>3</sup> min<sup>-1</sup>. Biogas initial concentration was 33%. The use of the absorption column reduced the concentration to 15%, which represented an increase of 57% in the calorific power of the biogas per unit mass.

**Keywords:** Renewable energy, biogas, carbon dioxide removal

---

Recebido para publicação em 29.11.2005

<sup>1</sup> Eng<sup>o</sup> Agrícola, MSc. Estudante de doutorado. Depto. de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, UFV. Viçosa - MG. [eamagalhaes@yahoo.com.br](mailto:eamagalhaes@yahoo.com.br)

<sup>2</sup> Engenheiro Mecânico, Professor adjunto do curso de mestrado de Engenharia Agrícola -UNIOESTE

<sup>3</sup> Engenheiro Agrícola, Professor adjunto do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas - UNIOESTE

<sup>4</sup> Matemático, Professor Titular, Depto. de Engenharia Agrícola, UFV, Viçosa - MG

## INTRODUÇÃO

A intensa participação das fontes não-renováveis na oferta mundial de energia constitui um desafio para a sociedade: 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 mantido o atual modelo de desenvolvimento, em que o petróleo tem 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, a biomassa entre outras. Esta última com um grande potencial no Brasil, por tratar-se de um país altamente agrícola.

Uma das formas mais interessantes é a utilização do biogás como fonte alternativa de energia, principalmente em pólos agropecuários, no qual, há uma imensa disponibilidade de resíduos que poderiam ser transformados em bioenergia, reduzindo, assim, os custos de produção e os impactos ambientais gerados pelo despejo direto desses resíduos na natureza.

Nos sistemas agroindustriais, existem diversas formas de aproveitamento do biogás tanto na geração de calor quanto na geração de energia elétrica em conjuntos moto-geradores. Entretanto, necessita-se de um maior desenvolvimento tecnológico no sentido de um melhor aproveitamento e melhoria da eficiência durante o uso do biogás. Uma das formas utilizadas para melhoria do aproveitamento do biogás consiste em eliminar de sua composição substâncias corrosivas, como o ácido sulfídrico e que reduzam o poder calorífico, como o CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono).

Diante dessas necessidades, o presente trabalho foi realizado a fim de desenvolver e avaliar uma coluna de absorção de CO<sub>2</sub> contido no biogás, utilizando água como solvente para que este fique com concentração de metano próxima ou igual à do gás natural. A avaliação consistiu no estudo da influência da pressão e da razão líquido/gás no processo de absorção.

## REVISÃO DE LITERATURA

Devido sua vasta extensão territorial e por ser um país essencialmente agrícola em plena expansão, o Brasil 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 d'água e, principalmente, a biomassa.

A biomassa pode ser encontrada em diversas formas, na natureza. 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, varias técnicas de aproveitamento 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 suinocultura, estimam que a produção de dejetos na região oeste do Paraná é cerca de 870.137 ton ano<sup>-1</sup>, com um potencial de geração de energia elétrica de 155 GW h ano<sup>-1</sup>, aproximadamente. SORDI et al., (2003), estimam que a disponibilidade de resíduo da avicultura nesta mesma região chega a 382.021 ton ano<sup>-1</sup>, o que corresponde um potencial energético teórico de aproximadamente 142 MW h ano<sup>-1</sup>. Souza et al., (2004) estudando o custo da geração de energia elétrica, usando biogás originado de dejetos de suínos, encontrou um custo de R\$ 190,00 por MW h com custo de R\$ 0,21 por m<sup>3</sup> de biogás. Desta forma, a utilização de biodigestores para o tratamento e produção de biogás apresenta-se como uma solução ecológica e energética para pólos agroindustriais.

Os principais constituintes do biogás são o metano (CH<sub>4</sub>) de 50% a 75% e o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) de 25% a 40%. Outros gases, como o sulfeto de hidrogênio (H<sub>2</sub>S), nitrogênio (N<sub>2</sub>), hidrogênio (H<sub>2</sub>) e monóxido de carbono (CO) estão também presentes na mistura, embora em quantidades bem mais reduzidas (Pinheiro, 1999).

## Propriedades do biogás

As propriedades físico-químicas do biogás têm natural influência na tecnologia a ser utilizada em sua depuração e combustão. Como mistura variável de diferentes gases, o biogás tem poder calorífico e densidade variando com a concentração relativa de cada um dos constituintes. Essas propriedades são importantíssimas para a engenharia de equipamentos adequados ao biogás (CCE, 2000), dentre elas: o poder calorífico e densidade.

