

### III-358 - ESTIMATIVA DE APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS GERADO EM UM REATOR DE METANIZAÇÃO APLICADO AO TRATAMENTO DE RESÍDUOS ALIMENTARES DE UM CAMPUS UNIVERSITÁRIO

**Bernardo Ornelas Ferreira** <sup>(1)</sup>

Engenheiro Ambiental. Mestrando em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pelo Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG.

**Luis Felipe Dornfeld Braga Colturato**

Engenheiro Ambiental. Doutor em Saneamento pelo Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG. Diretor Executivo da Methanum Resíduo e Energia – Belo Horizonte (MG), Brasil.

**Fabício Jose Pacheco Pujatti**

Engenheiro Mecânico Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Minas Gerais. Professor Adjunto da Universidade Federal de Minas Gerais.

**Jorge Barbi Martins**

Engenheiro de Energia. Auxiliar Técnico Methanum Resíduo e Energia – Belo Horizonte (MG), Brasil

**Carlos Augusto de Lemos Chernicharo**

Engenheiro Civil e Sanitarista. Doutor em Engenharia Ambiental pela Universidade de Newcastle upon Tyne, Reino Unido. Professor Associado do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG

**Endereço** <sup>(1)</sup>: Avenida Presidente Antônio Carlos, 6627 - Pampulha, Belo Horizonte - MG, 31270-901 Brasil.  
Tel: +55 (31) 9350-9095 - e-mail: ornelas.ambiental@gmail.com

#### RESUMO

Face ao corrente cenário de mudanças climáticas e de escassez hídrica, faz-se necessário o desenvolvimento de tecnologias modernas, de baixa emissão de carbono, que contribuam para a diversificação da matriz energética nacional, baseada no uso das energias renováveis. Sob esse panorama, a plataforma de metanização de resíduos orgânicos (*pMethar*) é constituída por um sistema integrado de tratamento de resíduos alimentares gerados por um dos restaurantes universitários da UFMG, com vistas ao aproveitamento energético do subproduto biogás. O objetivo da pesquisa foi estimar a geração de energia elétrica a partir do biogás gerado no processo de metanização. As estimativas foram tomadas a partir do monitoramento operacional do reator durante 396 dias, quando foram avaliados os parâmetros físico-químicos de conversão de matéria orgânica em metano. O rendimento de produção de metano observado apresentou maior frequência entre os valores de 234 e 496 m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>.tSV<sup>-1</sup>, valor consoante ao reportados pela literatura referente ao tratamento de resíduos alimentares. Acerca desses rendimentos e da capacidade de tratamento do reator (acima de 500 kg de resíduo alimentar por dia), estima-se que a energia elétrica gerada pelo motor de cogeração possa atingir patamares de até 2 MW.mês<sup>-1</sup>, a depender das condições ideais de digestão anaeróbia. Em suma a *pMethar* garante sua autossuficiência energética e gera um excedente que pode ser disponibilizado para o uso na em edifícios do entorno ou na iluminação pública da própria universidade.

**PALAVRAS-CHAVE:** Metanização, resíduos sólidos urbanos, biodigestor, metano, biogás, energia renovável.

#### INTRODUÇÃO

O tratamento e disposição de resíduos sólidos urbanos (RSU) tem sido um desafio para maioria dos municípios brasileiros. Com a implementação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (Brasil, 2010), as municipalidades se viram obrigadas a buscar alternativas sustentáveis para a disposição e o tratamento RSU gerados no país. Em virtude da elevada fração de orgânicos presente nos resíduos urbanos brasileiros (~51%), sugere-se a adoção de tecnologias biológicas para o tratamento dessa tipologia de matéria residual, a exemplo de países desenvolvido, sobretudo da União Europeia, que têm empregado com sucesso as tecnologias modernas de tratamento de biomassa (Eurobserv'ER, 2013; Abrelpe, 2014).

Nesse aspecto, o Brasil destaca-se pelo seu potencial em gerar energia a partir de fontes renováveis, tal como a biomassa residual, passível de aproveitamento energético (térmico e elétrico) e combustível a partir do uso do biogás, derivado do tratamento anaeróbio da matéria orgânica residual – e.g.: metanização dos resíduos orgânicos urbanos e rurais, e o aproveitamento do biogás gerado em aterros sanitários e em ETE dotadas de reatores anaeróbios

No entanto, o setor de tratamento e disposição de resíduos é o segundo maior responsável pela emissão de gás metano no Brasil, precedido apenas pelas atividades agropecuárias. Em 2012, esse setor emitiu cerca de 42 MtCO<sub>2</sub>e – 89,3% na forma de CH<sub>4</sub>, derivado da decomposição anaeróbia da fração orgânica que compõe os resíduos. Salienta-se, ainda, que a disposição de RSU tem um papel de protagonismo nas emissões de gases de efeito estufa (GEE), sendo responsável por 62,3% das emissões de CH<sub>4</sub> (OC/SEEG, 2014).

Embora o metano seja responsável por uma crescente parcela das emissões de GEE no mundo, esse gás tem elevado potencial de recuperação energética. Isso torna seu uso estratégico, pois promove o simultâneo tratamento do resíduo orgânico e composição de uma matriz energética renovável.

No Brasil, 68,6% da energia elétrica gerada é derivada de recursos hídricos e 25,6% a partir da queima de combustíveis em termoeletricas (EPE, 2014). Face ao corrente cenário de mudanças climáticas e de escassez hídrica, faz-se necessário o desenvolvimento e investimento em tecnologias modernas de baixa emissão de carbono, que contribuam para a diversificação da matriz energética nacional, baseada no uso das energias renováveis.

