



Biotecnologia e Sustentabilidade: Potencial de digestão anaeróbia na redução de resíduos, na produção de energia e de biofertilizantes

Alfiado Victorino ¹
Joao Nildo de Souza Vianna ²
Izabel Cristina Bruno Bacellar Zaneti ³
Maria Tereza Lima Vilarinho ⁴

RESUMO:

Este artigo visa instalar e qualificar uma unidade sustentável: Projeto “Vitrine da Sustentabilidade”, demonstrativa de produção e uso de bioenergia e biofertilizantes. Analisa o desempenho de um reator tubular de PVC de 10 m³ no tratamento de resíduos alimentares do Restaurante da Universidade de Brasília. Analisou-se: taxa de carga orgânica, pH, temperatura, taxa de remoção de sólidos, produção de biogás e sua composição. O reator operou experimentalmente em condições de relativa estabilidade térmica, durante quatro meses em ambiente mesofílico (22-33°C) com taxa orgânica média de 23,9 kgSV/m³ dia. Apresentou uma taxa de produção média de biogás de 13,8 dm³/kgSVdia, taxa de remoção de sólidos totais (96%) e taxa de remoção de sólidos voláteis (18.7%). O biogás apresentou maior concentração de CO₂ e frações de outros gases, sem apresentar concentrações consideráveis de metano. O projeto tem potencial de eficiência e replicabilidade para inovação tecnológica na produção de Biogás e Biofertilizante.

Palavras chave: Biodigestor; Resíduos Alimentares; Biogás; Vitrine da Sustentabilidade.

¹ Mestrado em Educação pela Pontifícia Universidade Católica de São Paulo – PUC/SP. alfiadov@yahoo.com.br

² Doutor pela Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers – ENSAM, PARIS/França. Docente na Universidade de Brasília - UnB, Brasil. vianna@unb.br

³ Doutora em Desenvolvimento Sustentável pela Universidade de Brasília - UnB. Docente na Universidade de Brasília – UnB, Brasil. izabel.zaneti@yahoo.com

⁴ Graduação em andamento em Ciências Ambientais pela Universidade de Brasília – UnB, Brasil. mariatereza.lima@gmail.com

Alfiado Victorino; Joao Nildo de S. Vianna; Izabel C. B. Bacellar Zaneti; Maria Tereza L. Vilarinho

O Restaurante Universitário (RU), da Universidade de Brasília (UnB), localizado no campus Darcy Ribeiro, produz aproximadamente seis mil refeições diárias, gerando em média, cerca de duas toneladas/dia de resíduos, constituídos majoritariamente por matéria orgânica, correspondentes a setecentos e vinte toneladas de resíduos gerados durante 360 dias por ano, aproximadamente.

A composição dos resíduos gerados no RU é diversa. Inclui sobras do café da manhã (pão, café, leite, sucos, etc.) do almoço e jantar (arroz, feijão, verduras, frutas, carnes, etc.); contém ainda sobras do processo de preparo das refeições, de comida não servida e da comida não consumida na mesa, o que torna a sua composição complexa e muito heterogênea.

Os resíduos gerados são posteriormente recolhidos pelos Serviços de Limpeza Urbana (SLU) e depositados no aterro controlado Jockey Club de Brasília (JCB), DF. Situado na direção centro-oeste do Distrito Federal o aterro JCB (também designado “lixão da estrutural”) é um dos maiores da América Latina, e, opera fora das normas de disposição final dos resíduos sólidos (Barbosa et al. 2015).

Apesar de ser qualificado pelo Governo do Distrito Federal (GDF) como um “aterro controlado”, não passa de uma disposição final de forma totalmente inadequada, pois, não possui um sistema de impermeabilização que previna a contaminação do solo e do lençol freático, com o qual deve contar um aterro controlado propriamente dito (*ibidem*).

A deposição dos RSU em aterros sem estrutura para tratamento e/ou valorização contribui consideravelmente para degradação do meio ambiente pela contaminação do solo, das águas superficiais e das águas subterrâneas por meio da percolação, lixiviação e carreamento do lixo. Propicia a proliferação de vetores transmissores de doenças infectocontagiosas colocando em risco a saúde pública (Júnior 2006).

Do ponto de vista econômico abona contra essa prática a ocupação de extensas áreas numa altura em que a disponibilidade de terra nos centros urbanos se mostra insatisfatória (Abu-qudais & Abu-qudais 2000) além das avultadas somas de dinheiro gasto no recolhimento, transporte e disposição desses resíduos.

Por causa dos efeitos adversos da disposição inadequada dos resíduos diretivas normativas têm sido exaradas por diversos organismos nacionais e supranacionais proibindo a sua prática. No Brasil por exemplo, a Política Nacional dos Resíduos Sólidos-PNRS (Brasil 2012) determina dentre outros aspectos, a extinção de todos os lixões no país até 2014.

Alfiado Victorino; Joao Nildo de S. Vianna; Izabel C. B. Bacellar Zaneti; Maria Tereza L. Vilarinho

A digestão anaeróbia dos resíduos é uma tecnologia alternativa sustentável que atende em parte as disposições legais imposta pela PNRS, já que permite mitigar os efeitos adversos da disposição dos resíduos em lixões, pela recuperação da energia potencial contida neles, gerando metano - um gás com potencial para produção de eletricidade, calor e combustível veicular (Carlsson et al. 2012) além de um efluente biofertilizante que pode ser usado para valorização dos solos.

Trata-se de um processo bioquímico que ocorre na ausência de oxigênio molecular livre, no qual um consórcio de microrganismos atua de forma sinérgica e simbiótica (Carrilho 2012, Kothari et al. 2014, Rajendran et al. 2014, Robbins 2012) na conversão da matéria orgânica complexa (carboidratos, proteínas e lípidos) em metano (CH₄), compostos inorgânicos como o dióxido de carbono (CO₂), nitrogênio (N₂), amônia livre (NH₃), gás sulfídrico (H₂S) e traços de outros gases e ácidos orgânicos de baixo peso molecular.

Estudos feitos e projetos concretos em andamento em diversos países do mundo incluindo Brasil, provam que a digestão dos resíduos sólidos em geral e dos resíduos alimentares em particular, permite resolver simultaneamente os problemas de demanda energética, gestão de resíduos e emissões de gases de efeito de estufa (GEE); resolver a contradição prevacente entre meio ambiente e desenvolvimento e, sobretudo, colaborar para a coexistência necessária entre prosperidade econômica e meio ambiente saudável (Carrilho 2012, Kothari et al. 2014, Rajendran et al.2014, Robbins 2012).

