

## ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA PARA DIFERENTES FONTES DE BIOGÁS NO BRASIL<sup>1</sup>

*Energetic Potential Estimate for Electric Energy Generation of Different Sources of Biogas in Brazil*

Karina Ribeiro Salomon<sup>2</sup> e Electo Eduardo Silva Lora<sup>3</sup>

**Resumo:** O crescente interesse na recuperação do biogás gerado pelos resíduos orgânicos, associado ao seu uso energético, vem sendo bastante discutido. Até pouco tempo o biogás era considerado somente um subproduto da decomposição anaeróbia (sem presença de oxigênio) de resíduos orgânicos. No entanto, a crise ambiental, a ratificação do Protocolo de Kyoto, a implementação do MDL e o rápido desenvolvimento econômico dos últimos anos, bem como a crescente elevação do preço dos combustíveis convencionais, vêm aumentando as pesquisas e os investimentos na produção de energia a partir de outras fontes alternativas e economicamente atrativas, tentando, sempre que possível, criar novas formas de produção energética que possibilitem a preservação dos recursos naturais esgotáveis. Resíduos sólidos ou líquidos constituem fontes de energia alternativa, bem como contribuem muito na questão ambiental, pois a partir de seu uso é possível reduzir potencialmente os impactos ambientais da fonte poluidora. Sua composição é uma mistura de gases, onde o metano e o dióxido de carbono estão em maiores proporções. O potencial energético do biogás está em função da quantidade de metano contida no gás, o que determina o seu poder calorífico. Este artigo foi baseado em publicações previamente realizadas por diversas entidades nacionais, e teve como objetivo contabilizar o potencial de geração de biogás de diferentes fontes, como: resíduos sólidos urbanos, esgotos domésticos, vinhaça e resíduos animais provenientes de suínos e bovinos. Os resultados deste trabalho indicam que o potencial brasileiro de produção de biogás a partir dos resíduos orgânicos mencionados poderia suprir uma demanda de energia de cerca de 1.100MW em locais com altas taxas de produção, evidenciando que se trata de opção energética a considerar a curto prazo para o País.

**Palavras-chave:** Biogás, digestão anaeróbia, resíduos orgânicos, vinhaça e geração de energia.

**Abstract:** The increasing interest in the recovery of biogas generated from organic residues, associated to its energetic use has been widely discussed. Biogas was merely seen as a sub-product obtained from anaerobic decomposition (without oxygen) of organic residue. However, the environmental crisis and ratification of the Kyoto's Protocol, the implementation of CDMs, the fast economic development of the past few years and the continuing rise in the prices of conventional fuels have increased the research and investment in the production of energy from new, alternative and economically attractive sources of energy that can preserve the natural exhaustible resources. Solid or liquid residues constitute an alternative source of energy, significantly contributing to the environmental issue and potentially reducing

---

<sup>1</sup> Recebido para publicação em 3.2.2006 e aceito em 3.3.2006.

<sup>2</sup> Engenheira-Agrônoma, Mestre em Ciências da Engenharia da Energia, Doutoranda em Engenharia Mecânica, Núcleo de Excelência em Geração Térmica e Distribuída – NEST, Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, Av. BPS 1303, Pinheirinho, 37500-903 Itajubá-MG, Caixa Postal 50, <karinas@unifei.edu.br>; <sup>3</sup> Engenheiro Mecânico, Prof. Dr. em Ciências Técnicas pela Universidade Técnica de São Petersburgo, Rússia, Coordenador do NEST, <electo@unifei.edu.br>.

the environmental impacts of the polluting source. Their composition is a combination of gases in which methane and carbon dioxide can be found in higher rates. The energy potential of biogas is related to the amount of methane gas contained in the gas, for it determines the gas calorific value. This paper was written based on works previously carried out by several national entities. It aims to estimate the potential of biogas generation from different sources such as: urban solid waste, household sewage, vinasse, and livestock residues. Our results indicate that the Brazilian potential regarding the production of biogas from the organic residues mentioned, could meet an energy demand of about 1100 MW, showing that biogas is an energy short-term option that could be considered for the country.

**Keywords:** Biogas, anaerobic digestion, organic wastes, vinasse, energy generation.

## 1 INTRODUÇÃO

O crescente interesse na recuperação do biogás gerado pelo lixo urbano, pelas estações de tratamento de efluentes, pela biodigestão da vinhaça, pelo resíduo da cana-de-açúcar e pelos rejeitos animais, associado ao seu uso energético, bem como para melhorar a questão do gerenciamento dos resíduos no Brasil, é um assunto que vem sendo bastante discutido.

O biogás era somente tratado como um subproduto, obtido a partir da decomposição anaeróbia (sem presença de oxigênio) de resíduos orgânicos. No entanto, a crise ambiental, a ratificação do Protocolo de Kyoto, a implementação do MDL e o rápido desenvolvimento econômico dos últimos anos, bem como a crescente elevação do preço dos combustíveis convencionais, vêm aumentando as pesquisas e os investimentos na produção de energia a partir de novas fontes alternativas e economicamente atrativas, que possibilitem a preservação dos recursos naturais não-renováveis.