Sistemas de tratamento de resíduos orgânicos concebidos por unidades de metanização têm como objetivo central a conversão de matéria orgânica em biogás. A formação do metano, principal constituinte do biogás, ocorre essencialmente através de duas rotas metabólicas distintas, a saber, degradação do ácido acético (realizado pelas arqueias metanogênicas acetoclásticas) e redução do gás carbônico (realizado pela arqueias metanogênicas hidrogenotróficas). Em virtude do potencial calorífico do metano (8.500 kcal.m<sup>-3</sup>), o biogás tem sido usado com sucesso na geração de energia renovável, seja como energia elétrica, térmica, biocombustível veicular e/ou para injeção na rede de gás natural (FNR, 2010).

Um dos usos potenciais do biogás tem sido o aproveitamento energético térmico, a partir da queima direta, técnica dominada a séculos pelos povos orientais, a destacar China e Índia, protagonistas no uso doméstico do biogás (Chen *et al.*, 2012; Chen e Chen, 2013). O uso energético mais usual em usinas de biogás tem sido o aproveitamento para geração de eletricidade (FNR, 2010). Entretanto, Lobato (2011) destaca que, por mais eficiente que seja o processo de transformação do biogás em energia elétrica, a maior parte da energia gerada é transformada em calor e perdida para o ambiente. Acerca disso, a geração simultânea de energia elétrica e térmica (cogeração ou CHP – anacrônico inglês para *combined heat and power*) tem sido o campo mais explorado no âmbito do aproveitamento energético do biogás, principalmente em países da União Europeia. Tal técnica permite a geração combinada de energia elétrica e calor, antes perdido, incrementando a eficiência energética do sistema (EIA, 2014; Eurobserv'ER, 2013).

Via de regra, são utilizados motores de combustão interna (MCI) para transformação do biogás em energia mecânica. Nos MCI, a queima de combustível e ar gera uma reação exotérmica, com a formação de gases à elevada temperatura e pressão. A expansão desses gases possibilita a movimentação dos pistões, resultando na conversão da pressão em movimento rotacional, que, por sua vez, movimenta o gerador. Os MCI podem utilizar diversos tipos de combustíveis líquidos ou gasosos tais como óleo diesel, gasolina, gás natural, biogás ou ainda uma mistura deles, aumentando assim a sua flexibilidade (Lobato, 2011).

Uma alternativa atrativa para o uso energético é a recuperação da energia térmica emitida pelo escapamento e pelo sistema de arrefecimento (que usualmente representam cerca de 40% da energia disponível no combustível de alimentação), sendo possível a utilização para aplicações no próprio processo de tratamento. Via de regra, os motores de cogeração exigem concentrações de CH<sub>4</sub> acima de 40% em volume de biogás. (FNR, 2010; Lobato, 2011).

Dentre as principais vantagens da produção de energia elétrica pelo uso do biogás pode-se citar:

- microgeração descentralizada, com a geração de energia próxima da fonte consumidora;
- possibilidade de lucro adicional devido à produção de energia/gás e comercialização com companhias energéticas/gás;
- redução no consumo de energia pela planta produtora;
- potencial de uso da energia térmica no próprio processo de tratamento;
- redução das emissões de GEE para a atmosfera, gerando possíveis incentivos/bônus ambientais.

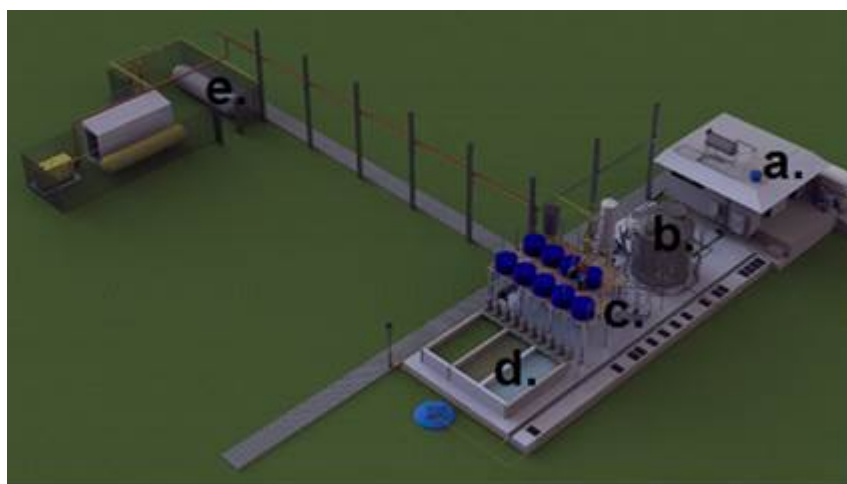
Outro uso que vem se popularizando na Europa é o tratamento do biogás para injeção na rede de gás natural e/ou para o uso como biocombustível veicular. No entanto, esse uso deve ser precedido de sistemas de purificação de alta eficiência, para remoção do CO<sub>2</sub>, de forma a aumentar o poder calorífico equiparando-o ao gás natural (FNR, 2010; Euroserv'ER, 2013; Colturato, 2015). O gás resultante desses processos de purificação do biogás, contendo níveis de metano superiores a 96,5%, é denominado biometano (ANP, 2015).

Busca-se em sistemas de metanização, além do correto tratamento da matéria orgânica em concordância com a PNRS, a geração descentralizada de energia, de forma a garantir a autossuficiência energética do sistema e a geração adicional de energia, visando a viabilização da tecnologia no espectro econômico. Destarte, salienta-se a necessidade da pesquisa em tecnologias nacionais que subsidiem o desenvolvimento de sistemas eficazes, robustos e de simplicidade operacional, aplicados ao tratamento descentralizado de resíduos orgânicos, capazes de atender pequenos municípios, áreas remotas e grandes fontes geradoras de resíduos orgânicos urbanos

O objetivo da pesquisa foi estimar o potencial de geração de energia elétrica a partir do biogás produzido em um reator de metanização em escala de demonstração aplicado ao tratamento de resíduos alimentares de um restaurante universitário.

