

III-543 – SISTEMA INTEGRADO PARA TRATAMENTO DE RESÍDUOS E APROVEITAMENTO DOS SUBPRODUTOS LODO E BIOGÁS

Carlos Augusto de Lemos Chernicharo ⁽¹⁾

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

Bernardo Ornelas Ferreira

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.

Augusto de Assis Temponi Cabral Dias

Graduando em Engenharia Ambiental pela UFMG, bolsista de Iniciação Científica pelo Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG.

Catarina Azevedo Borges

Graduanda em Engenharia Ambiental pela UFMG, bolsista de Iniciação Científica pelo Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG.

Endereço ⁽¹⁾: Avenida Presidente Antônio Carlos, 6627 - Pampulha, Belo Horizonte - MG, 31270-901 Brasil
Tel: +55 (31) 3409-1020 - e-mail: calemos@desa.ufmg.br

RESUMO

A pesquisa teve por objetivo desenvolver um sistema integrado para tratamento de resíduos orgânicos e aproveitamento dos subprodutos lodo e biogás, de forma a propiciar o correto gerenciamento desta fração dos resíduos sólidos em pequenos municípios, comunidades isoladas e campi universitários. O sistema de tratamento, denominado plataforma de metanização de resíduos orgânicos (*pMethar*), foi concebido para tratar a totalidade dos resíduos alimentares de um restaurante universitário, sendo constituído de uma sala de recepção, triagem e trituração dos resíduos; um reator de metanização de mistura completa ($V = 18,8 \text{ m}^3$); uma unidade de separação sólido-líquido; e uma unidade de acondicionamento e aproveitamento energético de biogás. Ao longo de 396 dias operacionais, o reator de metanização foi alimentado com os resíduos triturados, com concentração de SV ajustada entre 35 e 55 gSV.L^{-1} , o que resultou na aplicação de cargas orgânicas volumétricas (COV) entre 1,1 e 2,9 $\text{kgSV.m}^{-3}.\text{d}^{-1}$. As concentrações efluentes de SV foram da ordem de 15 gSV.L^{-1} , o que resultou em uma eficiência média de conversão de SV da ordem de 83%. A unidade de separação sólido-líquido possibilitou o tratamento complementar do efluente do reator de metanização, gerando um lodo com valores de pH e concentrações de material orgânico e macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg) relativamente elevados, mas com baixas concentrações de metais pesados, o que potencializa o uso desse subproduto como bio sólido agrícola. Em relação ao subproduto gasoso, nas melhores condições operacionais a *pMethar* foi capaz de gerar até 2 MW.mês^{-1} , a partir do tratamento de cerca de 500 kg de resíduos alimentares por dia. Em suma, a plataforma de metanização garante sua autossuficiência energética e se destaca como uma alternativa eficaz para o tratamento dos resíduos alimentares gerados em campi universitários, com geração adicional de energia descentralizada e produção de bio sólidos para o uso agrícola.

PALAVRAS-CHAVE: Metanização, biogás, energia renovável, sistema de tratamento integrado, resíduos alimentares, resíduos orgânicos.

INTRODUÇÃO

Os usos modernos da biomassa e bioenergia como fontes energéticas renováveis, a saber, metanização, fermentação, combustão, gaseificação, pirólise e outras rotas bioquímicas de conversão de biomassa em energia térmica, elétrica e biocombustível, são fundamentais na mitigação dos efeitos dos gases de efeito estufa (GEE).

A metanização desponta como um importante alternativa de conversão de biomassa residual em bioenergia (biogás). Processos anaeróbios são distinguidos pelo seu potencial em transformar fontes de biomassa com elevada biodegradabilidade - a exemplo dos resíduos orgânicos, resíduo alimentar, dejetos animais, material vegetal, esgoto doméstico e resíduos orgânicos industriais - em biogás, o qual detém potencial de recuperação energética. Ressalta-se ainda que os subprodutos sólido (lodo) e líquido da metanização apresentam potencial de reutilização agrícola, como biossólidos e na fertirrigação de culturas vegetais, mitigando o uso de insumos agrícolas químicos para produção de alimentos.

No entanto, a ocorrência da decomposição anaeróbia da matéria orgânica de forma descontrolada (a exemplo da disposição de resíduos orgânicos em vazadouros a céu aberto e em aterros sanitários desprovidos de sistema de drenagem e coleta de biogás) implica distintos impactos socioambientais. A destacar, a emissão de GEE e odores, provocadas principalmente pelo metano e gás sulfídrico liberados pelo metabolismo dos microrganismos anaeróbios; a contaminação de águas superficiais e subterrâneas, em decorrência do líquido percolado (chorume) de alta carga poluidora; a elevada demanda por área para disposição dos resíduos; os problemas sociais e de saúde pública.

Nesse sentido, a disposição final de resíduos sólidos em aterros sanitários é cada vez mais restrita àquela fração dos resíduos que já foram pré-tratados ou que não tenham potencial de reutilização ou recuperação energética. Em países como a Índia e no âmbito da União Europeia, foram sancionadas legislações que restringem a disposição de materiais orgânicos em aterros sanitários e determinam o tratamento biológico e reaproveitamento energético desses resíduos (Índia, 2000; UE, 2009).