O poder calorífico do biogás depende da porcentagem de metano ( $CH_4$ ) nele existente. Segundo CCE, (2000), o metano puro, em condições normais (pressão a 101,325 kPa e temperatura de 0 °C), possui poder calorífico equivalente a 35640 kJ m<sup>-3</sup>. O biogás, com teor de metano variando entre 50% e 80%, possui poder calorífico inferior entre 17880 e 28440 kJ m<sup>-3</sup>. Assim cada 10% de  $CO_2$  na mistura gasosa de biogás corresponde a, aproximadamente, 3600 kJ m<sup>-3</sup> a menos em seu poder calorífico. Para efeito de cálculos, o Ministério de Minas e Energia utiliza poder calorífico médio equivalente a 19800 kJ m<sup>-3</sup> de biogás.

A densidade é um parâmetro útil para projetos de equipamento, armazenamento e compressão do biogás, segundo CCE, (2000), pode ser obtida por meio da equação:

$$\rho_{biogás} = \frac{0,679 CH_4 + (1 - CH_4) 1,841}{1,206} \quad \text{Eq.1}$$

em que:

$CH_4$  = concentração de metano ( $CH_4$ ) no biogás, decimal.

## Remoção de $CO_2$

LASTELLA (2002), estudando a produção e a purificação do biogás afirmou que a purificação do biogás com a remoção do  $CO_2$  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. Entretanto, nem todos os dispositivos utilizam os mesmos padrões de gás, sendo necessária a remoção de certos componentes do biogás faz-se necessária. Os principais componentes a serem removidos do biogás são: a água, o ácido sulfídrico ( $H_2S$ ), as partículas e o dióxido de carbono ( $CO_2$ ) (AD-NETT, 2000).

O dióxido de carbono tem um efeito de diluição no biogás, reduzindo 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 é uma operação unitária, em que um componente de uma mistura é dissolvido num líquido. Esta operação pode ser química ou essencialmente física. Dentre os métodos químicos estão a absorção em carbonato de potássio, hidróxido de cálcio, hidróxido de sódio, TGN (Tufo Giallo Napoletano) e outros. Dentre os métodos físicos, destacam-se os crivos moleculares, a separação por membranas e em colunas de absorção. Os métodos físicos são os mais conhecidos e utilizados, devido a fácil regeneração dos reagentes utilizados para absorção, diferentemente dos métodos químicos. A vantagem deste método é requerer relativamente pouca energia, mas o  $CO_2$  deve estar na 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 de um casco cilíndrico, uma placa perfurada para suporte, o recheio e o mecanismo de 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 em sentido contracorrente, visando o contato a maior diferença de concentração.

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 reportados na literatura, citados por (Fair et al., 1980). O recheio também é um fator importante no custo de construção da coluna, tornando-se inviáveis as colunas com diâmetro superior a 0,6 m. 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 CO<sub>2</sub> até que a porcentagem de metano fique próxima à 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 CO<sub>2</sub> máximo de 18% para a região norte, enquanto, para as demais regiões, a porcentagem mínima de metano deve ser de 86% e máxima de CO<sub>2</sub> de 5%. Esta 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 se descrever, exatamente, por meios matemáticos ou do aspecto de engenharia. A escolha do tipo de equipamento, a estrutura interna do equipamento, a razão líquido/gás, o solvente, o diâmetro e altura da coluna,

baseia-se na experiência, no bom senso e intuição (Maddox, 1980).

Segundo (Maddox, 1980), o solvente ideal deve ser não-volátil, puro, não-corrosivo, estável, apresentar baixa viscosidade, que não espumeje, não seja inflamável e dissolva infinitamente o soluto. Infelizmente, este solvente é praticamente impossível e a escolha é feita com base na alternativa mais desejável. 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 CO<sub>2</sub>, existem diversos solventes que podem ser utilizados. Em se tratando de solubilidade, o polietileno glicol vem sendo bastante utilizado devido à alta solubilidade do CO<sub>2</sub> e do H<sub>2</sub>S. Quando o fator a ser analisado é o custo do solvente em processos de remoção de CO<sub>2</sub>, a água é um dos melhores produtos. O CO<sub>2</sub> e o H<sub>2</sub>S são solúveis em água e esta pode ser encontrada, abundantemente, a um custo bastante reduzido (AD-NETT, 2000).

A razão líquido/gás é um dos fatores mais importantes do processo de absorção de CO<sub>2</sub>. 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 desta solubilidade que se determina 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 no Quadro 1.