## MATERIAL E MÉTODOS

O projeto de pesquisa foi desenvolvido na Plataforma de Metanização de Resíduos Orgânicos (*pMethar*), implantada na Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). O sistema é dotado de uma unidade de triagem de resíduos, um tanque de alimentação de substrato, um reator de metanização, um reservatório de material digerido, um sistema de desaguamento do lodo digerido, um sistema de condicionamento de biogás, um sistema de cogeração de eletricidade e calor a partir do biogás e um sistema de secagem térmica de lodo (Figura 1). A eletricidade e o calor gerados na unidade de cogeração serão utilizados para uso na própria planta e áreas adjacentes, enquanto os biossólidos e a água para reúso serão utilizados para fertirrigação de áreas verdes no entorno da planta.



**Figura 1:** a) Contêiner de triagem/laboratório; b) reator de metanização; c) sistema de separação sólido-líquido; d) sistema de pós-tratamento do percolato; e) plataforma de tratamento e armazenamento de biogás

O reator de metanização em estudo é operado em um único estágio de digestão anaeróbia, sob a via úmida de tratamento. A mistura do sistema é realizada por recirculação interna da biomassa através do bombeamento desta em diferentes alturas de sucção e recalque. O aquecimento do sistema é realizado pela recirculação de água quente em uma serpentina instalada na parte interna do reator. A água é aquecida por um sistema a vácuo de aquecimento solar.

O biogás produzido no sistema é conduzido à plataforma de tratamento, armazenamento e aproveitamento de biogás. Nessa unidade o biogás passa por etapas físicas, químicas e biológicas de remoção do gás sulfídrico ( $H_2S$ ). Em sequência, o biogás será encaminhado a um sistema de cogeração energética, que será utilizada para atender as demandas internas da plataforma.

Uma vez que o biogás é o principal subproduto da digestão anaeróbia, sua produção é monitorada quantitativamente por meio de um medidor de gás Itron tipo diafragma G2.5, e qualitativamente por meio de um analisador de gás portátil Landtec GEM5000, identificando as concentrações de gás metano ( $CH_4$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ), monóxido de carbono ( $CO$ ), oxigênio ( $O_2$ ) e sulfeto de hidrogênio ( $H_2S$ ).

Em virtude da logística de coleta e transporte de resíduos e da rotina operacional da pMethar, o monitoramento foi dividido em três fases operacionais distintas, *Fase I* (dias 0 a 51), *Fase II* (dias 99 a 220) e *Fase III* (dias 315 a 395).

#### Potencial energético estimado

A estimativa da energia disponível em um dado volume de biogás é dada em virtude do poder calorífico inferior do metano –  $8.500 \text{ kcal.m}^{-3}$  (Sathianathan, 1975). A partir da equação global de combustão do metano ( $CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$ ) e do calor de formação padrão de uma substância,  $\Delta H_f^\circ$  – definido como o calor envolvido na formação e 1 mol de uma dada substância, nas condições normais de temperatura e pressão ( $0^\circ\text{C}$ ; 1 atm) – estima-se o potencial energético do metano com base na Tabela 1.

**Tabela 1:** Calor de formação padrão das substâncias envolvidas na combustão do metano

Substância	$\Delta H_f^\circ \text{ (kcal.mol}^{-1}\text{)}$
$CH_4$	-17,889
$O_2$	0
$CO_2$	-94,052
$H_2O$	-57,798

Fonte: Perry e Green (1997)

$$\Delta H_C^\circ = [(1 \times -94,052) + (2 \times -57,798)] - [(1 \times -17,889) + (2 \times 0)] = -191,7 \text{ kcal.mol}^{-1}$$

Dado o exposto, a reação de combustão do metano é uma reação exotérmica, a qual libera  $191,7 \text{ kcal.mol}^{-1}$  (equivalente a  $802,7 \text{ kJ.mol}^{-1}$  ou  $222,9 \text{ Wh.mol}^{-1}$ ) de energia térmica, nas condições padrões de temperatura e pressão. Em função da densidade do metano nas mesmas condições ambientais ( $0,717 \text{ kg.m}^{-3}$ ), infere-se que  $1 \text{ m}^3 CH_4$  tem potencial para gerar  $8.500 \text{ kcal}$  de energia, ou seja,  $9,97 \text{ kWh.m}^{-3}$ .

Nessa pesquisa, a estimativa da geração de energia elétrica foi realizada com base nos parâmetros de eficiência energética usualmente fornecidos pelos fabricantes de MCI, em que cerca de 30% da energia disponível no biogás pode ser transformada em eletricidade.

O cálculo da demanda energética da plataforma de metanização foi realizado em função da potência nominal e do tempo de uso dos equipamentos utilizados na pMethar. Acerca disso, delineou-se três cenários de consumo energético, a saber:

- *Cenário 1* – potência máxima utilizada (bomba de recirculação interna: 24h), incluindo escritório (ar condicionado: 8h) e monitoramento operacional diário (estufa e mufla). Esse cenário superestima as condições de consumo energético da plataforma;
- *Cenário 2* – condições operacionais otimizadas (bomba de recirculação interna: 12h), incluindo escritório (ar condicionado: 4h) e monitoramento operacional 3x na semana (estufa e mufla). Esse cenário está mais próximo à realidade operacional da plataforma;

- *Cenário 3* – plataforma operada no modo econômico (bomba de recirculação interna: 4h), incluindo escritório (sem ar condicionado) e monitoramento operacional 2x na semana (estufa e mufla). Essas condições podem ser aplicadas a partir de pesquisas de avaliação de desempenho energético da plataforma.