No Brasil, a recuperação energética de resíduos orgânicos ocorre ainda de maneira bastante tímida. Não obstante, planos e políticas nacionais têm incentivado a recuperação e reaproveitamento energéticos dos resíduos orgânicos, a exemplo do Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Brasil, 2010), do projeto Resíduo é Energia (Fundação Estadual do Meio Ambiente) e do PROBIOGÁS, o qual objetiva ampliar o aproveitamento energético do biogás no Brasil (Ministério das Cidades).

No âmbito dos resíduos orgânicos, salienta-se que produção de alimentos, processamento, comercialização, consumo e descarte estão associados a externalidades ambientais ocasionadas pelo consumo energético, uso de recursos naturais e emissões de GEE. Segundo relatório da FAO (2013), cerca de um terço dos alimentos produzidos para consumo humano, aproximadamente 1,3 bilhão de toneladas, são desperdiçados anualmente. Estima-se que a emissão de GEE seja equivalente a 3,3 bilhões de toneladas de dióxido de carbono (se integrado ao ranking nacional de emissões de GEE, o desperdício alimentar ocuparia a terceira posição, precedido pelos EUA e China). De acordo com os preços de produção, calcula-se ainda a perda de 750 bilhões de dólares, o desperdício de 250 quilômetros cúbicos de água e a supressão de 1,4 bilhão de hectares de ecossistemas naturais em função da agropecuária.

Sob este panorama, torna-se necessário (além da redução do desperdício alimentar) o tratamento da fração orgânica residual gerada ao longo do ciclo de vida da cadeia produtiva alimentar. Visto o exposto, a digestão anaeróbia controlada (metanização) denota-se como uma rota viável para transformação de resíduos orgânicos em biogás, dada a baixa demanda energética requerida pelo sistema de tratamento e a eficácia na recuperação energética de metano em energia.

Em virtude do crescente aumento do preço da energia em nível global e da demanda por fontes renováveis, a recuperação da energia proveniente dos resíduos orgânicos surge como alternativa cada vez mais atraente. Esse tipo de recuperação se dá, principalmente, pela queima do biogás, que é um subproduto gerado no tratamento dos resíduos orgânicos em condições anaeróbias. Tendo em vista a enorme geração de resíduos sólidos orgânicos no Brasil, estimado em cerca de 29 mil toneladas por ano, segundo dados da Abrelpe (2013), torna-se muito importante a realização de pesquisas que subsidiem o desenvolvimento de sistemas eficazes, robustos e com simplicidade operacional, aplicados ao tratamento descentralizado de resíduos orgânicos, capazes de atender pequenos municípios, áreas remotas e grandes fontes geradoras de resíduos orgânicos urbanos (centrais de abastecimento, feiras livres, restaurantes, hotéis, etc.).

Este artigo busca apresentar os principais aspectos relacionados ao desenvolvimento e avaliação de um sistema integrado para tratamento dos resíduos orgânicos gerados no principal restaurante do Campus Pampulha da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), com vistas ao aproveitamento dos subprodutos lodo e biogás.

MATERIAL E MÉTODOS

O sistema integrado para tratamento de resíduos orgânicos e aproveitamento dos subprodutos lodo e biogás, ilustrado no fluxograma apresentado na Figura 1, foi implantado no Campus Pampulha da UMFG. O sistema é composto por uma plataforma de metanização de resíduos (*pMethar*), uma plataforma de aproveitamento energético de biogás, além de unidades de tratamento e aproveitamento dos subprodutos sólido (lodo) e líquido do tratamento. Nos itens seguintes são descritas as principais unidades que compõem o sistema.