**Quadro 1.** Solubilidade dos gases constituintes do biogás em água

Temperatura (°C)	Volume de gás dissolvido em água (m <sup>3</sup> L <sub>H<sub>2</sub>O</sub> <sup>-1</sup> kPa <sup>-1</sup> )		
	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	CH <sub>4</sub>
20	8,665e <sup>-6</sup>	2.548e <sup>-5</sup>	3,336e <sup>-7</sup>
25	7,501e <sup>-6</sup>	2.252e <sup>-5</sup>	2,961e <sup>-7</sup>
35	5,843e <sup>-6</sup>	1.807e <sup>-5</sup>	2,507e <sup>-7</sup>

FONTE: CCE (2000).

Por meio da solubilidade e da composição do gás a ser purificado, a determinação da circulação de solvente necessária no sistema é feita por

$$V_L = \frac{V_G N}{100 S P} \quad \text{Eq. 2}$$

em que:

$V_L$  = vazão de água necessária ( $L \text{ min}^{-1}$ );

$V_G$  = vazão de biogás ( $m^3 \text{ min}^{-1}$ );

$S$  = solubilidade do  $CO_2$  em água ( $m^3 L^{-1} \text{ kPa}^{-1}$ );

$P$  = pressão de operação (kPa);

$N$  = porcentagem de  $CO_2$  no biogás (%).

### Pressão de serviço

Segundo Hagen et al., (2001), a absorção do  $CO_2$  pela água ocorre 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 600 a 1200 kPa, obtendo-se uma porcentagem de metano, na saída do sistema, em torno de 95% e um percentual de 1 a 3% de  $CO_2$ .

Quando são utilizadas pressões elevadas, como as citadas por Myken et al., (2001), utiliza-se, obrigatoriamente, equipamentos e peças mais resistentes, que são normalmente onerosas, acarretando dificuldade à implantação de sistemas de pequeno porte. Portanto, são necessários estudos sobre a utilização de equipamento de absorção de menor porte, a fim de viabilizar sua utilização em propriedades rurais e agroindústrias produtoras de biogás, fazendo com que o produtor agregue valor a seus produtos agrícolas.

## MATERIAL E MÉTODOS

A experimentação consistiu em construir e avaliar uma coluna recheada de absorção de  $CO_2$  existente na mistura gasosa do biogás, utilizando água como solvente. Este

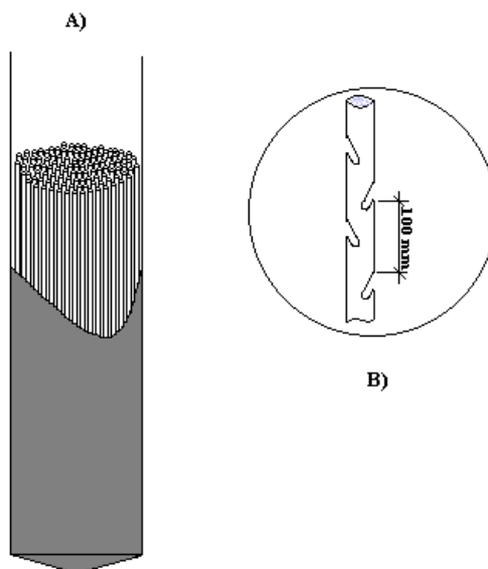
método físico de absorção foi idealizado em virtude das necessidades e da importância da remoção do  $CO_2$  do biogás, seguindo o bom senso quanto ao tipo de equipamento a utilizar, a estrutura interna do equipamento, a razão líquido/gás, o solvente, o diâmetro e altura de uma coluna recheada.

A coluna de absorção foi construída, levando-se em consideração as características básicas e principais, 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 foi constituído de tubos de PVC com diâmetro de 20 mm e comprimento de 1500 mm. Nesses tubos, foram feitas cavidades inclinadas (Figura 1 – (B)), no intuito de melhorar a distribuição e homogeneidade do molhamento dos tubos pelo solvente. Na mesma figura, observa-se a posição das cavidades, onde estão dispostas da mesma maneira na coluna. A distribuição (Figura 1 – (A)) foi feita de forma ordenada e homogênea, para que o recheio, em toda sua extensão, seja molhado igualmente, fazendo com que o gás, ao entrar na coluna, tenha o maior contato possível com o solvente.

O suporte do recheio foi construído de chapa perfurada de aço galvanizado, com orifícios de diâmetro de 3 mm e distantes aproximadamente 5 mm uns dos outros. Este suporte foi afixado a 150 mm acima da entrada do gás, a fim de possibilitar a expansão e distribuição do gás antes de passar pelas perfurações do suporte. Assim, a passagem do gás pelo recheio da coluna poderia ocorrer de forma uniforme (Figura 2).