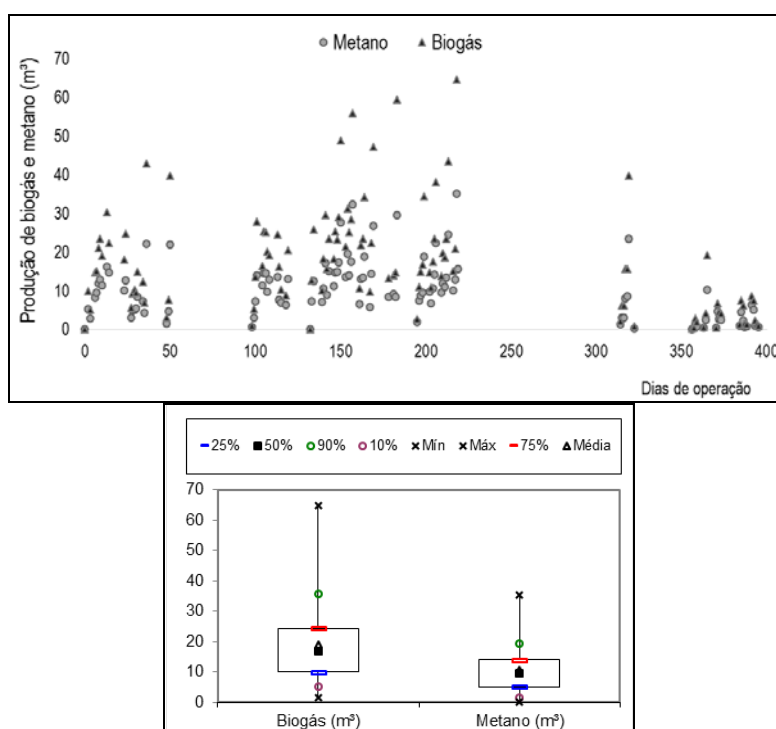
De maneira semelhante, foram considerados três cenários distintos de produção de metano, nos quais considerou-se os valores dos rendimentos de produção de metano observados ao longo do período operacional estudado:

- *Cenário I* – geração mínima, considerado o *percentil 25%* do rendimento de metano;
- *Cenário II* – geração média, considerada o rendimento médio de metano;
- *Cenário III* – geração máxima, considerado o *percentil 75%* do rendimento de metano.

Face aos seis cenários propostos para estimar o consumo energético teórico e a produção de biogás, formulou-se uma matriz para avaliar a relação consumo/produção da plataforma de metanização e, dessa forma, estudar a autonomia energética da plataforma e as potenciais estratégias operacionais para otimizar o desempenho do processo de metanização, em termos energéticos.

## RESULTADOS

O monitoramento produção de biogás é fundamental, tanto para avaliação do desempenho do reator, quanto para as estimativas de geração energética. A partir da Figura 2 nota-se que a produção de biogás apresentou maior frequência entre os valores de 10 e 24  $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$  (*percentis 25 e 75%*, respectivamente) e média igual a 19  $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ . Acerca da produção de metano, observou-se que 50% dos resultados mantiveram-se entre os volumes de 5 e 14  $\text{m}^3 \text{CH}_4 \cdot \text{d}^{-1}$  e a produção média foi igual a 10  $\text{m}^3 \text{CH}_4 \cdot \text{d}^{-1}$ . A variação da produção de biogás observada entre as fases de operação ocorre, principalmente, em virtude do regime operacional imposto ao sistema, sendo possível notar um provável desequilíbrio da biota anaeróbia do reator na fase III (dias 315-395), que culminou na sensível redução da produção de biogás e metano.

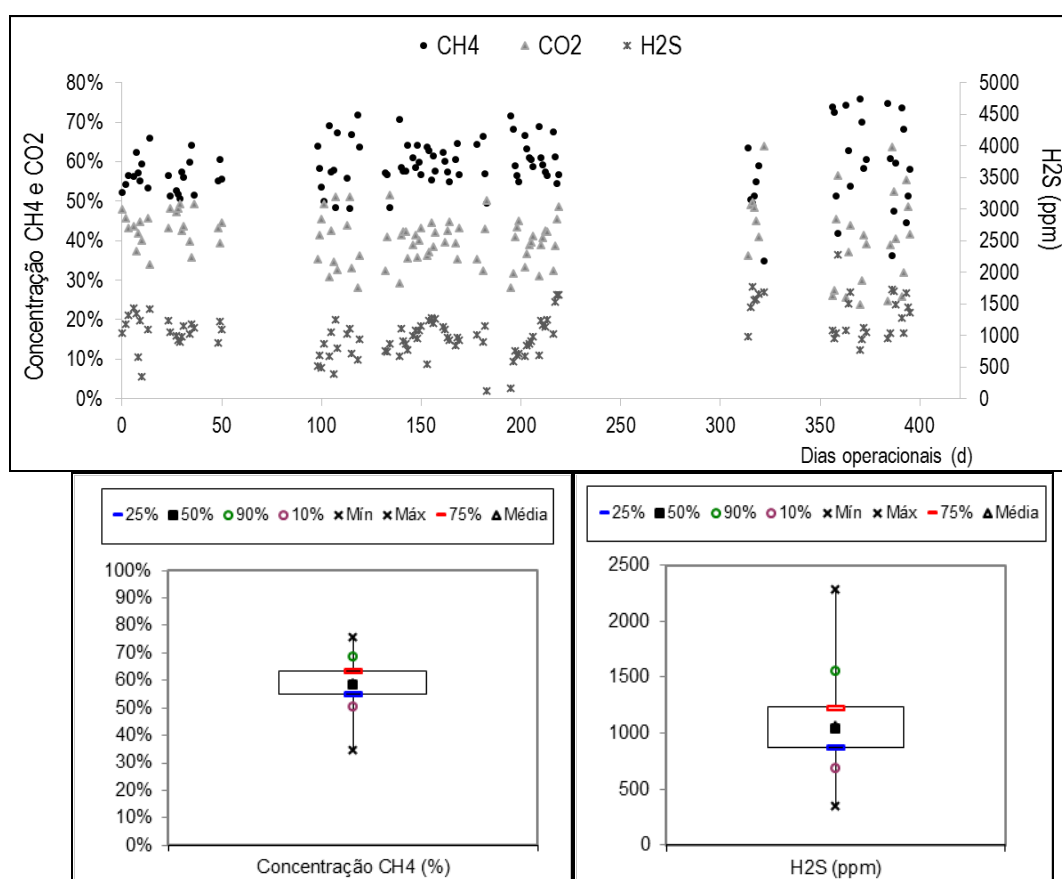


**Figura 2:** Serie temporal da produção de biogás e metano; *boxplot* dos percentis de produção de biogás e metano; e distribuição mensal da produção média de biogás, metano e potencial de geração energética da *pMethar*