Tendo em vista o aproveitamento energético resíduos alimentares, Cho et al. (1995) analisaram o potencial bioquímico de metano (PBM) de diferentes componentes da ementa coreana (carne, arroz cozido, couve fresca, etc.) incluindo uma mistura de todos eles, com teor de sólidos totais variando entre 15 a 30%. Tratados em reatores de diferentes volumes (1 a 8 L), os resíduos de cozinha misturados, renderam taxas de produção na ordem de 472 ml CH₄/gSV e uma taxa de biodegradabilidade de 86%.

Para reduzir a acumulação de ácidos gordos voláteis (AGV) observados nos testes, os autores sugeriram o uso de um sistema aneróbio de duas fases para controlar a acidificação dos resíduos alimentares misturados.

Bouallagui et al. (2003) testaram a digestão anaeróbia de sobras de frutas e vegetais num biodigestor tubular mesofílico (35±1) °C operando em regime semi-contínuo.

Os autores relataram que o aspecto relevante do reator tubular está relacionado com a sua habilidade em separar longitudinalmente, de cima para baixo, as fases acetogênicas e metanogênica, permitindo que este atue como um sistema anaeróbio de duas fases. E que, em um reator tubular os

Alfiado Victorino; Joao Nildo de S. Vianna; Izabel C. B. Bacellar Zaneti; Maria Tereza L. Vilarinho
resíduos de frutas e vegetais podem ser tratados anaerobicamente com altos níveis de estabilidade e depuração associados a altas taxas de recuperação energética.

Num outro trabalho, Bouallagui et al. (2005) analisaram o potencial da digestão anaeróbia de resíduos de frutas e vegetais na recuperação de materiais e produção de energia, usando resíduos com teor de sólidos totais entre 8-18% e sólidos voláteis entre 86-92%.

Estudando o processo em diferentes condições operacionais e usando diferentes tipos de reatores, com taxas de carga orgânica variando entre 1 a 6,8 g SV/Ldia, obtiveram taxas de conversão da matéria orgânica em metano na ordem de 70-95%. Segundo os autores, uma das principais limitações da metanização dos restos de frutas e vegetais é a rápida acidificação, redução do pH no reator e uma maior produção de ácidos gordos voláteis (AGV) que inibem a atividade dos microrganismos metanogênicos e prejudicam todo o processo de biodigestão em curso.

Como solução, Bouallagui et al.(2005) sugerem mais uma vez que o sistema contínuo de digestão em duas fases é a tecnologia mais adequada para digestão anaeróbia das sobras de frutas e vegetais. A maior vantagem identificada reside no tamponamento da carga orgânica que ocorre na primeira fase (hidrólise), permitindo uma taxa de alimentação mais constante na fase metanogênica seguinte.

Analisando um sistema de duas fases, envolvendo um reator de liquefação termofílico e um filtro anaeróbico mesofílico, os autores notaram que mais de 95% de sólidos voláteis foram convertidos em metano, a uma taxa de carga orgânica de 5,65 gSV/L dia, com um rendimento médio da produção de metano de 420 L/kgSV aproximadamente.

Restos alimentares recolhidos na Cidade de San Francisco, Califórnia, também foram analisados por Zhang et al. (2007), tendo em vista o seu potencial para uso como matéria-prima nos processos de biodigestão anaeróbia, usando reatores descontínuos com capacidade de 1L, cargas iniciais de 6,8 e 10,5 gSV/L operando em condições termofílicas (50 ± 2)°C.

O teor médio diário de umidade e proporção de sólidos voláteis para sólidos totais (SV/ST) determinados durante uma semana de ensaios foram 70% e 83%, respectivamente, enquanto que o teor de umidade médio semanal e a proporção SV/ST foram 74% e 87%, respectivamente. Análises de teor de nutrientes mostraram que os resíduos alimentares continham nutrientes equilibrados para microrganismos anaeróbios.

Em termos de produção os resultados obtidos indicam taxas de produção na ordem de 384 e 435 mL/gSV durante 10 e 28 dias de operação respectivamente e, para os autores, esses resultados

Alfiado Victorino; Joao Nildo de S. Vianna; Izabel C. B. Bacellar Zaneti; Maria Tereza L. Vilarinho provam que os resíduos de cozinha (resíduos alimentares) constituem um substrato altamente qualificado e desejável para digestores anaeróbios com relação à sua alta biodegradabilidade e produção de metano.

Kuo & Lai (2010) apresentaram uma proposta inovadora, um biodigestor anaeróbio termofílico móvel (55°C) de duas etapas, para tratamento de resíduos alimentares com uma capacidade inicial de 100 kg/dia diluídos em 100kg de água (proporção resíduo/água=1) assumindo um teor de sólidos totais de 15%.

Testando o reator com uma taxa de carga orgânica acima de 160 kg/dia, com tempos de detenção hidráulica de 5,6 e 25 dias para hidrólise e acidogênese respectivamente, os autores acima citados, reportaram taxas de remoção de demanda química de oxigênio (DQO), sólidos totais suspensos e sólidos voláteis suspensos de 72,5; 77,8 e 82,4% respectivamente. A taxa de produção específica de gás obtida foi de 0,777 m³/m³dia.

O desempenho da digestão anaeróbia de um *mix* entre os resíduos de cozinha e de frutas e vegetais foi investigado por Wang et al. (2014) usando biodigestores em escala laboratorial e piloto, operando em batelada, estágio único e dois estágios em fase experimental.

Segundo os autores, reator experimental em escala laboratorial é altamente recomendável, pois, durante a operação, o mesmo, apresentou alta taxa de produção de metano (0,725L/gSV) para uma proporção de resíduos de frutos e vegetais para resíduos de cozinha de 5:8. Do ponto de vista econômico os autores afirmaram que o sistema em escala piloto é rentável, com um lucro líquido de 10,173 USD/ton., para taxas de carga orgânicas superiores a 3.0 gSV/Ldia.

De Clercq et al. (2016) analisando o potencial da digestão anaeróbia no tratamento de resíduos alimentares e os desafios associados, concluíram que a produção da cidade Chinesa de Beijing em 2015 estimada em 956.300 t de resíduos alimentares poderia produzir 300 milhões Nm³ de CH₄, correspondente a uma taxa de 313,7 Nm³/t, aproximadamente.

Para esses autores os maiores gargalos que se colocam no aproveitamento dessa tecnologia em particular nos países em desenvolvimento são a baixa produção de biogás, dificuldades no monitoramento e controle dos processos, utilização ineficiente do biogás e a ociosidade.