**Figura 1.** A) Distribuição do recheio e B) cavidades nos tubos de PVC

O conjunto motobomba para o bombeamento do solvente na coluna, deve ter uma potência suficiente para recalcar o solvente, vencendo a pressão de trabalho da coluna. A vazão também deve ser levada em consideração, pois, este conjunto deve possuir capacidade para bombear uma quantidade de solvente maior que a mínima necessária para absorção do CO<sub>2</sub> contido na mistura gasosa.

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, o solvente deve ser distribuído de forma que molhe, uniformemente, o recheio. 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. Para injeção do solvente, utilizou-se um conjunto motobomba 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 0,0278 L min<sup>-1</sup>.

A medida da vazão de solvente foi efetuada por um hidrômetro com precisão de 0,0001 m<sup>3</sup>, fornecido pela Companhia de Abastecimento do Paraná (SANEPAR). O controle da vazão foi feito por meio de um registro de esfera.

A saída do solvente (Figura 2), ocorreu por meio de uma tubulação de 20 mm de diâmetro de aço galvanizado, soldada na parte inferior da

coluna a cerca de 50 mm da extremidade desta, controlada por meio de uma válvula de alívio. Esta válvula permite a saída do solvente, assim que a pressão ou o nível desejado do solvente no interior do cilindro vertical seja atingido. Vale ressaltar que a válvula deve possuir capacidade para expelir no mínimo a mesma quantidade de solvente que entra na coluna. Na mesma Figura, observa-se um dreno, que é responsável pela eliminação das impurezas que possam sedimentar no fundo da coluna.

Na Figura 2, observa-se ainda a posição do sistema medidor do nível de solvente no cilindro vertical, constituído por um tubo transparente que liga a tubulação de entrada do gás 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). A injeção do biogás na coluna foi feita por um compressor e pressuriza o sistema. Esse compressor era responsável, também, pelo abastecimento de biogás nas granjas da propriedade.

O controle da pressão no interior do cilindro vertical foi realizado por meio da instalação de uma válvula reguladora de pressão, possibilitando, assim, controlar a pressão interna e mantê-la constante, independente da pressão a montante. Acoplada a essa válvula, um manômetro de precisão 24,52 kPa indicava a pressão desejada a ser trabalhada.

O controle da vazão do biogás foi realizado por meio de um equipamento regulador e medidor de vazão de gás. Esse equipamento foi instalado logo após a válvula reguladora de pressão do tipo esfera suspensa da marca Cole - Parmer com precisão de  $4,002 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ .

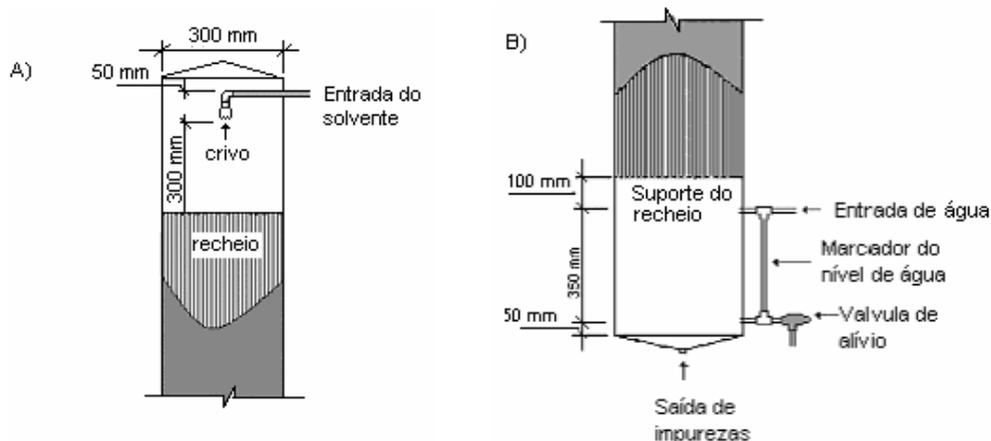
A saída do gás foi constituída por uma tubulação de aço galvanizado de 20 mm de diâmetro, localizada no ápice da coluna. Nessa tubulação, instalou-se uma válvula igual àquela do sistema de entrada do gás, possibilitando controlar a saída do gás purificado. Acoplado a essa válvula, instalou-se um manômetro para medir a pressão de saída do gás foi instalado. Também foi instalada uma válvula de segurança, a fim de aumentar a segurança do sistema, caso a válvula reguladora de pressão viesse a falhar, causando uma explosão. A Figura 3 mostra, detalhadamente, o protótipo da coluna de absorção de  $\text{CO}_2$  do biogás com a distribuição e a nomenclatura de todos seus componentes, com exceção do conjunto motobomba e compressor.