O biogás proveniente da digestão anaeróbia de resíduos sólidos ou líquidos constitui uma fonte de energia alternativa, bem como contribui em muito na questão ambiental, pois reduz potencialmente os impactos ambientais da fonte poluidora. Esta é composta por uma mistura de gases, onde o metano e o dióxido de carbono estão em maiores proporções. O potencial energético do biogás

é em função da sua quantidade de metano, o que determina o seu poder calorífico. A biodigestão pode reduzir o potencial poluidor do descarte de resíduos orgânicos, com alto teor de DBO, e ao mesmo tempo produzir gás metano e um fertilizante como resíduo. Segundo Vazoller (1999), os processos biológicos de tratamento de rejeitos incorporam diferentes espécies microbianas e, portanto, uma versatilidade metabólica bastante grande. Por exemplo, alguns processos apresentam espécies bacterianas capazes de degradar compostos complexos e artificialmente sintetizados, ao mesmo tempo em que outros possuem bactérias que apenas degradam moléculas orgânicas simples, como o ácido acético, produzindo um combustível de aceitável poder calorífico, o gás metano. Nos processos anaeróbios ou nos sistemas de biodigestão anaeróbia, a degradação da matéria orgânica envolve a atuação de microrganismos anaeróbios, cujas espécies pertencem ao grupo de bactérias hidrolíticas-fermentativas, acetogênicas produtoras de hidrogênio e metanogênicas. A bioconversão da matéria orgânica poluente com produção de metano requer a cooperação entre diferentes culturas bacterianas.

São claras as vantagens da produção de energia elétrica a partir de biogás, entre elas: geração descentralizada e próxima aos pontos de carga, a partir de uma fonte renovável que vem sendo tratada como resíduo; possibilidade de receita extra, proveniente da energia gerada com biogás e vendida às

concessionárias; redução na quantidade de eletricidade comprada da concessionária; possibilidade de uso de processos de co-geração; redução das emissões de metano para a atmosfera, pois este também é um importante gás de efeito estufa; créditos de carbono; redução de odores etc. Por outro lado, existem alguns desafios a serem vencidos que impedem a ampla utilização do biogás, como: não-disponibilidade de tecnologias nacionais de geração; limpeza do biogás; viabilidade econômica; falta de fiscalização; e penalidades por possíveis danos ambientais.

Este artigo foi baseado em dados de publicações e de diversas entidades brasileiras, e teve como objetivo contabilizar o potencial de geração de eletricidade a partir do biogás de diferentes fontes, como: resíduos sólidos urbanos, esgotos domésticos, vinhaça e resíduos animais provenientes de suínos e bovinos. Os resultados obtidos indicam o potencial de produção de eletricidade e competitividade a partir do biogás, evidenciando uma importante opção energética a considerar a curto prazo, para o Brasil.

## 2 METODOLOGIA

A metodologia utilizada foi a avaliação do potencial energético de diferentes resíduos orgânicos, a partir da quantidade gerada de cada um no Brasil. Foram feitas atualizações dos dados já existentes e a projeção do potencial de geração a partir dos dejetos animais.

Os indicadores de conversão em metano para os diferentes resíduos orgânicos que foram utilizados nos cálculos estão no Quadro 1.

A quantidade anual de produção de biogás multiplica-se por seu poder calorífico e pela eficiência das tecnologias de geração em estudo, determinando-se assim a geração anual de eletricidade.

## 3 CARACTERÍSTICAS DO BIOGÁS

O biogás produto da biodigestão corresponde somente de 2 a 4% do peso da matéria orgânica usada no processo. Sua composição média está no Quadro 2.

O poder calorífico do biogás é variável, sendo aproximadamente de 22.500 a 25.000 kJ m<sup>-3</sup>, assumindo o metano com cerca de 35.800 kJ m<sup>-3</sup>. Isto significa um aproveitamento de 6,25 a 10 kWh m<sup>-3</sup> (JORDÃO et al., 1995). Sua potencialidade é demonstrada quando tratado (remoção do CO<sub>2</sub>), pois o seu poder calorífico pode chegar a 60% do poder calorífico do gás natural. No Quadro 3 está a comparação entre os PCIs de diferentes gases.