Esse breve levantamento da literatura mostra que a digestão anaeróbia dos resíduos alimentares para fins energéticos, é uma tecnologia promissora.

Alfiado Victorino; Joao Nildo de S. Vianna; Izabel C. B. Bacellar Zaneti; Maria Tereza L. Vilarinho

No entanto, a sua aplicação é também acompanhada por sérios desafios cuja superação passa por estudos detalhados dos procedimentos mais adequados para o prétratamento dos resíduos, condicionamento do substrato, arranque e monitoria dos reatores, dentre outros aspectos decisivos, para maximizar o desempenho do processo e tirar maior vantagem possível dessa tecnologia.

A finalidade do artigo é fazer uma análise diagnóstica e, tem como objetivo, avaliar o desempenho de um biodigestor tubular de PVC no tratamento dos resíduos alimentares do RU por meio da análise das taxas de carga orgânica, taxa de remoção de sólidos (voláteis e totais), taxa de produção de biogás, bem como o nível de biodegradação da matéria orgânica, para enfim, estruturar um projeto de aproveitamento energético dos materiais gerados naquela instituição.

O pressuposto básico do artigo é de que, com a digestão anaeróbia dos resíduos gerados, o RU poderia simultaneamente, reduzir o volume de resíduos depositados no aterro (proteção ambiental) e gerar energia para consumo local, reduzindo a sua fatura de energia (eficiência econômica). Nesse sentido, pretende-se que os resultados do artigo sirvam de base para alavancar um projeto de biodigestão anaeróbia dos resíduos alimentares num horizonte de médio e longo prazos no RU.

1. MATERIAIS E MÉTODOS

1.1. CARGA E ARRANQUE DO BIODIGESTOR

O trabalho experimental decorre no recinto do edifício Maquetes e protótipos do Instituto de Artes da UnB, no qual foi instalada uma usina de biodigestão que compreende um biodigestor tubular de PVC de 10 m³ enterrado numa vala de (3,7x2,0x1,0) m. A usina integra também uma horta experimental de (7,0x4,4x2,0) m para ensaios do biofertilizante.

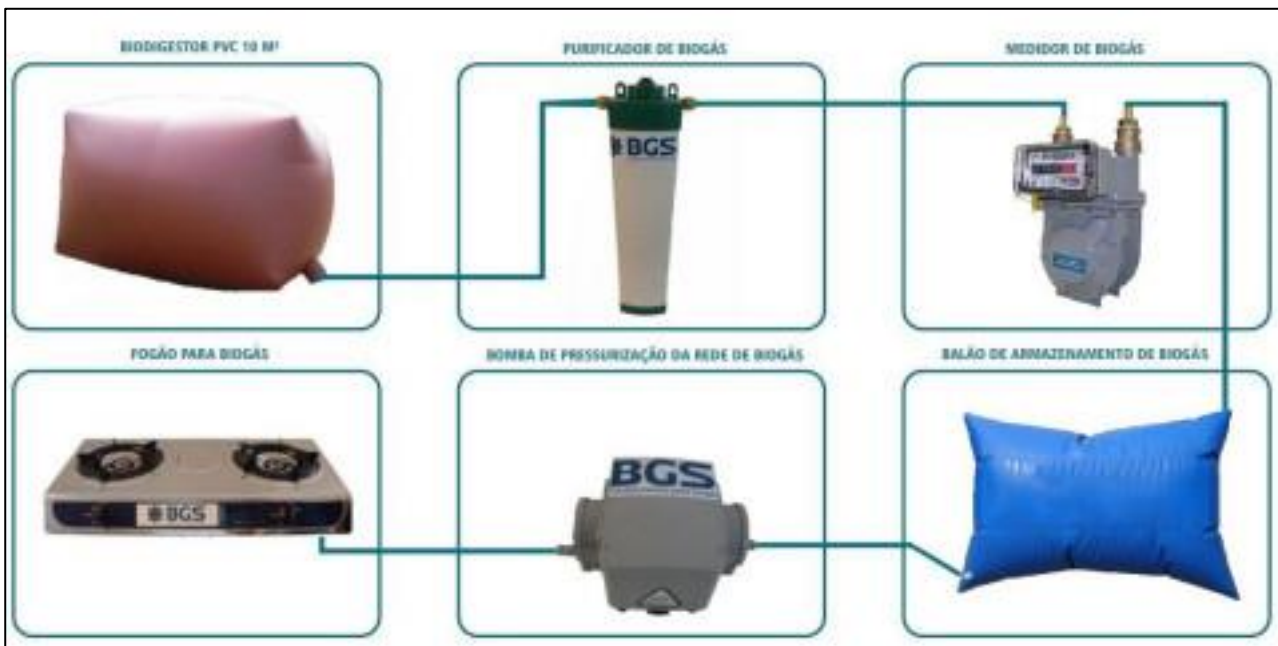
Parte dos resíduos alimentares gerados no RU foram recolhidos e transportados para a usina que dista cerca de 750 metros e sujeitos a um processo de prétratamento que incluiu a separação da fração não orgânica, trituração e diluição na proporção (resíduo/água) de 2:1 e pesagem (balança: UR 10000 Light; máx.: 300 kg; min: 1 kg; e=50 g).

A operação de carga do biodigestor durou dezessete dias (23/11 a 15/12/2015) e durante esse período foram colocados no biodigestor 3.176,3 kg de resíduos alimentares e 1.605,1 kg de água totalizando 4.781,5 kg. Nesse período e tomando em consideração a massa de água diluída, o biodigestor foi alimentado de forma contínua com uma taxa de carga orgânica média de 23,9 K g SV/m³dia.

Alfiado Victorino; Joao Nildo de S. Vianna; Izabel C. B. Bacellar Zaneti; Maria Tereza L. Vilarinho

Terminado o processo de carga foi instalado um termopar no interior do biodigestor para medição de temperatura; foram conectados a tubulação de transporte do biogás, o medidor de vazão, o pressurizador e o balão de armazenamento. A figura 01 ilustra parte dos componentes da usina em análise.

Figura 01. Parte dos Componentes da Usina.



Fonte: BGS 2014.

Terminadas as ligações foram fechados os canais de entrada de resíduos e saída do efluente, e deu-se a partida do processo de fermentação em batelada sob condições mesofílicas com temperatura média de 26,1°C. O processo foi monitorado diretamente por observação do aspecto físico do biodigestor e indiretamente por medição da temperatura, teor de sólidos, e produção de biogás.