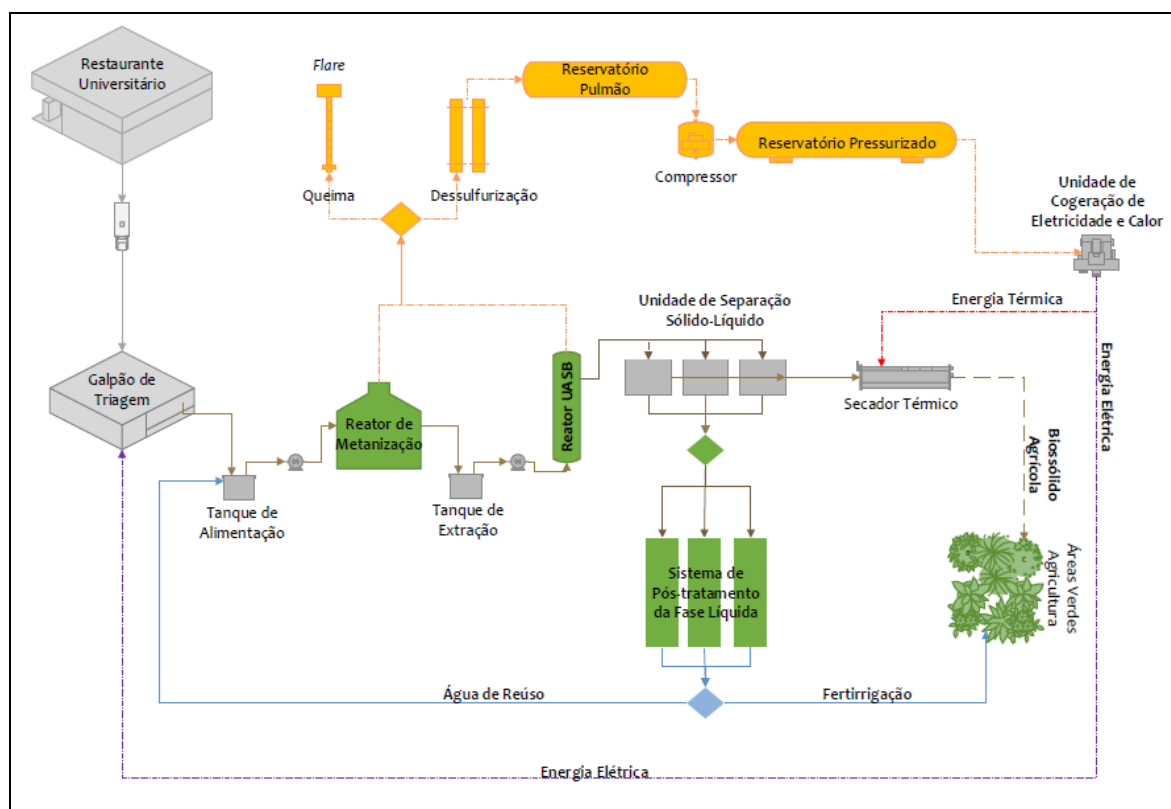


Figura 1: Fluxograma do sistema integrado de tratamento de resíduos orgânicos e de aproveitamento dos subprodutos lodo e biogás

A *pMethar* é dotada de uma unidade pré-tratamento, um tanque de alimentação de substrato, um reator de metanização, um tanque de extração do material digerido, um sistema de desaguamento do lodo digerido, um sistema de condicionamento de biogás, um acumulador de biogás, um sistema de cogeração de eletricidade e calor a partir do biogás e um sistema de secagem térmica de lodo (Figura 2). 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 reuso serão utilizados para fertilrigação de áreas verdes no entorno da planta.

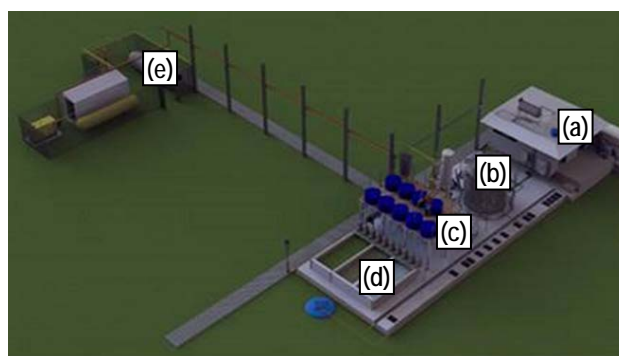


Figura 2: a) Contêiner de triagem/laboratório; b) reator de metanização; c) sistema de separação sólido-líquido; d) sistema de pós-tratamento do percolado; e) plataforma de armazenamento, tratamento e aproveitamento energético do biogás

O substrato utilizado para alimentação do reator de metanização é gerado pelo principal restaurante universitário da universidade. O reator é alimentado de segunda a sexta-feira, que são os dias de funcionamento do restaurante. Nesses dias, após o término das atividades do restaurante, os resíduos orgânicos gerados são acondicionados em contêineres plásticos de 120 L e transportados para o devido tratamento na pMethar.

Após pesagem e triagem manual, o resíduo é umidificado para valores que condizem com a via úmida de tratamento de resíduos orgânicos – teor de sólidos inferior a 15% (Mata-Alvarez *et al.*, 2000) e triturado mecanicamente, de forma a reduzir o tamanho médio das partículas. Após o pré-tratamento e ajuste dos aspectos operacionais, o resíduo é bombeado para o reator de metanização. Os detalhes da operação dessa etapa são ilustrados na Figura 3.

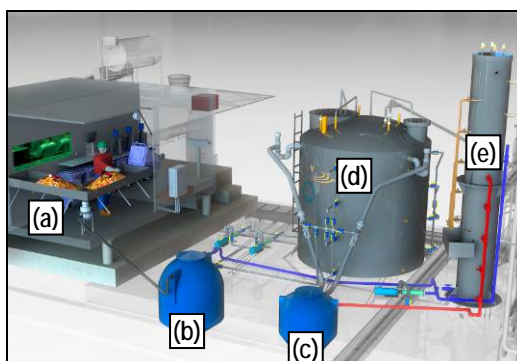


Figura 3: Ilustração do sistema de pré-tratamento e de alimentação do reator de metanização da pMethar:
(a) sala recepção, triagem e trituração dos resíduos alimentares (substrato); (b) tanque de alimentação (afluente ao reator); (c) tanque de extração (efluente do reator); (d) reator de metanização de 1^o estágio;
(e) reator de metanização de 2^o estágio.