O biogás é um gás agressivo, em termos de corrosão, exigindo cuidados especiais nos equipamentos utilizados. Esta característica é consequência da presença de traços de sulfeto de hidrogênio (ácido sulfídrico – H<sub>2</sub>S). No Brasil, o padrão de emissão para os sulfetos, segundo o CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente, não pode

**Quadro 1** – Indicadores de conversão em metano por biodigestão anaeróbia para diferentes resíduos orgânicos

**Table 1** – Indicators of conversion into methane by anaerobic biodigestion for different organic residues

Resíduo Orgânico	Unidade	Indicadores	Referências
Vinhaça	m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> m <sup>-3</sup> vinhaça	14,23	Johansson (1993)
RSU de ETEs	m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> kg <sup>-1</sup> DBO <sub>5</sub>	0,029	Vieira et al. (2002)
Dejetos bovinos	m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> kg <sup>-1</sup>	0,04	Castanón (2002)
Dejetos suínos	m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> kg <sup>-1</sup>	0,35	Castanón (2002)

**Quadro 2** – Composição média do biogás proveniente de diferentes resíduos orgânicos

**Table 2** – Average composition of biogas originated from different organic residues

Gás	Porcentagem (%)
Metano (CH <sub>4</sub> )	40 – 75
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	25 – 40
Nitrogênio (N)	0,5 – 2,5
Oxigênio (O)	0,1 – 1
Acido sulfídrico (H <sub>2</sub> S)	0,1 – 0,5
Amoníaco (NH <sub>3</sub> )	0,1 – 0,5
Monóxido de carbono (CO)	0 – 0,1
Hidrogênio (H)	1 – 3

Fonte: Castanon (2002)

**Quadro 3** – PCI de diferentes gases

**Table 3** – Lower heating value of different gases

Gás	PCI (kcal m <sup>-3</sup> )	PCI (kJ m <sup>-3</sup> )
Metano	8.500	35.558
Propano	22.000	92.109
Butano	28.000	117.230
Gás natural	7.600	31.819
Biometano	5.500	23.027

Fonte: Castanon (2002)

ultrapassar 1,0 mg L<sup>-1</sup> S. As substâncias que contêm enxofre, usualmente consideradas poluentes do ar, são SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>S e sulfatos. Segundo os padrões nacionais de qualidade do ar fixados na Resolução CONAMA nº 3, de 28/06/90, no Brasil existem limites somente para o dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) (padrão primário – 365 mg m<sup>-3</sup> e padrão secundário – 100 mg m<sup>-3</sup> em 24 horas), que é um produto da combustão do biogás nocivo à saúde. A amônia, também em baixas concentrações, é corrosiva para o cobre, podendo emitir como produto da combustão os óxidos de nitrogênio, também nocivos à saúde e ao ambiente. Ao contrário do propano e butano, é um gás leve e de menor densidade,

o que faz com que ele ocupe um volume significativo e dificulte sua liquefação, tornando difícil seu transporte e armazenamento. No Quadro 4 está a equivalência energética de 1 m<sup>3</sup> de biogás com outra fontes.

**Quadro 4** – Equivalência energética entre 1 m<sup>3</sup> de biogás e outras fontes energéticas

**Table 4** – Energy equivalence between 1 m<sup>3</sup> of Biogas and other energy sources

Fonte	Faixa
Gasolina (L)	0,61 – 0,70
Querosene (L)	0,58 – 0,62
Óleo Diesel (L)	0,55
GLP (kg)	0,40 – 1,43
Álcool (L)	0,80
Carvão mineral (kg)	0,74
Lenha (kg)	3,50
Eletricidade (kWh)	1,25 – 1,43

Fonte: adaptado de Pompermayer (2000).

## 4 POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS NO BRASIL A PARTIR DE DIFERENTES FONTES

### 4.1 Vinhaça

“A vinhaça de cana-de-açúcar é um líquido de cor marrom escuro, de natureza ácida, que sai da bica de destilação à temperatura de aproximadamente 107 °C, com cheiro que vai do adstringente ao nauseabundo, qualidade está relacionada ao teor residual de açúcar o qual, por sua vez provoca um processo de putrefação tão logo a vinhaça é descarregada, liberando gases fétidos que tornam os ambientes insuportáveis” (FREIRE; CORTEZ, 2000).

A cana chega à usina, onde é lavada e moída, para extração do caldo. Este caldo contém sacarose, glicose, leveduras, matéria nitrogenada etc. Posteriormente, ele é submetido à clarificação, concentração e centrifugação, para que sejam obtidos o açúcar

comercial e o mel. Segundo Braile e Cavalcanti (1979), esse mel, depois de passar por um novo processo de cozimento a vácuo, para obtenção do açúcar de segunda, transforma-se em mel final, também chamado mel pobre ou melaço. O mosto diluído é denominado mosto de melaço, e enviado às dornas de fermentação. Após a fermentação o líquido resultante é chamado de vinho, que também passa por um processo de centrifugação, para recuperar o fermento (leveduras) a ser reutilizado no processo de fermentação. Esse vinho é então enviado para as colunas de destilação, para produção do álcool hidratado, que por sua vez produz como resíduo a vinhaça. Devido ao processo de fermentação, cada litro de álcool produzido em uma usina produz aproximadamente 13 litros de vinhaça. Esta é caracterizada como um efluente de destilarias com alto poder poluente e alto valor fertilizante. Seu poder poluente pode chegar

a 100 vezes o do esgoto doméstico, rico em matéria orgânica, com elevada DBO (demanda bioquímica de oxigênio). A composição química da vinhaça depende das características do solo, da variedade de cana, do período de safra e do processo industrial usado na produção de etanol. De acordo com Cortez et al. (1996), as principais características da vinhaça do processo de obtenção de álcool a partir do melaço, do caldo e da mistura são as apresentadas no Quadro 5.