A queda na produção de biogás na terceira fase de operação pode ser atribuída às cargas orgânicas aplicadas ao sistema, posto que a sobrecarga orgânica é reportada como um dos problemas operacionais mais recorrentes em reatores anaeróbios. Eventuais pontos de vazamento no reator também podem ter contribuído para a perda difusa do biogás, prejudicando uma aferição precisa desse parâmetro.

Acerca do monitoramento qualitativo do biogás (Figura 3), constata-se que a concentração de metano permaneceu consoante aos valores típicos usualmente reportados pela literatura (~60%) (Mata-Alvares *et al.*, 2000; FNR, 2010; Zhang *et al.*, 2014). Foi aferido, no biogás, o percentual médio de 59% de metano e maior frequência entre os valores de 55% e 64%, fator que indica a estabilidade operacional do sistema de tratamento e a aptidão dos microrganismos pelo substrato utilizado. No entanto, na fase III, foram observadas concentrações de metano abaixo de 40%, indicando uma baixa atividade metanogênica.

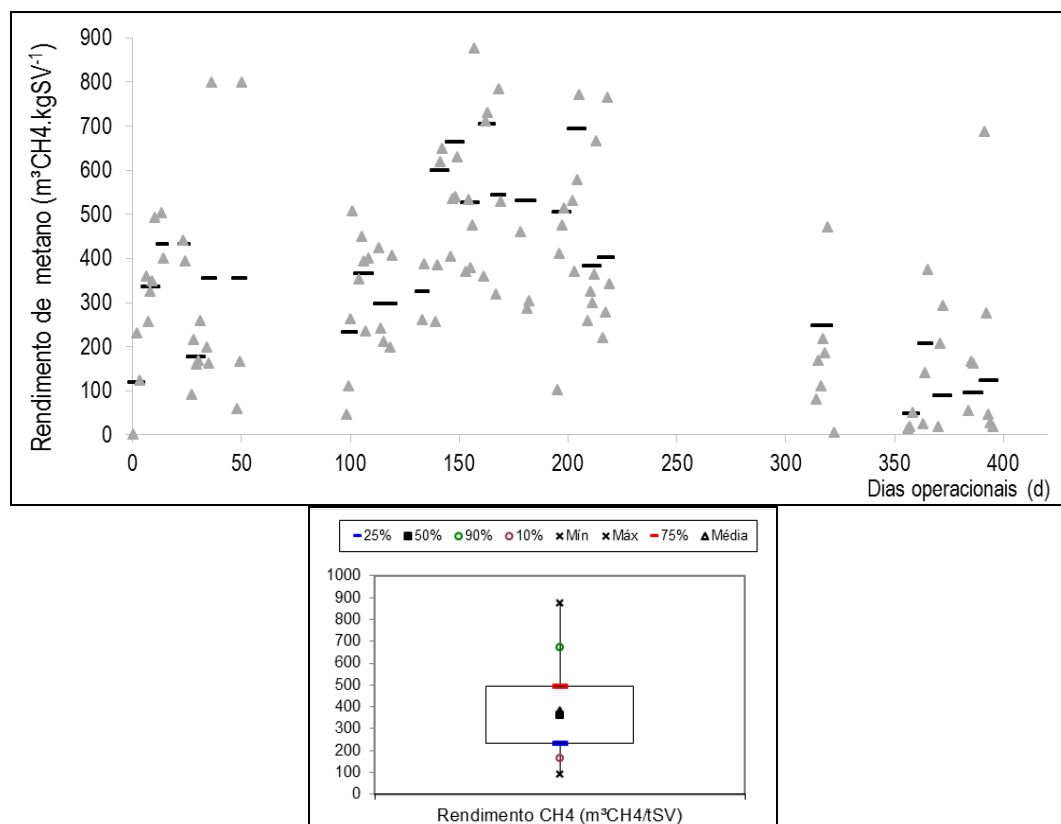


**Figura 3:** Série histórica e *boxplot* das concentrações de metano e sulfeto de hidrogênio no biogás do biodigestor

A concentração de metano acentua-se como uma eficiente ferramenta para a identificação antecipada de processos irreversíveis de instabilidade ambiental, dado que as limitações termodinâmicas são causadas pelo acúmulo de hidrogênio e, principalmente, acetato, o que pode causar a redução, e até mesmo a completa inibição, da atividade dos microrganismos envolvidos no processo, especialmente das arqueias metanogênicas, ocasionando a queda da concentração de metano e a concomitante redução da eficiência de remoção de matéria orgânica (Chernicharo, 2007). Esse parâmetro deve ser observado ao passo que se incrementa a carga orgânica aplicada, em vista de garantir o ótimo desempenho do reator.

O sulfeto de hidrogênio ( $H_2S$ ), gás tóxico, responsável pelo mau odor e o qual detém potencial corrosivo, apresentou o valor médio de 1.070 ppmV e maior frequência observada entre os valores de 874 ppmV e 1.232 ppmV, valores típicos de biogás gerado em ETE e maiores que os reportados para biogás de aterro sanitário (Lobato, 2011). Acerca desses valores, julga-se necessária a dessulfurização do biogás, visando seu uso para cogeração de energia, em que as concentrações de  $H_2S$  devem ser menores que 200 ppmV, para prolongar a vida útil dos motor-geradores (FNR, 2010; Lobato, 2011; Colturato, 2015).