O reator de metanização em estudo (Tabela 1 e Figura 4) foi concebido como um digestor de mistura completa, com volume útil de 18,8 m³, operado em um único estágio de digestão anaeróbica, sob a via úmida de tratamento. A mistura do reator é realizada pela mesma bomba de introdução. A manutenção da temperatura no reator é feita por meio de uma serpentina localizada na parte interna do reator, que recircula água proveniente de um sistema de aquecimento solar.

Tabela 1: Principais características do reator de metanização

Parâmetros	Reator de Metanização
Volume útil (m ³)	18,8
Altura útil (m)	2,65
Diâmetro nominal (m)	3,00
Material	PRFV



Figura 4: Reator de metanização de resíduos orgânicos

O reator de metanização foi inoculado com 16 m³ de lodo anaeróbico mesofílico (ST = 4,2%; SV = 2,5%; pH = 7,02) proveniente de um reatores UASB em escala real tratando esgoto doméstico, e 2,5 m³ de rúmen bovino (ST = 2,5%; SV = 1,8%; pH = 6,34) proveniente de um abatedouro da região metropolitana de Belo Horizonte.

O efluente do biodigestor, ainda com elevada concentração de matéria orgânica e sólidos, é direcionado à unidade de separação sólido líquido (Figura 5), constituída por leitos drenantes dotados de uma manta geotêxtil, que tem como função segregar a fração sólida da líquida. A eficiência de desidratação do lodo anaeróbico e a série de sólidos são avaliadas em cada batelada de alimentação do reator. A qualidade do percolado dos leitos drenantes é avaliada por meio de análises de DQO e nitrogênio amoniacal (N-NH₄), com vistas a se definir as possibilidades de pós-tratamento e de reúso do efluente líquido final do sistema.

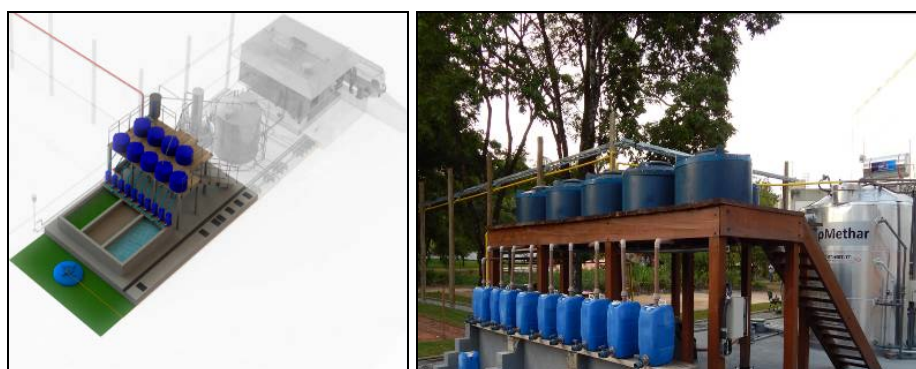


Figura 5: Desenho esquemático e foto da unidade separação sólido-líquido

O biogás produzido no sistema é conduzido à plataforma de tratamento, armazenamento e aproveitamento de biogás (Figura 6). Nessa unidade o biogás passa por uma etapa física para remoção do gás sulfídrico (H₂S). Em sequência, o biogás é encaminhado a um sistema de cogeração de energia elétrica e térmica, que serão utilizadas para atender as demandas internas da plataforma.



Figura 6: Desenho esquemático e foto da Plataforma de armazenamento, tratamento e aproveitamento energético do biogás

Os principais parâmetros de monitoramento do sistema incluem série sólidos (totais (ST), voláteis (SV) e fixos (SF)), demanda química de oxigênio (DQO) e nitrogênio amoniacal (N-NH₄), consoantes com APHA (2012), e pH e temperatura por intermédio do pHmetro Quimis Tec-3MPP. A produção de biogás 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.

Acerca da aptidão agrícola do bio sólido gerado, foram realizadas análises físico-químicos (pH, condutividade, umidade, série de sólidos, nitrogênio, fração orgânica de carbono, sódio, potássio, cálcio, magnésio, cromo, cobre, manganês, ferro, níquel, cádmio, chumbo e zinco) no Laboratório de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Viçosa/MG. As estimativas das cargas finais de cada parâmetro analisado foram tomadas a partir do volume médio de bio sólido remanescente nas unidades de separação sólido-líquido.