As principais dificuldades relacionadas à disposição final da vinhaça são geralmente as altas taxas de DBO (demanda bioquímica de oxigênio), que possuem valores de 30.000 a 40.000 mg L<sup>-1</sup> e o baixo pH, que varia de 4 a 5, devido à presença de ácidos orgânicos.

No Brasil a vinhaça é aplicada diretamente no solo, como fertilizante e fonte de potássio. Mas para essa prática deve-se fazer

**Quadro 5** – Características da vinhaça da cana-de-açúcar  
**Table 5** – Characteristics of vinasse from sugar cane

Parâmetro	Melaço	Caldo	Mistura
pH	4,2 – 5,0	3,7 – 4,6	4,4 – 4,6
Temp. (°C)	80 – 100	80 – 100	80 – 100
BOD (mg L <sup>-1</sup> O <sub>2</sub> )	25.000	6.000 – 16.500	19.800
COD (mg L <sup>-1</sup> O <sub>2</sub> )	65.000	15.000 – 33.000	45.000
ST <sup>(1)</sup> (mg L <sup>-1</sup> )	81.500	23.700	52.700
MV <sup>(2)</sup> (mg L <sup>-1</sup> )	60.000	20.000	40.000
MF <sup>(3)</sup> (mg L <sup>-1</sup> )	21.500	3.700	12.700
Nitrogênio (mg L <sup>-1</sup> N)	450 – 1.600	150 – 700	480 – 710
Fósforo (mg L <sup>-1</sup> P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	100 – 290	10 – 210	9 – 200
Potássio (mg L <sup>-1</sup> K <sub>2</sub> O)	3.740 – 7.830	1.200 – 2.100	3.340 – 4.600
Cálcio (mg L <sup>-1</sup> CaO)	450 – 5.180	130 – 1.540	1.330 – 4.570
Magnésio (mg L <sup>-1</sup> MgO)	420 – 1.520	200 – 490	580 – 700
Sulfato (mg L <sup>-1</sup> SO <sub>4</sub> )	6.400	600 – 760	3.700 – 3730
Carbono (mg L <sup>-1</sup> C)	11.200 – 22.900	5.700 – 13.400	8.700 – 12.100
Relação C/N	16 – 16,27	19,7 – 21,0	16,4 – 16,4
Mat. Org. (mg L <sup>-1</sup> )	63.400	19.500	38.000
Subst. ruzuidas (mg L <sup>-1</sup> )	9.500	7.900	8.300

<sup>(1)</sup> Sólidos totais, <sup>(2)</sup> materiais voláteis e <sup>(3)</sup> material fixo.

Fonte: Cortez et al. (1996)

uma análise das características do solo, para que quantidades corretas possam ser aplicadas. A grande desvantagem da fertirrigação está associada aos custos de transporte para descarregar a vinhaça no campo, portanto novas formas de utilizar essa vinhaça estão sendo estudadas. Algumas delas são: aplicação no solo através da fertirrigação; reciclagem da vinhaça no processo de fermentação; uso direto na alimentação animal, após ser tratada; uso para produção de leveduras; uso em materiais de construção, diretamente incinerada; e utilização no processo de biodigestão. Atualmente existem no Brasil só duas plantas de biodigestão de vinhaça. O acréscimo de produção de álcool e os custos e impactos da fertirrigação devem aumentar o interesse por essa tecnologia.

Partindo da premissa de que 1 litro de etanol produz 13 litros de vinhaça, tem-se, de acordo com os dados de Johansson et al. (1993), que 1 m<sup>3</sup> de vinhaça produz 14,23 m<sup>3</sup> de metano. No Quadro 6 está a quantidade de biogás gerado a partir de vinhaça.

**Quadro 6** – Quantidade de biogás gerado a partir de vinhaça

**Table 6** – Amount of biogas generated from vinasse

Quantidade de álcool/safra produzida no País 03/04 <sup>(1)</sup>	14.808.705 m <sup>3</sup>
Quantidade de vinhaça gerada	192.513.165 m <sup>3</sup> por safra
Biogás produzido (etanol)	2.739.610.425Nm <sup>3</sup> por safra

<sup>(1)</sup> Única (2005)

## 4.2 Resíduos urbanos

### 4.2.1 Resíduos sólidos urbanos – aterros sanitários

Um dos principais problemas enfrentados pela administração pública municipal

é a questão do gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos, bem como sua destinação final. A utilização do biogás do lixo não pode ser vista como a solução para os problemas energéticos do País, mas sim como uma forma de melhorar a questão do gerenciamento dos resíduos, preservando águas subterrâneas e superficiais, gerando empregos, reduzindo a pobreza e incentivando o desenvolvimento tecnológico. No Brasil, segundo o IBGE (2000), 36,18 % do lixo gerado vai para aterros sanitários, principalmente nas grandes cidades.