É importante notar, na Figura 4, que os rendimentos de metano variaram sensivelmente ao longo da semana operacional. É natural que haja menor rendimento na segunda-feira, em virtude da não alimentação do reator de metanização durante o fim de semana, em que parte da matéria orgânica aplicada é degradada, ao passo que há um maior rendimento de metano na sexta-feira, em função do acúmulo da matéria orgânica no reator ao longo da semana operacional. Acerca disso, optou-se por também representar os rendimentos médios semanais, a fim de facilitar o estudo da relação entre rendimento de metano e cargas orgânicas aplicadas, em cada semana operacional.



**Figura 4:** Série temporal do rendimento de metano, distribuição da média semanal de rendimento de metano e *boxplot* dos rendimentos observados.

Nesse período, o rendimento de produção de metano (parâmetro que indica a produtividade, em volume, de metano por unidade carga orgânica aplicada) apresentou valor médio de  $383 \text{ m}^3\text{CH}_4.\text{tSV}^{-1}$ , sendo 50% dos resultados compreendidos entre 234 e  $496 \text{ m}^3\text{CH}_4.\text{tSV}^{-1}$ . Esses valores são consoantes aos encontrados na literatura, que reporta o desempenho de reatores de metanização aplicados ao tratamento de resíduo alimentar (Zhang *et al.*, 2007; Banks *et al.*, 2011; Raposo, 2011; Kastner *et al.*, 2012; Nagao *et al.*, 2012; Nasir *et al.*, 2012; Browne *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2014). Esse parâmetro ressalta a aptidão do reator em tratar o resíduo alimentar gerado pelo restaurante universitário. A robustez do processo de metanização nas primeiras duas fases operacionais é resultado de uma operação contínua, em que a estocagem do substrato no tanque de alimentação do reator não era necessário, dada a logística de coleta, triagem, cominuição e alimentação do reator. A operação estável do reator permite avaliar o incremento da carga orgânica, em busca da maximização do potencial de geração energética da plataforma, ratificando o potencial da tecnologia para o tratamento integral do resíduo orgânico gerado no restaurante setorial II da UFMG.

Como explorado, as taxas de produção concentram-se dentro dos valores reportados pela literatura. Espera-se, ainda, que, com uma melhor gestão dos resíduos orgânicos no campus da universidade, o reator de metanização opere de forma contínua, contribuindo com a manutenção da estabilidade ambiental e operacional do sistema.

Estimativa de geração de energia elétrica

Busca-se nos sistemas de metanização, além da autossuficiência energética, a geração adicional de energia, visando a comercialização da produção excedente e, dessa maneira, viabilizar a tecnologia no espectro econômico.

O reator de mistura completa em estudo foi dimensionado para o tratamento de até 500 kg de resíduo alimentar (base úmida). A partir dessa massa e dos rendimentos de metano aferidos ao longo do período operacional da *pMethar*, estimou-se a produção diária de metano e a geração de energia elétrica na plataforma – considerou-se uma eficiência de 30% na transformação do biogás em eletricidade, valor usualmente encontrado em MCI disponíveis no mercado.

Considerado o teor médio de sólidos totais nos resíduo (13% ST), a elevada fração biodegradável do resíduo alimentar (92%) e os rendimentos de metano observados na *pMethar*, estimou-se a produção média diária de metano de  $22,9 \text{ m}^3\text{CH}_4.\text{d}^{-1}$ , com 50% dos dados entre  $13,9$  e  $29,7 \text{ m}^3\text{CH}_4.\text{d}^{-1}$ . Em termos de produção de biogás, isso representa uma média de  $38,8 \text{ m}^3.\text{d}^{-1}$ , com maior frequência entre os valores de  $23,6$  e  $50,3 \text{ m}^3.\text{d}^{-1}$ , e teor de metano igual a 59%. A Tabela 2 resume os principais parâmetros de estimativa energética delineados para os três cenários de produção de metano.

**Tabela 2:** Cenários estimados de produção de metano e de energia elétrica

Cenários	Rendimento de $\text{CH}_4$ ( $\text{m}^3\text{CH}_4.\text{tSV}^{-1}$ )	Produção $\text{CH}_4$ ( $\text{m}^3\text{CH}_4.\text{mês}^{-1}$ )	Geração Eletricidade ( $\text{kWh.mês}^{-1}$ )
I	234	420	1.256
II	383	687	2.055
III	496	890	2.661

Em função da potência nominal e do tempo de funcionamento dos equipamentos utilizados na operação e monitoramento ambiental do sistema de metanização, estimou-se o consumo mensal da plataforma (Tabela 3).



**Tabela 3:** Estimativa do consumo de energia elétrica na pMethar

Equipamento	Potência Ativa (W)	Cenário 1		Cenário 2		Cenário 3	
		Tempo de operação (h.mês <sup>-1</sup> )	Consumo elétrico (kWh.mês <sup>-1</sup> )	Tempo de operação (h.mês <sup>-1</sup> )	Consumo elétrico (kWh.mês <sup>-1</sup> )	Tempo de operação (h.mês <sup>-1</sup> )	Consumo elétrico (kWh.mês <sup>-1</sup> )
Mufla	5.720	20	114	12	69	8	46
Estufa	1.760	120	211	72	127	48	84
Balança de umidade	430	14	6	14	6	14	6
Bomba de alimentação	395	672	226	336	113	112	38
Bomba reator UASB	395	10	3	10	3	10	3
Bomba do sistema de aquecimento solar	550	112	52	112	52	112	52
Compressor de gás	3.700	10	31	10	31	10	31
Triturador de resíduos	3.728	30	95	20	63	20	63
Ar condicionado laboratório	1.050	160	143	80	71	0	0
Ar condicionado triagem	1.050	80	71	40	36	0	0
Outros equipamentos	665	*	114	*	84	*	70
<b>TOTAL</b>	<b>1.9151</b>	<b>*</b>	<b>1.068</b>	<b>*</b>	<b>656</b>	<b>*</b>	<b>394</b>