Para avaliação do potencial energético da *p*Methar foi considerado o poder calorífico inferior do biogás igual a 9,97 kWh.m⁻³CH₄ e eficiência do conjunto motogerador igual a 30%, geralmente observada em motores de combustão interna comerciais (Sathianathan, 1975; FNR, 2010)

RESULTADOS

Reator de metanização

Um dos objetivos fundamentais da metanização é a conversão dos sólidos voláteis (matéria orgânica) em metano, através das reações bioquímicas do processo de digestão anaeróbia. Os resultados aqui apresentados e discutidos foram obtidos durante 396 dias de operação do sistema integrado, no qual se estudou o comportamento do reator de metanização sob diferentes cargas orgânicas, conforme mostrado na Figura 7. No período, foram aplicadas cargas de SV variando de 20 a 55 kg de resíduo alimentar por dia, que resultaram em cargas orgânicas volumétricas (COV) entre 1,0 e 2,7 kgSV.m⁻³.d⁻¹. Os resultados obtidos mostraram que o reator de metanização apresentou elevada eficiência de remoção de SV, conforme pode-se observar pela Figura 7. Para a concentração de SV mantida no tanque de alimentação, da ordem de 35 a 55 gSV.L⁻¹ (3,5 a 5,5%), foi obtido um efluente com concentrações abaixo de 15 gSV.L⁻¹, o que resultou em uma eficiência média de conversão de SV da ordem de 83%, independentemente da variação da COV que ocorreu no período.

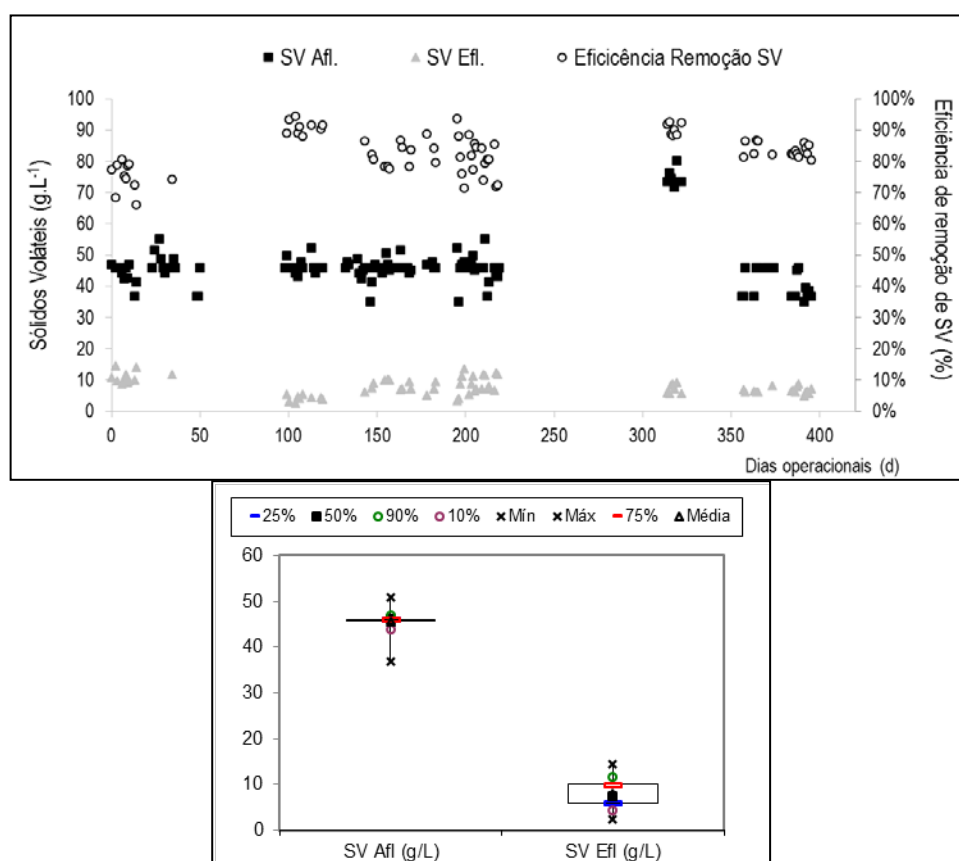


Figura 7: Concentração de sólidos voláteis no afluente e no efluente do reator de metanização; e boxplot das concentrações de SV afluentes e efluentes

É importante salientar que a mistura promovida por bomba de deslocamento positivo apresentou baixa eficiência, resultando numa estratificação dos sólidos suspensos e dissolvidos em meio líquido. Acerca disso, as elevadas eficiências de remoção de SV podem ser atribuídas, também, ao efeito de sedimentação desses sólidos dentro do reator, devido às diferenças de densidade.

Outros parâmetros operacionais, como pH e relação alcalinidade intermediária / alcalinidade parcial (AI/AP), concentração de metano e temperatura se mantiveram dentro das faixas indicativas de estabilidade do processo de digestão anaeróbia. A relação AI/AP só se aproximou de valores considerados críticos (0,30) quando o reator foi operado com COV acima de $2,0 \text{ kgSV.m}^{-3}.\text{d}^{-1}$ e/ou o pH do substrato era inferior a 5,0. Importantes resultados foram obtidos em relação à produtividade de metano, que foi significativamente afetada quando a COV aplicada ao biodigestor superou o valor de $2,0 \text{ kgSV.m}^{-3}.\text{d}^{-1}$. As maiores produtividades de metano foram obtidas para COV de até $1,0 \text{ kgSV.m}^{-3}.\text{d}^{-1}$, com 50% dos resultados entre 234 e $496 \text{ m}^3 \text{ CH}_4$ por tonelada de SV. A concentração de metano no biogás, outro fator importante quando se deseja o aproveitamento energético, variou de 55% a 64%, coerente com os resultados obtidos em outros estudos de biodigestão de resíduos alimentares (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).