Segundo a CETESB (1992), a geração diária de lixo *per capita* no Brasil varia de 0,4 a 0,7 kg, para uma média de 0,52 kg por dia por habitante. A tendência de crescimento econômico faz com que esses valores se elevem nos próximos anos, o que fará com que haja necessidade de políticas mais rigorosas para regularização das condições de aterros sanitários e maior incentivo econômico para a reciclagem.

Segundo o IPCC - *International Panel on Climate Change* (1996), os aterros sanitários são responsáveis por cerca de 5 a 20% do total de metano liberado por fontes antropogênicas. Através dos resultados do inventário nacional de emissões de metano decorrentes do tratamento de águas residuárias e da disposição dos resíduos sólidos no Brasil, entre 1990 e 1994 (VIEIRA e SILVA, 2002), pode-se avaliar a quantidade de metano emitido neste período. Com base na metodologia do IPCC (1996), e a partir de dados estatísticos de população e fatores estimados de geração de resíduos, chegou-se a conclusão que as emissões de metano a partir de resíduos sólidos no Brasil, em 1990, foi de 618.000 t, aumentando para 677.000 t em 1994, neste trabalho foi feita a atualização dos dados para o ano de 2001. Os danos causados por estas emissões não somente intensificariam o efeito estufa, mas também causariam graves efeitos na vegetação e na saúde humana, através da formação de

ozônio a baixas altitudes e da exposição a outros gases contaminantes, podendo causar doenças como câncer e outras afetações. No Quadro 7 mostra dados sobre a geração de RSU no Brasil.

Vários são os métodos para calcular o total de metano emitido pela degradação anaeróbia dos resíduos. Segundo o IPCC (1996), citado por Alves (2000), a quantidade de metano gerada em um ano pode ser calculada pela equação (1), e apresentada na equação (2):

$$E = Pop_{urb} * taxa\ RSU * RSUf * FCM * COU * COUF * F * 16 / 12 \quad (\text{eq. 1})$$

em que  $Pop_{urb}$  = população urbana (habitantes) (dados do IBGE - maio, 2005);  $taxa\ RSU$  = taxa de geração de resíduos sólidos urbanos por habitante, por ano (kg RSU por habitante por ano);  $RSUf$  = fração de resíduos sólidos urbanos que é depositada em locais de disposição de resíduos sólidos (%);  $FCM$ : fator de correção de metano (% - fração adimensional – de acordo com a profundidade do local de disposição de resíduos sólidos, existem valores recomendados pelo IPCC);  $COD$  = carbono orgânico degradável no resíduo sólido urbano ( $gC\ g^{-1}\ RSU$ );  $CODF$  = fração de COU que realmente degrada (%);  $F$  = fração de  $CH_4$  no gás de aterro (% - fração adimensional); e  $16 / 12$  = taxa de conversão de carbono em metano (adimensional).

$$E\ Brasil = 183.652.427 * (0,5 * 365) * 0,85 * 0,60 * 0,12 * 0,77 * 0,50 * 1,33 = 969\ Gg\ de\ CH_4 \quad (\text{eq. 2})$$

Nesse caso não está sendo considerada a variável tempo, ou seja, não são computados o período no qual o aterro produz metano e a sua taxa de liberação. A formação do biogás nos aterros é variável ao longo do tempo. Quando o lixo é descarregado nos aterros, ele permanece algum tempo exposto em contato com o ar, ocorrendo, neste período, a liberação de compostos voláteis.

#### 4.2.2 Resíduos líquidos urbanos – estações de tratamento de efluentes

A falta de tratamento dos esgotos domésticos é um problema que se estende por todo o Brasil. Mesmo nos grandes centros urbanos, parte dos esgotos coletados não recebe nenhum tipo de tratamento para diminuir a carga tóxica do efluente antes de devolvê-lo ao corpo receptor. Isso faz com haja aumento considerável de aparecimento de doenças, expondo ainda mais a população de baixa renda.

No Brasil, os tratamentos biológicos mais utilizados são as lagoas de estabilização e os processos de lodo ativado com aeração prolongada e filtros biológicos. Nas áreas rurais e para sistemas individuais, os

#### Quadro 7 – Geração de RSU no Brasil

Table 7 – Generation of municipal solid waste in Brazil

Classificação	População	kg por Habitante por Dia	t por Dia	%
Até 100 mil ha	84.433.133	0,4	33.773	39
100 e 200 mil ha	16.615.355	0,5	8.308	10
200 e 500 mil ha	22.040.778	0,6	13.224	15
Acima de 500 mil ha	45.777.000	0,7	32.044	37
Total	169.544.443	0,52	87.349	100

Fonte: CETESB (2001); IBGE (2001), citados por MMA/CEPEA/FEALQ, (2004)

tanques sépticos são bastante utilizados, por vezes seguidos de filtros anaeróbios ou, ainda, pela infiltração do efluente no solo. Os efluentes de diferentes indústrias são tratados tradicionalmente através de lagoas ou pelos processos de lodos ativados e filtros biológicos. Atualmente os reatores anaeróbios são bastante utilizados nas indústrias (CETESB, 2002).