1.2. ANÁLISES QUÍMICAS

Depois da trituração e antes da diluição, foram retiradas amostras e enviadas para o laboratório de Saneamento Ambiental (LSA) do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Faculdade de Tecnologia da UnB para determinar o teor de umidade, sólidos totais (ST), voláteis (SV), ácidos voláteis e pH, segundo a metodologia proposta pela APHA (1999) em uso naquele laboratório. As análises no LSA obedeceram ao seguinte procedimento:

1.2.1. DETERMINAÇÃO DO PH

Separar 50g da amostra preparada e conservada.

Inserir a amostra em 1000 ml de água deionizada isenta de CO₂ a temperatura ambiente.

Alfiado Victorino; Joao Nildo de S. Vianna; Izabel C. B. Bacellar Zaneti; Maria Tereza L. Vilarinho

Manter a amostra sólida em contato com o líquido por alguns minutos sob agitação constante afim de proporcionar melhor contato entre as fases ao mesmo tempo em que se realiza a homogeneização do extrato.

Separar a fração sólida por filtração convencional, empregando papel de filtro qualitativo em funil de vidro e recolher o líquido em um béquer limpo e seco.

Proceder a leitura do pH introduzindo o pHmetro no líquido filtrado.

1.2.2. TEOR DE UMIDADE E SÓLIDOS TOTAIS

Levar o cadinho, cápsula de porcelana ou a bandeja de alumínio para calcinar a 800 °C.

Pesar a bandeja de alumínio, cápsula de porcelana ou o cadinho anotando os pesos iniciais (tara).

Separar (100±2) g do resíduo previamente preparado e dispor na bandeja ou no cadinho.

Pesar a bandeja ou cadinho com a amostra do resíduo.

Levar para a estufa a temperatura de (105 ± 5) °C pelo período de 24 horas.

Retirar da estufa e deixar esfriar em um dessecador.

Proceder a leitura do peso (g).

$$H = \left(\frac{m_h - m_s}{m_h} \right) \times 100\% \quad (01)$$

Onde: H : Teor de umidade (%); m_h : Massa inicial da amostra úmida (g); m_s : Massa da amostra seca (g).

O teor de sólidos totais é calculado a partir do teor de umidade:

$$ST = 100 - H(\%) \quad (02)$$

O teor de sólidos totais (ST) indica a proporção da massa sólida do substrato (biomassa) que sobra após a evaporação da parte líquida da amostra aquecida entre 100° a 105° C.

Depois da diluição a relação entre o teor de sólidos totais e a massa do substrato na base úmida é dada pela relação (Pinto 2000):

$$m_r(bs) = m_{ST} = m_r(bu) \times ST \quad (03)$$

Alfiado Victorino; Joao Nildo de S. Vianna; Izabel C. B. Bacellar Zaneti; Maria Tereza L. Vilarinho

Onde: $m_r(bs)$: Massa de resíduos na base seca (kg ST); m_{ST} : Massa de sólidos totais (kg ST); $m_r(bu)$: Massa de resíduos na base úmida (kg); ST : Teor de sólidos totais (%)

1.2.3. SÓLIDOS VOLÁTEIS

Após pesagem da amostra seca para a obtenção do teor de umidade, levar o cadinho ou cápsula de porcelana para a mufla.

Introduzir o cadinho na mufla e proceder o aquecimento gradual da amostra na mufla até atingir a temperatura de trabalho (550°C) com incrementos de 50° C a cada 30 minutos. Tal procedimento é importante para evitar que a amostra se inflame no interior da mufla e perca a matéria sólida na forma de fuligem.

Após atingir a temperatura de trabalho, calcinar a amostra pelo período de 2 a 3 horas.

Desligar a mufla, aguardar resfriar.

Retirar a amostra ainda morna e levá-la ao dessecador até atingir a temperatura ambiente.

Pesar a amostra calcinada.

O teor dos sólidos voláteis (SV) é calculado pela relação (Abu-Qudais & Abu-Qudais 2000):

$$SV = \left(\frac{m_s - m_c}{m_s} \right) \times 100\% \quad (04)$$

Onde: m_s : Massa da amostra seca (g); m_c : Massa da amostra calcinada ou cinzas (g);

Os sólidos voláteis (SV) representam a parcela dos sólidos totais volatilizada no processo de calcinação. Do ponto de vista termodinâmico os SV estão relacionados com a biodegradabilidade da matéria orgânica no substrato; representam a parte da matéria orgânica convertida em biogás durante o processo de biometanização (Alvarez et al. 1990).

O quociente entre a massa de sólidos voláteis e totais (f_{vr}) é um indicador do teor de matéria orgânica no substrato (Li et al 2015).

$$f_{vr} = \frac{m_{SV}}{m_{ST}} \quad (05)$$

Durante o processo de digestão, sólidos voláteis são em certa medida degradados e convertidos em biogás (Carlsson et al. 2012) e, o grau de remoção de substrato é medido pela eficiência de remoção sólidos totais ou voláteis expressa pelas equações (Gao et al. 2015):

Alfiado Victorino; Joao Nildo de S. Vianna; Izabel C. B. Bacellar Zaneti; Maria Tereza L. Vilarinho

$$ST_{re} = \frac{ST_0 - ST_f}{ST_0} \times 100\% \quad (06)$$

$$SV_{re} = \frac{SV_0 - SV_f}{SV_0} \times 100\% \quad (07)$$

Onde:

ST_{re} e SV_{re} : Taxa de sólidos totais e voláteis removidos. Os índices representam o teor de sólidos totais/voláteis no início (entrada) e no fim do processo (saída).

1.2.4. TEMPERATURA

Para medir a temperatura do substrato foi instalado um par de termopar no interior do biodigestor e, regularmente foi sendo controlado e avaliado o estado térmico do substrato em fermentação.

1.2.5. PRODUÇÃO DE BIOGÁS

A quantidade de biogás gerado foi avaliada por intermédio do medidor de vazão instalado no sistema. A taxa de produção de biogás foi avaliada pelo volume produzido em função da massa de sólidos voláteis digeridos e calculada pela relação entre o volume de biogás gerado e volume do biodigestor:

$$P_{Biogás} = \frac{V_{biogás}}{m_{SV}} \quad (08)$$

Onde: $P_{Biogás}$: Taxa de produção de biogás; Teor de sólidos voláteis (kgSV).

2. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

2.1. CARACTERÍSTICAS DO SUBSTRATO

A tabela 1 apresenta os valores médios relativos a umidade (H), teor de sólidos totais (ST), voláteis (SV), taxa de carga orgânica (TCO), demanda química de oxigênio (DQO), pH e composição elementar dos resíduos alimentares usados no arranque do processo de digestão anaeróbia.

Tabela 01. Algumas Características do Substrato.

H (%)	SV (%)	ST (%)	f_{VT} (%)	TCO (KgSV/m ³ d)	pH
78,5	85,2	13,9	85	23,9	5,3

Fonte: Elaborada pelos autores.

Alfiado Victorino; Joao Nildo de S. Vianna; Izabel C. B. Bacellar Zaneti; Maria Tereza L. Vilarinho

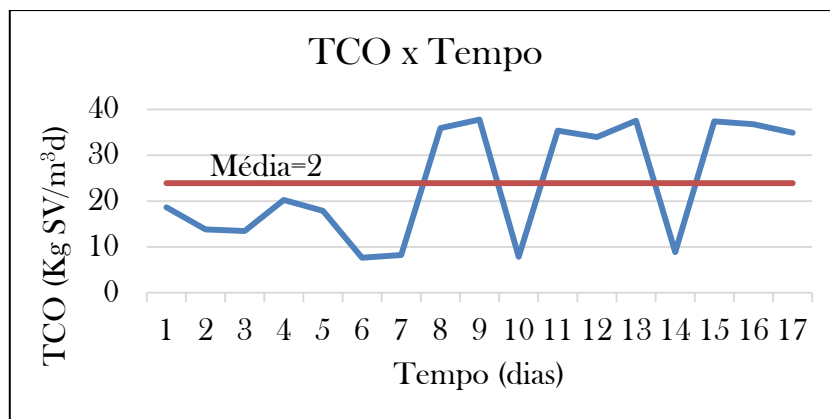
O teor de umidade dos resíduos alimentares analisados variou entre 63,4 e 90,1% com uma média de 78,5%. O teor de sólidos totais variou entre 9,9 e 36,6% fixando a média em 21,5%. Após a diluição o teor de sólidos totais diminuiu, passando para 13,9 % (teor de sólidos totais com umidade corrigida), concentração adequada para digestão anaeróbia úmida (Ge et al. 2014, Kothari et al. 2014, Li et al.2015).

Os sólidos voláteis apresentaram uma margem de variação menor em relação aos sólidos totais (entre 85,4 e 85,7%) com uma média de 85,2%. A taxa SV/ST indicativa do teor de matéria orgânica foi relativamente alta (85%), sugerindo que a maioria dos sólidos contidos são orgânicos ou biodegradáveis (Kuo & Lai 2010), ou que o substrato é adequado para a fermentação anaeróbia (Lindner et al. 2015).

O valor do pH dos resíduos alimentares afluentes variou entre 3,7 e 6,1 fixando a média em torno de 5,3, sinalizando um teor de acidez considerável. Nesta etapa, nenhuma ação concreta foi realizada para aumentar o valor do pH; optamos por manter essa condição para avaliar em que medida a ação sinérgica do sistema em si, seria capaz de elevar o valor de pH para níveis ótimos e, restaurar desse modo a neutralidade do sistema (Cesaro & Belgiorno 2014; igoni et al. 2008).

2.2. TAXA DE CARGA ORGÂNICA

Figura 02. Comportamento da Taxa de Carga Orgânica no Tempo.



Fonte: Elaborada pelos autores.

A figura 2 representa a taxa de carga orgânica durante o período de alimentação do reator. Com uma média de 23,9 Kg SV/m³, o gráfico mostra que durante a operação de carga a quantidade de resíduos colocados por dia variou significativamente.

De acordo com autores analisados, grandes variações na taxa de carga (Igoni et al 2008), bem como largos intervalos na carga (Botero & Preston 1987) podem afetar o equilíbrio entre a fase

Alfiado Victorino; Joao Nildo de S. Vianna; Izabel C. B. Bacellar Zaneti; Maria Tereza L. Vilarinho

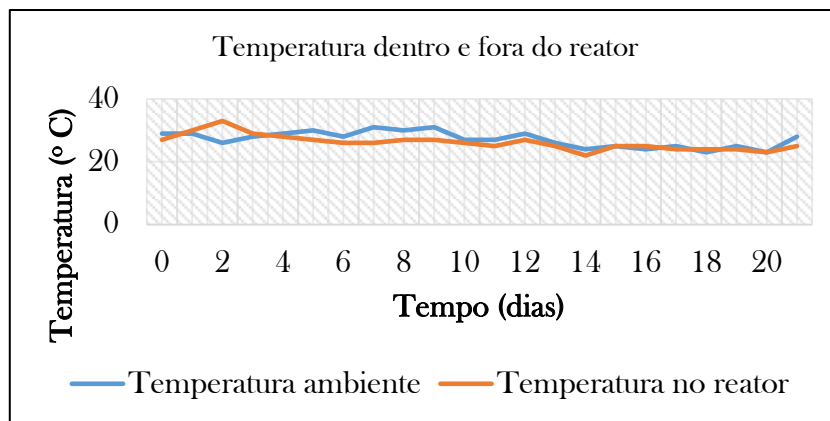
acidogênicas e metanogênica favorecendo o aumento dos AGV e a concentração do hidrogênio no reator. Esses fatores podem ocasionar a queda do pH do sistema afetando negativamente a qualidade e a quantidade do gás produzido.

A inexperiência da equipe de trabalho, problemas relacionados com o manejo e transporte de resíduos particularmente na fase inicial do trabalho, a baixa capacidade do triturador, bem como a dificuldade em escalar uma equipe de trabalho nos finais de semana, são alguns fatores por detrás da variação excessiva da TCO.

2.3. VARIAÇÃO DA TEMPERATURA

A medição da temperatura dentro e fora do biodigestor foi realizada por meio de um termopar tipo k (-200° C - 1200° C; sensibilidade: 41 μ V/°C). O processo de controle começou duas semanas após de alimentação (04/12/2016) e terminou três semanas depois, no dia 23/01/2016. O gráfico a seguir apresenta o comportamento da temperatura dentro e fora do biodigestor.

Figura 03. Comportamento da Temperatura Dentro e Fora do Biodigestor.



Fonte: Elaborada pelos autores.

Durante o período em análise a temperatura no interior do biodigestor variou entre 22 e 33 °C, sem, no entanto, atingir os níveis ótimos desejados para digestão mesofílica (35-40) ° C, tendo a temperatura média ficado em torno de 26° C.