Aproveitamento energético do biogás

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. Em vista disso, estimou-se a energia disponível no biogás, a partir dos dados de produção de metano obtidos ao longo do monitoramento operacional de 396 dias. Para a estimativa do potencial de transformação dessa energia em eletricidade, foram adotadas as eficiências típicas observadas em motores de combustão interna adaptados ao biogás (30%). A Figura 3 ilustra a série temporal do potencial energético estimado na plataforma de metanização.

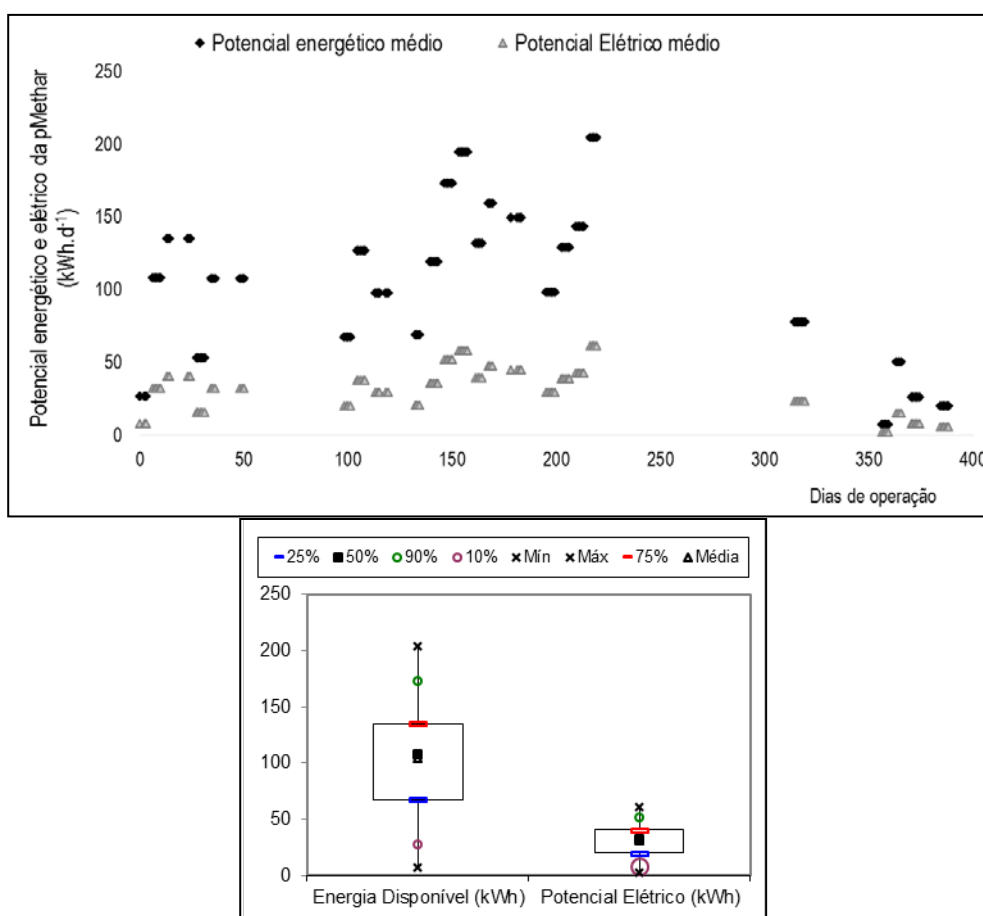


Figura 8: Série temporal e boxplot da estimativa energética da plataforma de metanização

O potencial energético médio observado durante o monitoramento foi de 108 kWh.d^{-1} , dos quais 32 kWh.d^{-1} estariam disponíveis para a transformação em eletricidade. Contudo, entre os dias 99 e 220, fase de melhor desempenho do reator, observou-se maior frequência de dados de potencial energético entre os valores de 99 e

144 kWh.d⁻¹. Em média, a *pMethar* teria potencial para gerar cerca de 37 kWh de energia elétrica diariamente. Essa energia seria o suficiente para suprir a demanda de 7 residências por dia, considerando-se o consumo médio residencial elétrico nacional (158,9 kWh.mês⁻¹ – EPE, 2013).

Visto que o potencial energético é diretamente proporcional à produção de metano, a autossuficiência energética da plataforma é fundamentalmente dependente da estabilidade do processo de digestão anaeróbia. Isso é notável entre os dias 315 e 396, em que houve uma redução sensível do potencial energético da *pMethar*. Acerca disso, as boas práticas operacionais são vitais para incrementar o desempenho do reator, em que as análises ambientais (pH, temperatura, relação entre alcalinidade, concentração de CH₄ e conversão de SV) destacam-se como importantes ferramentas de monitoramento e controle operacional.