A recuperação do biogás gerado nas ETEs contribui para o aumento da geração de energia, bem como para co-geração, assim como reduz os impactos ambientais e melhorar a questão do saneamento básico no País.

Segundo as recomendações do IPCC (1996), as emissões de  $\text{CH}_4$  provenientes de águas residuárias domésticas devem ser calculadas anualmente de acordo com a seguinte equação (3), e apresentada na equação (4):

$$E = \text{Pop}_{urb} * \text{taxaDBO}_5 * \text{FET} * \text{FCM} * \text{MFEM} - R \quad (\text{eq. 3})$$

em que  $\text{Pop}_{urb}$  = população urbana do País (*habitantes*) (dados do IBGE - maio, 2005); taxa  $\text{DBO}_5$  = taxa de geração de demanda bioquímica de oxigênio ( $\text{DBO}_5$  por habitante por ano); FET = fração de esgoto tratada (fração adimensional); FCM = fator de correção de metano (% - fração adimensional); MFEM = máximo fator de emissão de metano (fração adimensional ou  $\text{gCH}_4 \text{ g}^{-1} \text{ DBO}_5$ ); e R = quantidade de metano recuperado ( $\text{GgCH}_4$  por ano).

$$E = (183652427 * 18,25 * 0,10 * 0,80 * 0,25 - 0) * 10^{-6} \\ = 67,03 \text{ Gg } \text{CH}_4 / \text{ano} \quad (\text{eq. 4})$$

De acordo com a literatura técnica, o biogás possui uma grande variação na sua quantidade e composição, quando gerado em reatores anaeróbios. Em algumas referências bibliográficas considera-se que cada

quilograma de DQO removido (em termos de matéria orgânica degradada) resulta em 350 L de metano, nas condições normais de temperatura e pressão. Esse valor é geralmente muito superior ao que se constata na realidade (CAMPOS, 1999). Segundo o autor, a produção de biogás pode variar por pessoa atendida em uma ETE, na faixa de 5 a 20 L por pessoa por dia, devendo ser ressaltado que a participação de metano, em volume, pode variar entre 50 e 70%. O restante é composto por  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ , nitrogênio, hidrogênio, mercaptanas, outros gases e vapor d'água.

Um outro gás que merece atenção é o gás sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ), pois é o responsável pela emissão de odores em uma ETE. Este gás é predominante em pH próximo a 7. Observa-se em uma ETE que quanto mais elevado for o pH, acima de 7, menor será a presença de  $\text{H}_2\text{S}$  na forma de gás, reduzindo a exalação de odores.

### 4.3 Dejetos de bovinos e suínos

A quantidade de dejetos produzidos varia com o peso vivo dos animais. Já a água ingerida vai influenciar a produção de urina, variando a quantidade de dejetos líquidos. No Quadro 8 está a produção de dejetos em relação ao peso vivo do animal.

Para contabilizar a produção de biogás e, conseqüentemente, a geração de eletricidade a partir de dejetos bovinos, considerouse o volume de cabeças de gado em regime de confinamento. No Brasil, o confinamento é conduzido durante a época seca do ano, de 90 a 120 dias, já que cerca de 70 a 80% da produção forrageira se dá no período chuvoso e somente 20 a 30% ocorre no outono e inverno. Esse valor chegou a 1.906.000 cabeças em 2002 (FERREIRA, 2004), tendo um aumento para 2004 em torno de 14,5%. (PECUÁRIA..., 2004). Os seis Estados mais importantes no uso desta técnica são: São Paulo, Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso do Sul, Paraná e Mato Grosso.



Para o cálculo do potencial de geração de eletricidade a partir de resíduos de suínos, foram tomados como dados o número de suínos abatidos e o número de matrizes no País, devido à ausência de um levantamento de dados nacionais da quantidade de suínos criados em regime de confinamento. Sabe-se que o ciclo de vida de um suíno varia de 140 a 150 dias, até atingir 100 kg para o abate. Segundo a ABIPECS – Associação Brasileira dos Produtores e Criadores de Suínos e a ABCS – Associação Brasileira dos Criadores de Suínos, no Brasil o dado estimado para o ano de SIF/Brasil/2003 foi de 24.680.000 cabeças abatidas. Em 2003, o plantel de matrizes foi de 2.494.910 cabeças de suínos.

## 5 RESULTADOS

No Quadro 9 está o potencial de geração de eletricidade a partir dos resíduos orgânicos estudados anteriormente.