Na maior parte do tempo a temperatura interna do biodigestor esteve ligeiramente abaixo da temperatura externa (meio ambiente), sendo que a média de variação entre as duas fixou-se em torno de 1° C.

Dewil et al. 2008 e Turovskiy & Mathai 2006, destacam a importância da manutenção da estabilidade térmica no digestor, uma vez que grandes oscilações na temperatura afetam os microrganismos especialmente as arqueas metanogênicas e, sublinham que em alguns processos podem

Alfiado Victorino; Joao Nildo de S. Vianna; Izabel C. B. Bacellar Zaneti; Maria Tereza L. Vilarinho

ocorrer falhas com mudanças de temperatura superiores a 1°C/dia, devendo alterações de temperatura superiores a 0,6° C/dia serem evitadas.

Posto isso pode-se afirmar que o biodigestor operou em condições de relativa estabilidade térmica. O fato de o substrato não ter sido submetido a algum processo de prétratamento térmico, aliado à falta de cobertura do reator, num período propenso a chuvas em Brasília, são alguns fatores que podem ter impedido que o sistema alcançasse os níveis ótimos da temperatura mesofílica.

2.4. GRAU DE BIODEGRAÇÃO DOS RESÍDUOS E DE REMOÇÃO DE SÓLIDOS

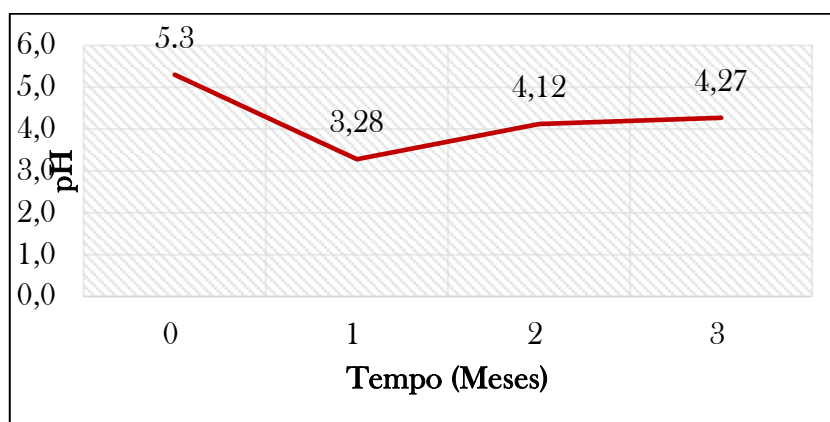
A eficiência do processo de biodigestão foi avaliada através da taxa de remoção de sólidos (totais e voláteis). Durante o processo de biodigestão, os sólidos voláteis no substrato baixaram de 607,2 para 493,4 kg equivalente a uma taxa de remoção de 18,7 %, enquanto que os sólidos totais variaram de 712,7 para 28,7 kg com uma taxa de remoção de 96%.

Trabalhos anteriores citados por (Silva et al. 2015) obtiveram taxas de remoção recomendáveis de ST e SV nas faixas de 88 a 92% e 96 a 78% respectivamente. Comparando, concluímos que a taxa de remoção de sólidos totais obtida neste trabalho (96%) se situa dentro da faixa recomendada, enquanto que a dos SV (18,7%) ficou muito abaixo da faixa recomendada naquele trabalho.

Esses resultados sugerem que o processo de biodigestão dos resíduos em análise foi ineficiente em termos de remoção da matéria orgânica contida no substrato. Isto é, o biodigestor foi ineficiente na conversão da matéria orgânica em biogás; e, esse fato pode ter influenciado negativamente na qualidade e a quantidade do biogás gerado.

2.5. POTENCIAL HIDROGEÔNICO (PH)

Figura 04. Comportamento do pH em função do tempo.



Fonte: Elaborada pelos autores.

Alfiado Victorino; Joao Nildo de S. Vianna; Izabel C. B. Bacellar Zaneti; Maria Tereza L. Vilarinho

A figura 4 apresenta o comportamento do pH durante o ensaio. Inicialmente os resíduos apresentaram um teor de acidez considerável. No decurso do processo de biodigestão, o teor de acidez continuou aumentando até 3,28 e só depois disso é que começou a dar sinais de recuperação. No último teste realizado o pH estava em 4,27.

O comportamento desse parâmetro mostra considerável acidificação no início seguido por uma relativa recuperação, sugerindo que ação sinérgica do sistema tende a trazer o valor de pH para os níveis de neutralidade.

2.6. TAXA DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS

Logo após o fechamento do sistema e arranque da digestão em batelada, o reator enfrentou sérios problemas de fuga de biogás que foram sendo sanados com o decorrer do tempo. A ocorrência de vazamentos em diferentes pontos de ligação do sistema (ver figura 5) atrasou de alguma forma o início do processo de geração de biogás.

Figura 05. Um dos Pontos de Fuga de Biogás Identificados no Biodigestor.



Fonte: Elaborada pelos autores.

Passados quarenta e três dias o biodigestor apresentou pela primeira vez um nível de estabilidade que permitiu que se iniciasse o processo de medição de vazão conforme ilustra a figura 6.

A quantidade de biogás gerado no biodigestor começou a ser medida no 43º dia (06/Janeiro/2016) depois da partida, quando o reator apresentou um aspecto físico de aparente estabilidade e veio a ser interrompido nos meados de março/2016. A figura 7 apresenta a taxa de produção de biogás controlada durante dois meses. O gráfico mostra que durante cinco semanas o medidor de vazão não registrou nenhuma produção. Nas semanas em que foi registrada alguma

Alfiado Victorino; Joao Nildo de S. Vianna; Izabel C. B. Bacellar Zaneti; Maria Tereza L. Vilarinho
produção, essa variou de centésimos até décimos do decímetro cúbico (litro), com uma produção acumulada de $0,98 \text{ dm}^3/\text{KgSV}$)

Figura 06. Estado Físico do Biodigestor no dia 06/01/2016.