A construção e montagem da coluna de absorção foram realizadas na empresa MetalArt, sendo o experimento instalado numa das propriedades da empresa GLOBOAVES onde esta leva o nome de GLOBOSUÍNOS, ambos localizados na cidade de Cascavel – PR.

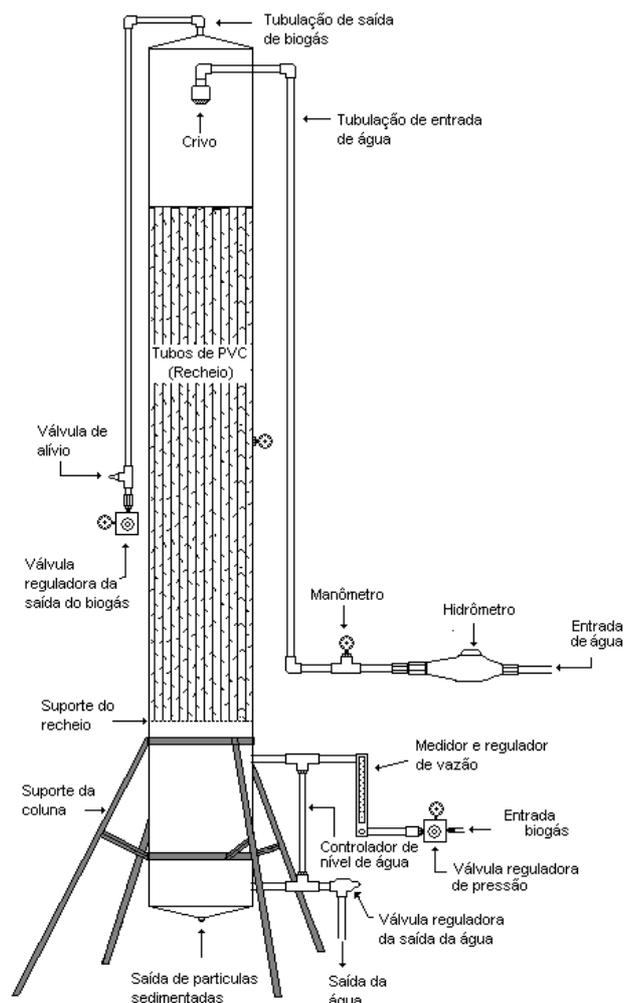
Os testes foram realizados com a coluna de absorção a fim de avaliar a capacidade de absorção de  $\text{CO}_2$ , em diferentes níveis de pressão de serviço e diferentes vazões de biogás, verificando-se os fatores que mais influenciam no processo de absorção e, se possível, encontrando as condições de operação de melhor eficiência de absorção de  $\text{CO}_2$  pela coluna.

Durante os ensaios, variou-se a vazão de biogás (de  $0,0114$  a  $0,039 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ ) e a pressão de serviço (300 a 500 kPa), mantendo a vazão de solvente fixa (aproximadamente  $0,00333 \text{ L min}^{-1}$ ). Esta faixa de pressão foi escolhida, devida algumas restrições de alguns equipamentos utilizados como, por exemplo, a potência do conjunto motobomba e a resistência do cilindro vertical. A variação da vazão de biogás foi feita, mantendo-se a vazão de solvente fixa, com razão líquido/gás entre 3,2 a 13,6 durante os teste. Foram realizados 5 ensaios com 4 repetições cada, para verificação da influência da vazão e pressão na absorção do biogás. Os dados foram analisados, estatisticamente, pelo teste Tukey de comparação de médias, a 5% de significância.

O funcionamento da coluna foi iniciado, acionando-se o 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 motobomba. Ao mesmo tempo, acompanhou-se o nível interno de solvente no cilindro vertical, regulando a válvula de saída da mistura solvente e dióxido de carbono. Simultaneamente, foi 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 foi feito, por meio do manômetro instalado no corpo do cilindro vertical. Depois que a pressão interna de trabalho foi estabilizada, a válvula de saída de gás metano foi regulada, procurando-se manter a pressão interna do cilindro vertical constante.