*\*tempo de operação variável em cada equipamento*

Em virtude da eficiência energética adotada para o motor de cogeração (30%), estimou-se uma geração de energia elétrica mínima de 1.256 kWh.mês<sup>-1</sup>; média de 2.055 kWh.mês<sup>-1</sup>; e máxima de 2.661 kWh.mês<sup>-1</sup>. Considerando o atual valor de cobrança sobre o uso residencial de energia elétrica em Minas Gerais (0,50974 R\$.kWh<sup>-1</sup> - ANEEL, 2015), estima-se que a plataforma teria a possibilidade de economizar um capital variando entre R\$ 640,03 e R\$ 1.356,65 ao mês. Apontado na Tabela 3, a energia elétrica gerada seria o suficiente para suprir a demanda elétrica média de 6 a 13 residências por mês.

**Tabela 4:** Resumo da estimativa do potencial energético mensal da plataforma de metanização

Parâmetro	Valor	Unidade
Resíduo tratado	500	kg.d <sup>-1</sup>
Teor de sólidos totais	13	%
SV/ST	0,92	-
Concentração média de metano	59	% CH <sub>4</sub>
Rendimento de metano*	234 – 496	m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> .tSV <sup>-1</sup>
Produção estimada de biogás*	23,6 – 50,3	m <sup>3</sup> biogás.d <sup>-1</sup>
Poder calorífico inferior do CH <sub>4</sub>	9,97	kWh.m <sup>-3</sup>
Eficiência térmica motor de cogeração	43	%
Eficiência elétrica motor de cogeração	30	%
Energia disponível	4.185 – 8.872	kWh.d <sup>-1</sup>
Potencial de geração elétrica	1.256 – 2.661	kWh.mês <sup>-1</sup>
Potencial de geração térmica	1.800 – 3.815	kWh.mês <sup>-1</sup>
Consumo elétrico da pMethar	394 – 1.068	kWh.mês <sup>-1</sup>
Equivalência em demanda residencial	8 – 17	residências.mês <sup>-1</sup>
Equivalência em lâmpadas fluorescentes (12W)	436 – 924	lâmpadas.8h.d.mês <sup>-1</sup>
Estimativa de capital economizado	640,03 – 1.356,65	R\$.mês <sup>-1</sup>

\*percentis 25 e 75%, respectivamente; consumo médio residencial = 158,9 kWh.mês<sup>-1</sup> (EPE, 2013); custo energia 0,50974 R\$.kWh<sup>-1</sup> (ANEEL, 2015).

A relação consumo/geração é um importante indicador para avaliação da eficiência energética das plataformas de metanização. Acerca dos dados de consumo e geração elétrica descritos na matriz de relação consumo/geração (Tabela 4), infere-se que, no pior cenário avaliado, a pMethar demanda 17% de energia elétrica além do que produz. Esse cenário é pouco provável (visto que foram considerados o funcionamento de ar-condicionado em tempo integral e intensivo uso da mufla e estufa para caracterização dos resíduos), uma vez que tal demanda energética não se faz necessária para o bom desempenho do sistema.

**Tabela 5:** Matriz de relações consumo/produção energética da plataforma de metanização

Consumo/Geração	Geração Elétrica Mínima*	Geração Elétrica Médio**	Geração Elétrica Máximo***
Consumo energético máximo	85%	52%	40%
Consumo energético otimizado	52%	32%	25%
Consumo energético modo econômico	31%	19%	15%

\*Rendimento CH<sub>4</sub> percentil 25%; \*\* Rendimento médio CH<sub>4</sub>; \*\*\* Rendimento CH<sub>4</sub> percentil 75%

No cenário de maior eficiência, a plataforma consome apenas 15% da energia que produz, sendo possível a comercialização ou a integração da energia excedente na rede elétrica (cerca de 2.260 kWh.mês<sup>-1</sup>). Tal cenário torna-se possível quando o sistema alcança o estado estacionário de rendimento de metano, em que a produção de biogás é máxima e a demanda por monitoramento laboratorial pode ser reduzida. No cenário médio, a plataforma consome menos de um terço da energia estimada gerada (32%), sendo o mais condizente com a rotina operacional da plataforma, em função dos parâmetros operacionais observados ao longo do período amostral.

Além da energia elétrica, o calor gerado também pode ser aproveitado no próprio sistema de tratamento, aumentando a eficiência energética da plataforma. Considerando que 40% da energia disponível possa ser transformada em calor, estima-se que possam ser gerados de 1.800 a 3.815 kWh.mês<sup>-1</sup> de energia térmica. Na pMethar, o calor será direcionado a um secador térmico, que tem como objetivo a secagem do lodo desaguado, a fim de gerar biossólidos para o uso agrícola.

Cabe destacar, ainda que, recentemente, a pMethar foi dotada de um novo grupo motogerador, composto por um motor FIAT-Siena *tetrafuel*, modificado para operar o uso do biogás. Esse equipamento está em fase de testes operacionais e ajustes estequiométricos realizados *in loco*. Em vista disso, espera-se um incremento sensível da geração de energia pela plataforma.

## CONCLUSÃO

O controle operacional é fundamental para a garantia de um bom desempenho do reator de metanização, sendo o monitoramento da qualidade do biogás uma importante ferramenta para identificação antecipada da instabilidade no sistema. Cabe salientar que o incremento de carga orgânica deve ser feito a partir da observação da concentração de metano no biogás, no qual deseja-se percentuais próximos a 60% de CH<sub>4</sub>.