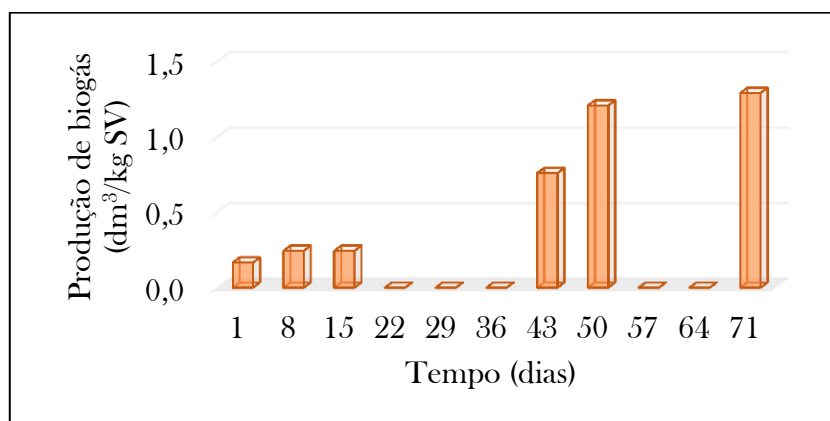


No fundo vê-se a estrutura da horta para ensaios do biofertilizante.

Fonte: Elaborada pelos autores.

A produção acumulada apurada, representa uma taxa de produção de $13,8 \text{ mL}/\text{kgSVdia}$, muito abaixo dos valores reportados na literatura consultada. Os baixos valores obtidos neste ensaio podem estar associados a vários fatores técnicos e operacionais de entre os quais podemos destacar a baixa conversão da matéria orgânica e as recorrentes fugas de biogás registradas durante a operação do reator mencionadas na seção anterior.

Figura 07. Taxa de Produção de Biogás.

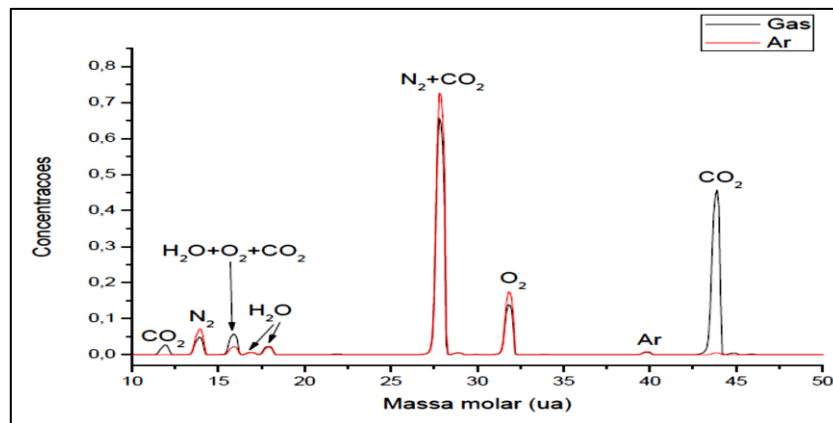


Fonte: Elaborada pelos autores.

2.7. ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO BIOGÁS

Para análise da composição química do biogás, foi retirada uma amostra e enviada para o laboratório de fotobiorreatores do Instituto de Física da UnB. As análises foram feitas pelo método de espectrometria de massa (Analisador de Gás de Alta Pressão) usando um espectrômetro de marca UGA-300. A figura 8 apresenta a composição química da amostra do biogás gerado no reator em análise neste trabalho.

Figura 08. Composição Química do Biogás.



Fonte: Laboratório de Fotobiorreatores, UnB.

As análises indicam que a amostra contém maior concentração de CO₂ (87 vezes do que no ar atmosférico) e pequenas frações N₂ e O₂ e, não detectaram alguma concentração considerável de CH₄.

Em última análise os resultados obtidos mostram que o processo de biodigestão dos resíduos alimentares não foi de todo eficiente, devido à combinação de vários fatores logísticos, técnicos e operacionais. O quadro 1 apresenta alguns desses fatores, apresenta também as causas, bem como as medidas corretivas a serem adotadas no futuro para o melhoramento do desempenho do sistema.

Quadro 01. Fatores, causas e medidas corretivas.

Fatores concorrentes	Causas	Correção
Varição excessiva da TCO	Inexperiência da equipe de trabalho	Breve capacitação da equipe Redimensionamento dos recursos humanos e materiais
Teor de acidez dos resíduos	Natureza dos resíduos alimentares	Uso de tamponante / Inoculação
Temperatura a baixo do nível ótimo	Condições atmosféricas e operacionais	Cobertura do reator / Pré-tratamento térmico
Baixa produção de biogás	Fugas de biogás	Eliminar pontos de fuga/Reduzir pontos de ligação

Fonte: Elaborada pelos autores.

CONCLUSÕES

De acordo com os objetivos e metodologia adotados, o estudo mostra que o biodigestor operou em condições de relativa estabilidade térmica, porém, com alta variação na taxa de carga orgânica. Apresentou baixa eficiência na conversão da matéria orgânica em biogás, com taxa de produção de biogás de cerca de 13,8 mL/Kg SV dia.

O biogás gerado apresentou elevada concentração de CO₂ e pequenas concentrações de outros gases como O₂ e N₂. Análises da composição do biogás não detectaram concentrações consideráveis de metano.

O projeto demonstrou ser um potencial instrumento de políticas públicas para promoção de energias renováveis pela sua eficiência e replicabilidade para inovação tecnológica na produção de biogás.

RECOMENDAÇÕES

Para assegurar maior desempenho do processo e, tendo em conta as conclusões acima formuladas, para a próxima etapa, recomenda-se:

- a) Redimensionamento da equipe do trabalho e das condições logísticas de modo a garantir mínima variação possível da carga orgânica a colocar no reator por dia.
- b) Criar todas condições necessárias para garantir mínimas variações possíveis da temperatura interna do reator.
- c) Inocular e tamponar o substrato e manter um controle de todos parâmetros relevantes no processo anaeróbio.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Direção do Restaurante Universitário da Universidade de Brasília na pessoa da Dr^a Ygrene, aos trabalhadores da SANOLI que atuam no setor de coleta e descarte dos resíduos.

Aos nossos colegas do projeto “Vitrine da Sustentabilidade”.

A Direção do Departamento de Engenharia Ambiental na pessoa da Professora Ariuska e aos funcionários do laboratório daquele departamento.

Aos professores Luiz Roncaratti e Gabriela Possa do laboratório de fotobiorreatores do Instituto de Física (UnB).

Alfiado Victorino; Joao Nildo de S. Vianna; Izabel C. B. Bacellar Zaneti; Maria Tereza L. Vilarinho

A Prefeitura do campus da UnB e os trabalhadores que apoiaram nas obras de instalação da Usina.

Ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de doutorado.

A colaboração de todas essas entidades coletivas e singulares foram decisivas para a realização do nosso trabalho. Por isso, para todos vocês vão os nossos sinceros agradecimentos.

REFERÊNCIAS

Abu-qudais M, Abu-qudais HA 2000. Energy content of municipal solid waste in Jordan and its potential utilization. *Energy Conversion and Management* 41:983–991.