**Figura 2.** Algumas dimensões da coluna de absorção: A) parte superior e B) parte inferior



**Figura 3.** Desenho esquemático da coluna de absorção de CO<sub>2</sub> e seus componentes

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Por meio da metodologia descrita, é possível desenvolver e avaliar a coluna de absorção de biogás. A Figura 4 apresenta a coluna desenvolvida e os equipamentos auxiliares para seu funcionamento.

O biogás proveniente, diretamente, do biodigestor possuía um teor médio de CO<sub>2</sub> de 33%, estando condizente com os níveis de 25 a 40% de CO<sub>2</sub>, citado por PINHEIRO (1999). As verificações da influência da vazão e pressão na absorção do biogás estão apresentadas nas figuras 5, 6, 7 e 8.

Na Figura 5, observa-se que o ensaio 2 proporcionou uma maior absorção de CO<sub>2</sub> pela coluna do que o ensaio 1, em razão da menor vazão de biogás. Além disso, em um mesmo ensaio, a diminuição da vazão propicia maior

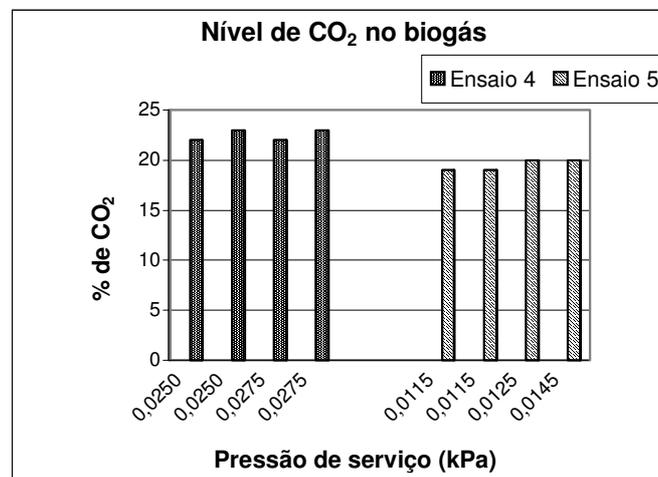
poder de absorção pela coluna. Isto pode ser também visualizado na Figura 6, em que o ensaio 4 proporcionou uma maior absorção do que o ensaio 3, em virtude da menor vazão de biogás.

Essas reduções apresentam diferença significativa ao nível de 5% de significância, ou seja, a variação da vazão de biogás influencia, significativamente, o processo de absorção de CO<sub>2</sub> do biogás. Possivelmente, isto se deve ao fato que quanto menor a vazão de biogás, que entra no cilindro vertical, maior a razão líquido/gás e, também, maior o tempo de retenção do biogás no interior da coluna, o que promove, conseqüentemente, um maior tempo de contato entre o CO<sub>2</sub> e a água, aumentando, assim, a eficiência de absorção.

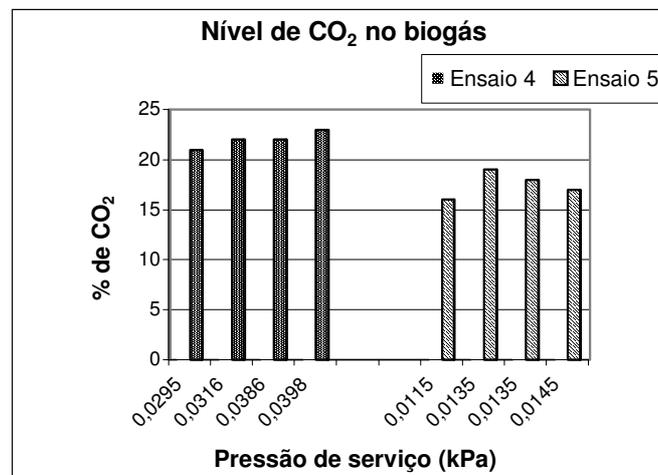
Comparando-se a influência da pressão no processo de absorção de CO<sub>2</sub> as figuras 7 e 8 apresentam influência das diferentes pressões e para uma mesma vazão.