O potencial de geração de eletricidade a partir do biogás corresponde de 1,21 a 1,30% do total instalado no País, que de acordo com o Balanço Nacional Energético (BEN, 2004) é de 90.732 MW. Na Figura 1 está a comparação entre o potencial de geração obtido através do biogás das fontes consideradas neste artigo e a potência instalada das fontes contempladas no PROINFA – Programa de Incentivo as Fontes Alternativas de Energia Elétrica segundo o Ministério de Minas e Energia (BRASIL, 2005).

## 6 CONCLUSÃO

Conclui-se que o Brasil tem um potencial considerável de geração de eletricidade a partir do biogás obtido pela digestão anaeróbia de resíduos orgânicos, que poderia suprir a demanda de energia em locais com altas taxas de produção do mesmo. A análise comparativa apresentada na Figura 1

**Quadro 8** – Produção diária de resíduos líquidos e esterco de diversos animais

**Table 8** – Daily production of liquid residues and manure of several types of animals

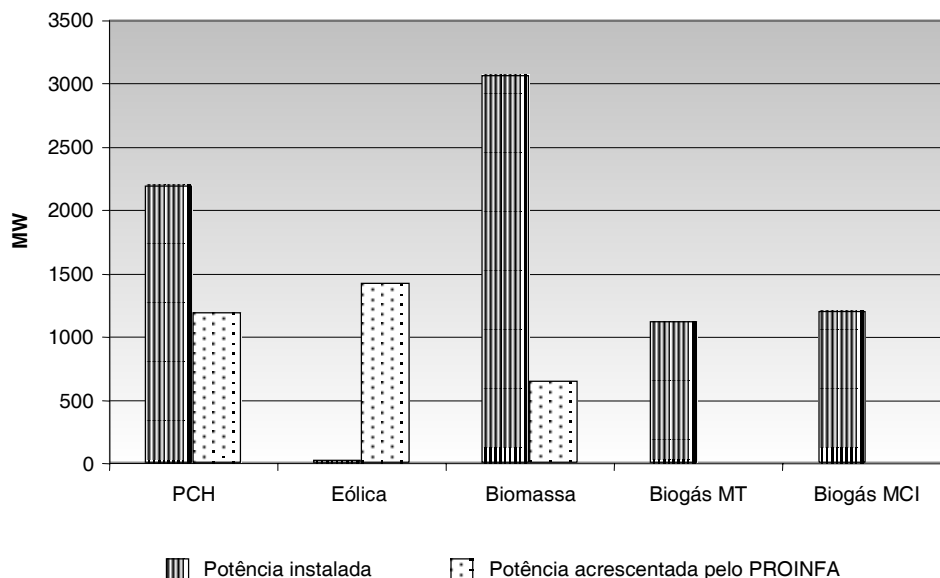
Resíduo	Unidade	Suínos	Frango Corte	Gado Corte	Gado Leite
Líquidos	%/dia (f PV)	5,1	6,6	4,6	9,4
Sólidos	kg por animal por dia	2,3 - 2,5	0,12 - 0,18	10 - 15	10 - 15

Fonte: Konzen (1980), citado por Oliveira (1993)

**Quadro 9** – Resumo do potencial de geração de eletricidade a partir de resíduos orgânicos no Brasil

**Table 9** – Summary of the electricity potential generation from organic residues in Brazil

Resíduo Orgânico	Potencial de Geração de Energia Elétrica por Ano (MW) P.C.I. 20.096 kJ m <sup>-3</sup>	
	Microturbinas de 30 kW ( $\eta$ 27%)	Grupo gerador de 80 kW ( $\eta$ 29%)
Vinhaça	819,27	879,96
Aterros sanitários	265,75	285,44
Estações de tratamento de esgotos	16,96	18,22
Dejetos de bovino	19,68	21,13
Dejetos de suínos (somente cabeças abatidas)	3,56	3,83
Total	1.125,23	1.208,58



**Figura 1** – Potência instalada das fontes contempladas no PROINFA e das fontes de resíduos orgânicos analisadas.

**Figure 1** – Installed power of the sources added by PROINFA and the organic residue sources analyzed.

mostrou a importância desse incremento na produção de energia elétrica a partir de fontes renováveis. Nota-se que o potencial de geração a partir do biogás das fontes consideradas é em torno de 43% do total da potência instalada pelas fontes renováveis contempladas no PROINFA – Programa de Incentivo as Fontes Alternativas de Energia Elétrica – segundo o Ministério de Minas e Energia (2005).

As vantagens da utilização do biogás como fonte energética não é somente a geração de energia, mas também uma possível solução para os problemas do gerenciamento dos resíduos urbanos no Brasil. Com isso, parte dessa energia seria utilizada na própria instalação onde se produz o biogás, enquanto a outra parte poderia ser vendida à concessionária de energia elétrica local.

## 7 AGRADECIMENTOS

O desenvolvimento deste trabalho contou com o apoio do CNPq, através de uma bolsa de doutorado.