A depender das condições ideais de digestão anaeróbia, da equalização da logística de coleta e transporte de resíduos e de um motor de cogeração com eficiência média de 30%, a *pMethar* é capaz de gerar até 2.600 kW.mês<sup>-1</sup> a partir da metanização de cerca de 500 kg de resíduos por dia. Nessas condições ideais, a plataforma teria condições de gerar até 400% de energia a mais do que seu autoconsumo.

Em virtude da tecnologia de cogeração em desenvolvimento e da equalização da logística de coleta e transporte do resíduo dentro da universidade há uma possibilidade concreta de incremento do potencial energético da plataforma. Em suma, a plataforma de metanização garante sua autossuficiência energética e se destaca como uma alternativa viável para o tratamento dos resíduos alimentares gerados no restaurante universitário da UFMG.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio recebido das seguintes agências e instituições: CNPq, FAPEMIG, FEAM, SNSA - Ministério das Cidades, Escola de Engenharia da UFMG, Departamento de Gestão de Áreas Verdes da UFMG, Methanum Engenharia Ambiental, WBS Tecnologia.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. APHA; AWWA; WEF. Standard methods for the examination of water and wastewater. 20. ed.. Washington: APHA, 2005
2. ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução Homologatória nº 1872, de 08/04/2015. Homologa o resultado do reajuste tarifário anual, fixa as Tarifas de Energia - TE e as Tarifas de Uso dos Sistemas de Distribuição - TUSD, referentes à Cemig Distribuição S/A - Cemig-D. 2015.
3. ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Resolução nº 8, de 30 de Janeiro de 2015. A qual fornece especificações sobre a produção e utilização do biometano. 2015.
4. ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil. Brasil. 2014.
5. BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Plano Nacional de Resíduos Sólidos. Lei nº 12.305 de 02 de agosto de 2010; altera a lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Diário Oficial da União. Brasília-DF. 2010.
6. BROWNE, J. D.; MURPHY, J. D. Assessment of the resource associated with biomethane from food waste. Appl. Energy, v. 104, p. 170-177, 2013.
7. COLTURATO, L., F., D., B. Dessulfuração de Biogás da metanização da vinhaça: uma nova abordagem para remoção de altas concentrações de H<sub>2</sub>S. Tese (doutorado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. 2015.
8. CHEN, S.; CHEN, B. Net energy production and emissions mitigation of domestic wastewater treatment system: a comparison of different biogas-sludge use alternatives. Bioresour Technol, v. 144, p. 296-303, Sep 2013.
9. CHEN, S.; CHEN, B.; SONG, D. Life- cycle energy production and emissions mitigation by comprehensive biogas- digestate utilization. Bioresource Technology, v. 114, p. 357. 2012.
10. CHERNICHARO, C.A.L. Digestores Anaeróbios. Belo Horizonte: DESA-UFMG. P. 245, 2007.
11. EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional 2013: Ano base 2012. EPE. Rio de Janeiro, 274 p. 2014.
12. EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Anuário estatístico de energia elétrica 2013. Ministério de Minas e Energia. Rio de Janeiro. 2013
13. EIA – Energy Information Administration. International Energy Outlook 2014. U.S. Department of Energy. Washington, DC. 2014.

14. EUROBSERV'ER. The State of Renewable Energies in Europe. In: 13° Eurobserv'ER Report. p 44-48, Paris. 2013.
15. FNR - FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE. Guia Prático do Biogás: Geração e Utilização. Ministério da Nutrição Agricultura e Defesa do Consumidor da Alemanha. Gülzow, Alemanha. 2010.
16. LOBATO, L. C. S. Aproveitamento energético de biogás gerado em reatores UASB tratando esgoto doméstico. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. 2011.
17. OC – Observatório Do Clima / SEEG - Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa. Análise da evolução das emissões de GEE no Brasil (1990-2012). Observatório do Clima, 21p, São Paulo. 2014.
18. PERRY, R.H.; GREEN, D.W. Perry's chemical engineers' handbook. 7 ed. New York: McGraw-Hill. 1997
19. SATHIANATHAN, M. A. Biogas achievements challenges. New Delhi: Association of Voluntary Agencies for Rural Development, 192p. 1975.
20. ZHANG, R.; EL-MASHAD, H.M.; HARTMAN, K.; WANG, F.; LIU, G.; CHOATE, C.; GAMBLE, P. Characterization of food waste as feedstock for anaerobic digestion. Bioresour. Technol. 98, 929–935. 2007
21. ZHANG, C.; SU, H.; BAEYENS, J.; TAN T. Reviewing the anaerobic digestion of food waste for biogas production Renewable and Sustainable Energy Reviews 38; 383–392. 2014.
22. BANKS, C. J.; CHESSHIRE, M.; HEAVEN, S.; ARNOLD, R. Anaerobic digestion of source- segregated domestic food waste: performance assessment by mass and energy balance. Bioresource technology, v. 102, n. 2, p. 612, 2011.
23. RAPOSO, A.; DE LA RUBIA, M. A.; FERNÁNDEZ-CEGRÍ, V.; BORJA, R. Anaerobic digestion of solid organic substrates in batch mode: Na overview relating to methane yields and experimental procedures. In: Renewable and sustainable energy reviews. v.16, p.861-877, 2011.
24. KASTNER, V.; SOMITSCH, W.; SCHNITZHOFFER, W. The anaerobic fermentation of food waste: a comparison of two bioreactor systems. Journal of Cleaner Production n°34, 82-90, 2012.
25. NAGAO, N.; TAJIMA, N.; KAWAI, M.; NIWA, C.; KUROSAWA, N.; MATSUYAMA, T.; YUSOFF, F. M.; TODA, T. Maximum organic loading rate for the single-stage wet anaerobic digestion of food waste. Bioresour Technol, v. 118, p. 210-8, Aug 2012.
26. NASIR, I. M.; GHAZI, T. I. M.; OMAR, R. Production of biogas from solid organic wastes through Anaerobic digestion: A review. Apply Microbiology Biotechnology. v. 95, p. 321-329, 2012.