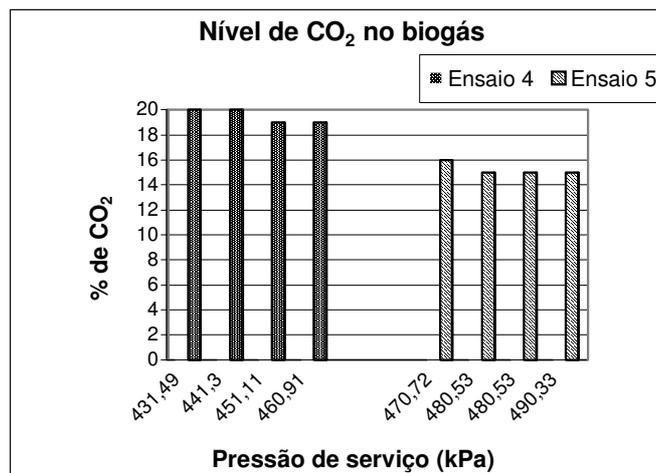
**Figura 4.** Vista da coluna de absorção desenvolvida



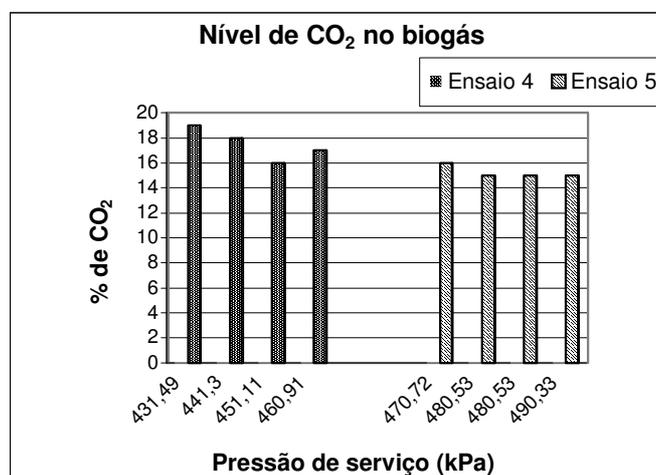
**Figura 5.** Concentração de CO<sub>2</sub> para diferentes vazões de biogás e pressão de serviço média de 338,33 kPa



**Figura 6.** Concentração de CO<sub>2</sub> para diferentes vazões de biogás e pressão de serviço média de 447,42 kPa



**Figura 7.** Concentração de CO<sub>2</sub> para diferentes pressões de serviço e vazão média de biogás de 0,01246 m<sup>3</sup> min<sup>-1</sup>



**Figura 8.** Concentração de CO<sub>2</sub> para diferentes pressões de serviço e vazão média de biogás de 0,01246 m<sup>3</sup> min<sup>-1</sup>

Nas figuras 7 e 8, observa-se que o aumento da pressão de serviço influenciou o processo de absorção de CO<sub>2</sub>, em que o ensaio 5, por possuir maior pressão, apresentou melhor resultado no processo de absorção, ou seja, menor nível de CO<sub>2</sub> que os ensaios 2 e 4. Desta forma verifica-se que quanto maior a pressão de serviço, maior será a eficiência de absorção, o que pode ser visualizado até mesmo dentro de um mesmo ensaio

Por meio dos resultados encontrados nos ensaios, podem-se estimar as propriedades do biogás purificado, onde o poder calorífico foi estimado levando-se em consideração que ele depende da porcentagem de metano existente no biogás e que o metano puro apresenta um poder calorífico de 35640 kJ m<sup>-3</sup>. Desta forma,

10% de CO<sub>2</sub> na mistura gasosa do biogás representa, aproximadamente, 3600 kJ m<sup>-3</sup> a menos no poder calorífico. Com isso, estimou-se um aumento do poder calorífico de 23760 kJ m<sup>-3</sup> para 30240 kJ m<sup>-3</sup>, 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 2, levando-se em consideração os níveis de CH<sub>4</sub> existente na mistura gasosa. Por meio desta equação, estimou-se a redução da densidade de 0,88 kg m<sup>-3</sup>, do biogás originado do biodigestor, para 0,71 kg m<sup>-3</sup>, o que representa redução de 19,3% na densidade do biogás após purificação. Isto ocorre devido à maior densidade do CO<sub>2</sub> em relação ao CH<sub>4</sub>.

Em termos de poder calorífico por unidade de massa, o biogás que provinha do biodigestor (67% de CH<sub>4</sub>) teria um poder calorífico de 27108 kJ kg<sup>-1</sup>, enquanto com o biogás purificado (85% de CH<sub>4</sub>) este teria um poder calorífico de 42696 kJ kg<sup>-1</sup>. Desta forma, com o aumento do poder calorífico e diminuição na densidade de biogás, ocorre um aumento de 15588 kJ kg<sup>-1</sup>, o que representa um aumento aproximado de 57% no poder calorífico por unidade de massa.