## REFERÊNCIAS

- ALVES, J. W. S. Diagnóstico técnico institucional da recuperação e uso energético do biogás gerado pela digestão anaeróbia de resíduos. São Paulo: 2000. 142 p. (PIPGE/USP, M.S., Energia, 2000).
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS CRIADORES DE SUÍNOS – ABCS. Disponível em: <www.bcs.com.br>. Acesso em: 20 abr. 2005.
- BIRGEMER, H. G.; CRUTZEN, P. J. The production of methane from solid waste. **Journal of Geophysical Research**, v. 92, n. D2, p. 2181-2187, 1987.
- BRAILE, P. M.; CAVALCANTI, J. E. W. A. Manual de tratamento de águas residuárias industriais. Usinas de Açúcar e Alcool. São Paulo: CETESB, 1979. p. 175-218.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, Estudo do potencial de geração de energia renovável proveniente dos “aterros sanitários” nas regiões metropolitanas e grandes cidades do Brasil, Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada – CEPEA & Fundação de Estudos Agrários “Luiz de Queiroz” – FEALQ – Mar de 2004. Disponível em: <ambientecepea@esalq.usp.br>. Acesso em: 4 abr. 2005.

- CAMPOS, J. R. (Coord.). Tratamento de Esgotos sanitários por processo anaeróbico e disposição controlada no solo. ABES, Projeto PROSAB. Rio de Janeiro: 1999. 464 p.
- CASTANÓN, N. J. B. Biogás, originado a partir dos rejeitos rurais. Trabalho apresentado na disciplina: Biomassa como Fonte de Energia - Conversão e utilização. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2002. 66 p.
- CENTRO NACIONAL DE REFERÊNCIA EM BIOMASSA. Disponível em: <<http://www.cenbio.org.br>>. Acesso em: 14 abr. 2005.
- COELHO, S. T. et al. Instalação e testes de uma unidade de demonstração de geração de energia elétrica a partir de biogás de tratamento de esgoto. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2004. (anais em CD-ROM).
- COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO – SABESP. <[www.sabesp.com.br](http://www.sabesp.com.br)>. Acesso em: 4 abr. 2005.
- COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL – CETESB. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br>>. Acesso em: 15 mar. de 2005.
- CORTEZ, L. A. B.; FREIRE, W. J.; ROSILLO-CALLE, F. Biodigestion of vinasse in Brazil. **Internacional Sugar Journal**, v. 100, n. 1196, p. 403-413, 1996.
- FERREIRA, M. M.; FERREIRA, A. C. M.; EZEQUIEL, J. M. B. Avaliação econômica da produção de bovinos confinados. **Informações Econômicas**, v. 34, n. 7, p. 47-59, 2004.
- FREIRE, W. J., CORTEZ, L.A.B. **Vinhaça de cana-de-açúcar**. Campinas: Agropecuária, 2000. 203 p.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 12 jun. 2005.
- INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC, Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories reference Manual. Revised 1996. v. 3. Disponível em: <<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs6e.htm>>. Acesso em: 4 abr. 2005.
- JORDÃO, E. P.; PESSOA, C. A. **Tratamento de esgotos domésticos**. 3. ed. Rio de Janeiro: ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 1995. 720 p.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – MME. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br>>. Acesso em: 15 maio 2005.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/>> Acesso em: 15 maio 2005.
- OLIVEIRA, P. A. V. (Coord.). Manual de manejo e utilização dos dejetos de suínos. Concórdia: EMBRAPA-CNPASA, 1993. 188 p. (EMBRAPA-CNPASA. Documentos, 27)
- PECUÁRIA: Confinamento X Semiconfinamento. **Agroanalysis**, v. 11, p. 36-39, 2004.
- POMPERMAYER R. S.; PAULA Jr. D. R. Estimativa do potencial brasileiro de produção de biogás através da biodigestão da vinhaça e comparação com outros energéticos. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 3., 2000, Campinas: UNICAMP. **Anais...** Disponível em: <[http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=MSC000000022000000200055&lng=en&nrm=abn](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC000000022000000200055&lng=en&nrm=abn)>. Acesso em: 14 abr. 2005.
- TCHOBANOGLOUS G.; THEISEN, H.; VINIL, S. **Integrated solids waste management**; engineering principles and management issues. Irwin: MacGraw Hill, 1993. 978 p.
- ÚNICA. Disponível em: <[www.unica.com.br](http://www.unica.com.br)>. Acesso em: 14 abr. 2005.
- UNITED STATES ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY – USEPA. Air Emission from Municipal Solids Waste Landfill – Background Information for Proposed Standards and Guidelines. Emission Standards Division. EPA-450/3-90-011a. USA, March de 1991.
- VAZOLLER, R. F. Microbiologia e saneamento ambiental, 1999. Disponível em: <<http://www.bdt.fat.org.br>>. Acesso em: 3 mar. 2005.
- VIEIRA, S. M. M.; ALVES, J. W. S. 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. Brasília: CETESB, 2002. 86 p.