O consumo médio de energia pela *pMethar*, estimado pela potência e tempo de funcionamento dos equipamentos, é de 690 kWh por mês. Em média, a plataforma consumiria 62% da energia que produz, sendo o excedente passível de utilização para outros fins, a exemplo de iluminação de vias e demandas elétricas dos edifícios do entorno da planta.

Além da energia elétrica, o calor gerado também pode ser aproveitado no próprio sistema de tratamento. Na *pMethar*, o calor será direcionado a um secador térmico, que tem como objetivo a secagem do lodo desaguado, a fim de gerar bio sólidos para o uso agrícola.

Em virtude da tecnologia de cogeração em desenvolvimento e da equalização da logística de coleta e transporte do resíduo dentro da universidade, há a possibilidade real de incremento do potencial energético da plataforma. A depender das condições ideais de digestão anaeróbia, estima-se que a *pMethar* é capaz de gerar até 2 MW.mês⁻¹, a partir do tratamento de 500 kg de resíduos alimentares por dia. Em suma, a plataforma de metanização garante sua autossuficiência energética e se destaca como uma alternativa promissora para o tratamento dos resíduos alimentares gerados no campus universitário da UFMG.

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 está em fase de testes operacionais *in loco*. Em vista disso, espera-se um incremento sensível da geração de energia pela plataforma.

Sistema de separação sólido-líquido

O uso agrícola de lodos gerados em sistemas de tratamento biológicos depende de processos de redução de patógenos e da atratividade de vetores, sendo vetada a aplicação agrícola de lodos derivados de: estação de tratamento de efluentes de instalações hospitalares; estação de tratamento de efluentes de portos e aeroportos; sistema de tratamento individual, coletados por veículos, antes de seu tratamento por uma estação de tratamento de esgoto; lodo de esgoto não estabilizado; e lodos classificados como perigosos de acordo com as normas brasileiras vigentes (Brasil, 2006). Sob esse panorama, *a priori*, não existem restrições quanto ao uso do bio sólido gerado na metanização de resíduos sólidos orgânicos, notadamente os alimentares.

Resultados preliminares de caracterização do bio sólido produzido no sistema de separação sólido-líquido (não apresentados) indicaram relativamente elevados valores de pH e de concentrações de material orgânico e macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg) e baixas concentrações de metais pesados, potencializando a utilização desse subproduto sólido do tratamento para uso agrícola. Também a relação C/N observada no bio sólido retido no sistema de separação sólido-líquido (7,2) é considerada adequada para o uso agrícola desse material. Em termos de toxicidade por metais pesados, as concentrações observadas não ultrapassaram os padrões de qualidade requeridos para o uso agrícola desse bio sólido, segundo resolução CONAMA nº 375.

Indicadores

Com o propósito de sintetizar os principais indicadores de desempenho da *pMethar*, estruturou-se a Tabela 2. Esses dados foram delineados a partir das médias observadas ao longo do monitoramento operacional da plataforma.

Tabela 2: Principais indicadores de desempenho da *pMethar*

Parâmetro	Valor	Unidade
Taxa de geração de resíduo alimentar	0,164*	kg.pessoa ⁻¹ .d ⁻¹
Taxa de conversão de resíduo alimentar em biogás	89	m ³ biogás.tresíduo ⁻¹
Taxa de conversão de matéria orgânica em metano	444	m ³ CH ₄ .tSV ⁻¹
Taxa de geração de energia elétrica (resíduo alimentar)	158	kWh.tresíduo ⁻¹
Taxa de geração de energia elétrica (SV)	1,32	kWh.kgSV ⁻¹
Taxa de geração de energia elétrica (biogás)	1,78	kWh.m ⁻³ biogás
Taxa de geração de biossólidos	17	kgbiossólido.tresíduo ⁻¹

*Gomes (2014)

Num espectro sistêmico, o reator de metanização tem potencial para gerar energia elétrica para edifícios ou iluminação pública do entorno e/ou produzir gás para utilização no restaurante (cozimento). O efluente líquido digerido pode ser transformado em biossólidos, com potencial para utilização energética (e.g.: gaseificação e pirólise) e/ou para o uso agrícola, promovendo a fertilização de culturas vegetais, que podem suprir parte da demanda por produtos alimentares no restaurante. Essencialmente, os biossólidos poderiam ser utilizados para incrementar a produção de produtos agrícolas a partir do uso de resíduos alimentares, gerados no próprio restaurante universitário, como fonte de energia renovável.

CONCLUSÕES

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. O incremento de carga orgânica deve ser feito a partir da observação do teor de metano no biogás, em que deseja-se concentrações próximas à 60% de CH₄.

A depender das condições ideais de digestão anaeróbia, a *pMethar* é capaz de gerar até 2.000 kWh.mês⁻¹, a partir do tratamento de cerca de 500 kg de resíduos alimentares por dia. Em suma, a plataforma de metanização garante sua autossuficiência energética e se destaca como uma alternativa promissora para o tratamento dos resíduos alimentares gerados no campus universitário da UFMG. 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 promissora de incremento do potencial energético da plataforma.