A coluna de absorção desenvolvida possui um custo relativamente baixo, aproximadamente R\$ 2,600,00, em comparação com o custo total da instalação de um sistema de biodigestores para produção de biogás. Segundo Magalhães (2000), o custo de investimento em um biodigestor, juntamente com um gerador de energia, pode variar de R\$ 21.450,00 a R\$ 61.500,00, dependendo o número de matrizes, com um custo do biogás variando entre R\$ 0,03 e R\$ 0,10 por m<sup>3</sup>. Desta forma, a incorporação de um sistema de purificação de biogás para remoção de CO<sub>2</sub> corresponde de 4% a 12% do custo total da implantação de um sistema de produção de biogás, correspondendo a um aumento muito pequeno ao custo final de produção do biogás. Vale salientar que o custo de operação do sistema não foi considerado, tendo influência no fator custo final do biogás.

## CONCLUSÃO

- Com a construção e avaliação do desempenho da coluna de absorção recheada no processo de absorção de CO<sub>2</sub> do biogás, concluiu-se que os fatores pressão de serviço e vazão de biogás influenciaram o processo de absorção. 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 ocorreu à pressão de, aproximadamente, 480 kPa e vazão de biogás de 0,01246 m<sup>3</sup> min<sup>-1</sup>, obtendo uma

concentração de CO<sub>2</sub> 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 para os mesmos usos finais, com exceção do GNV (gás natural veicular).

- Para o biogás purificado, concentração de CO<sub>2</sub> de 15,25%, estimou-se um aumento de aproximadamente 57% no poder calorífico por unidade de massa, com conseqüente aumento no teor de metano (67% para 85%) e diminuição na densidade de 0,88 kg m<sup>-3</sup> para 0,71 kg m<sup>-3</sup>.
- O custo de implantação da coluna de absorção acresce valor muito pequeno ao custo final de produção do biogás (4 a 12%), sendo este um aspecto importante no quesito viabilidade.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AD-NETT. **Anaerobic Digestion of Agro-Industrial Wastes: Information Networks.** Technical Summary on Gas Treatment. Netherlands, 2000. 31p.

ANP – Agência Nacional do Petróleo. Portaria 128, de 28 de agosto de 2001. 10p.

CCE – CENTRO PARA CONSERVAÇÃO E ENERGIA. **Guia Técnico de Biogás.** Amadora – Portugal, 2000. 117p.

FAIR, J.R. Sistema líquido/gás. In: PERRY, R.H.; CHILTON C.H. **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.

HAGEN M.; POLMAN, E.; MYKEN, A.; JENSEN, J.; JONSSON, O.; DAHL, A. **Adding Gas from Biomass to the Gas Grid: Final Report.** Contract No: XVII/4.1030/Z/99-412. European Commission. 2001. 142 p.

- LASTELLA, G.; TESTA, C.; CORNACCHIA, G.; KOTORNICOLA, M.; VOLTASIO, F.; SHARMA, V.K. Anaerobic Digestion of Semi-Solid Organic Waste: biogas production its purification. **Energy Conservation & management**. v. 42, n. 1, p. 63-75. 2002.
- MADDOX, R.N. Absorção de gases. In: PERRY, R.H.; CHILTON C.H. **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**. Trabalho de Conclusão de Curso. Departamento de Ciências Exatas e Tecnológicas. UNIOESTE. Cascavel, 2000. 49p.
- PINHEIRO P.C.C. **Sistemas térmicos**. Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, 1999. 32p. (Apostila didática).
- SOUZA, S.N.M.; OLIVA, C.A.; MAGALHÃES, E.A.; RICIÉRE, R.P. **Geração Própria de Energia Elétrica com o Aproveitamento de Biogás da Suinocultura**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA – CONBEA, 32, 2003, Goiânia. Resumos... Goiânia: SBEA, 2003. CD Rom.
- 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**, v. 26, n. 2, p.127-133. Maringá, 2004.
- SORDI, A.; SOUZA, S.N.M.; MAGALHÃES, E.A.; OLIVEIRA, F.H.; RICIÉRE, R.P. **Potencial Energético dos Resíduos de Aviário de Frangos de Corte na Região Oeste do Paraná**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA – CONBEA, 32, Goiânia, 2003. Resumos... Goiânia: SBEA, 2003. CD Rom.
- VOIVONTAS, D.; ASSIMACOPOULOS, D.; KOUKIOS, E.G. Assessment of biomass potential of power production: a GIS based method. **Biomass and Bioenergy**. vol. 20. p.101-112, 2001.
- WONG S.; BIOLETTI R. Carbon Dioxide Separation Technologies. **Carbon & Energy Management**, Canada, 14p. 2002.