Com base nos relativamente elevados valores de pH e de concentrações de material orgânico e macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg) e das baixas concentrações de metais pesados, o uso do biossólido produzido na plataforma de metanização deve ser considerado como forma viável de disposição final, valorizando o potencial de uso desse subproduto da digestão anaeróbia.

O sistema integrado para tratamento de resíduos orgânicos e aproveitamento dos subprodutos lodo e biogás vêm se mostrando como uma alternativa bastante promissora para o tratamento descentralizado de resíduos orgânicos, vislumbrando-se sua aplicação potencial em centrais de abastecimento, feiras livres, restaurantes, hotéis e campi universitários.

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.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil. p.116. 2013
2. APHA, W. A. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater Washington, D. C: American Public Health Association: 1496 p. 2012.

3. AYERS, R.S.; WESTCOT, D.W. A qualidade da água na agricultura. Tradução de GHEYI, H. R.; MEDEIROS, J.F.; DAMASCENO, F.A.V. (Estudos FAO. Irrigação e Drenagem, 29). Campina Grande: UFPB, 217p, 1999.
4. 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.
5. BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 375. Define critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, n. 167, p. 141-146, 30 Ago., 2006.
6. BRASIL. Lei 12.305 de 02 de agosto de 2010. Institui a Política nacional de resíduos Sólidos; altera a lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília: Diário Oficial da União. 147: 3 p. 2010.
7. BROWNE, J. D.; MURPHY, J. D. Assessment of the resource associated with biomethane from food waste. *Appl. Energy*, v. 104, p. 170-177, 2013.
8. CHEN, S.; CHEN, B. Net energy production and emissions mitigation of domestic wastewater treatment system: a comparison of different biogas-sludge use alternatives. *Bioresource Technology*, v. 144, p. 296-303. 2013.
9. CHERNICHARO, C. A. L. Reatores Anaeróbios. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental: UFMG, 246 p., 2007.
10. CFSEMG - Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais. Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais. 5ª Aproximação / Antônio Carlos Ribeiro, Paulo Tácito Gontijo Guimarães, Victor Hugo Alvarez V., Editores. 359p. Viçosa, MG, 1999.
11. CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Aplicação de lodos sistemas de tratamento biológico em áreas agrícolas - critérios para projeto e operação: manual técnico. Norma Técnica P4.230. 33p, Agosto, 1999.
12. EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Anuário estatístico de energia elétrica 2013. Ministério de Minas e Energia. Rio de Janeiro. 2013
13. FNR - Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe. Guia Prático do Biogás: Geração e Utilização. Ministério da Nutrição Agricultura e Defesa do Consumidor da Alemanha. Gülzow, Alemanha. 2010.
14. FEIGIN, A.; RAVINA, I.; SHALHEVET, J. Irrigation with treated sewage effluent: management for environmental protection. Berlin: Springer-Verlag, 224p. 1991.
15. FAO - Food and Agriculture Organization. Food wastage footprint: Impacts on natural resources. Organization of the United Nations. p.63. Italia, Roma. 2013.
16. GOMES, J., N., C. Potencial de produção de energia a partir da biometanização de resíduos orgânicos do campus Pampulha da UFMG. Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. 2014
17. INDIA. The Indian Municipal Solid Waste (Management and Handling) Rules INDIA, G. O. Nova Deli. 2000.
18. KASTNER, V.; SOMITSCH, W.; SCHNITZHOFFER, W. The anaerobic fermentation of food waste: a comparison of two bioreactor systems. *Journal of Cleaner Production* nº34, 82-90, 2012.
19. MATA-ALVAREZ, J.; MACÉ, S.; LLABRÉS, P. Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives. *Bioresource Technology*, v. 74, n. 1, p. 3-16. 2000
20. MATOS, A. T.; CARVALHO, A. L.; AZEVEDO, I. C. D. A. Viabilidade do aproveitamento agrícola de percolados de resíduos sólidos urbanos, *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.12, n.4, p.435-440, 2008.
21. 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.
22. 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.
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. SANTOS, A. P. R. Efeito da irrigação com efluente tratado, rico em sódio, em propriedades químicas e físicas de um argissolo vermelho distrófico cultivado com capim-tifton 85. Dissertação (mestrado) Escola Superior de Agricultura Luiz Queiroz. 95p. 2004.

25. SATHIANATHAN, M. A. Biogas achievements challenges. New Delhi: Association of Voluntary Agencies for Rural Development, 192p. 1975.
26. UNIÃO EUROPÉIA. Decreto-Lei n.º 183/2009 de 10 de Agosto. Transpõe para a ordem jurídica interna a Directiva n.º 1999/31/CE, do Conselho, de 26 de Abril, relativa à deposição de resíduos em aterros, alterada pelo Regulamento (CE) n.º 1882/2003, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 29 de Setembro, e aplica a Decisão n.º 2003/33/CE, do Conselho, de 19 de Dezembro de 2002. UE. 2009.
27. 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
28. 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.