Alvarez JM, Cecchi F, Pavan P, Liabres P 1990. The performances of digesters treating the organic fraction of municipal solid wastes differently sorted. *Biological Wastes*, 33(3): 181–199.

APHA. 1999. standard methods for the examination of water and wastewater. *Proc.AmerPubHhealth Ass* 4: 1–541.

Appels L, Baeyens J, Degreve J, Dewil R 2008. Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. *Progress in Energy and Combustion Science*, 34: 755–781.

Barbosa LQ, Bernardes RS, De Brito AJ 2015. Propostas de remediação de área degradada por resíduos sólidos urbanos: Estudo de caso Aterro Jokey Clube Brasília, DF. *XXI Simpósio brasileiro de recursos hídricos*, Brasília, 1–10.

BGS 2014. *Manual de Instruções: Kit Biodigestor 10 m³*. Curitiba. BGS equipamentos para biogás.

Botero RB, Preston TR 1987. Biodigestor de bajo costo para la produccion de combustible y fertilizante a partir de excretas. *Bbc*: 2–20.

Bouallagui H, Cheikh RB, Marouani L, Hamdi M 2003. Mesophilic biogas production from fruit and vegetable waste in a tubular digester. *Bioresource Technology* 86(1): 85–89.

Bouallagui H, Touhami Y, Cheikh RB, Hamdi M. 2005. Bioreactor performance in anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes. *Process Biochemistry* 40(3-4): 989–995.

Brasil 2012. Lei 12.505/10-Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Ministério do Meio Ambiente.

Carlsson M, Lagerkvist A, Sagastume FM 2012. The effects of substrate pre-treatment on anaerobic digestion systems : A review. *Waste Management* 32(9): 1634–1650.

Carrilho NFQ 2012. *Valorização de bio-resíduos alimentares por digestão anaeróbia descentralizada- Caso de estudo : Campus da FCT/UNL*, Tese de dissertação, Universidade Nova de Lisboa, 126 pp.

Cesaro A, Belgiorno V 2014. Pretreatment methods to improve anaerobic biodegradability of organic municipal solid waste fractions. *Chemical Engineering Journal*, 240: 24–37.

Alfiado Victorino; Joao Nildo de S. Vianna; Izabel C. B. Bacellar Zaneti; Maria Tereza L. Vilarinho

Cho JK, Park SC, Chang HN 1995. Biochemical methane potential and solid state anaerobic digestion of korean food wastes. *Bioresource Technology* 52(3):245–53.

De Clercq D, Wen Z, Fan F, Caicedo L. 2016. Biomethane production potential from restaurant food waste in megacities and project level-bottlenecks: A Case Study in Beijing. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 59:1676–85.

Gao S, Huang Y, Yang L, Wang H, Zhao M, Xu Z, Huang Z, Ruan W 2015. Evaluation the anaerobic digestion performance of solid residual kitchen waste by NaHCO₃ buffering. *Energy Conversion and Management* 93:166–74.

Ge X, Matsumoto T, Keith L, Li Y 2014. Bioresource technology biogas energy production from tropical biomass wastes by anaerobic digestion. *Bioresource Technology* 169:38–44.

Igoni AH, Ayotamuno MJ, Eze CL, Ogaji SOT, Probert SD 2008. Designs of anaerobic digesters for producing biogas from municipal solid-waste. *Applied Energy*, 85(6):430–38.

Júnior JMN 2006. Análise teórica da viabilidade econômica dos três erres. Dissertação de mestrado, Universidade de Brasília. 83 pp.

Kothari R, Pandey AK, Kumar S, Tyagi VV, Tyagi SK 2014. Different aspects of dry anaerobic digestion for bio-energy: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 39: 174–95.

Kuo WC, Lai WL 2010. Treatment of kitchen waste using a mobile thermophilic anaerobic digestion system. *Renewable Energy* 35(10):2335–39.

Li L, Zhang R, He Y, Wang W, Chen C, Liu G 2015. Anaerobic digestion performance of vinegar residue in continuously stirred tank reactor. *Bioresource Technology* 186: 338–42.

Lindner J, Zielonka S, Oechsner H, Lemmer A 2015. Bioresource technology effects of mechanical treatment of digestate after anaerobic digestion on the degree of degradation. *Bioresource Technology* 178: 194–200.

Mao C, Feng Y, Wang X, Ren G. Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 45: 540–55.

Pinto, DMCL 2000. *Avaliação da partida da digestão anaeróbia da fração orgânica de resíduos sólidos domésticos inoculados com percolado*, PhD Thesis, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, 175 pp.

Rajendran K, Kankanala HR, Lundin M, Taherzadeh MJ 2014. Bioresource technology a novel process simulation model (PSM) for anaerobic digestion using Aspen Plus. *Bioresource Technology* 168: 7–13.

Robbins, CA 2012. *Food waste diversion for enhanced methane gas production at the drake water reclamation facility*, PhD Thesis, Colorado State University, Fort Colorado, 151 pp.

Silva FP, Botton JP, De Souza SNM, Hachisuca AMM 2015. Parâmetros físico-químicos na operação de biodigestores para suinocultura. *Revista tecnológica-Edição especial*. 33–41.

Turovskiy, IS, Mathai PK 2006. *Processing wastewater sludge processing*. John Wiley & Sons, New Jersey.

Alfiado Victorino; Joao Nildo de S. Vianna; Izabel C. B. Bacellar Zaneti; Maria Tereza L. Vilarinho

Wang L, Shen F, Yuan H, Zou D, Liu Y, Zhu B, Li X 2014. Anaerobic co-digestion of kitchen waste and fruit/vegetable waste: lab-scale and pilot-scale studies. *Waste Management* 34(12): 2627–33.

Zhang R, El-Mashad HM, Hartman K, Wang F, Liu G, Choate C, Gamble P 2007. Characterization of food waste as feedstock for anaerobic digestion. *Bioresource Technology* 98(4): 929–35.

Biotechnology and Sustainability: Potential of anaerobic digestion on waste reduction, energy and biofertilizers production

ABSTRACT

This paper aims to install and evaluate a sustainable: Project “Vitrine da Sustentabilidade”, integrated unit that demonstrates the production and use of bioenergy and bio fertilizers. It analyzes the performance of a 10 m³ PVC tubular reactor in the treatment of food waste from the Restaurant of the University of Brasilia. Organic loading rate, pH, temperature, solids removal rate, biogas production and its composition are verified. The reactor experimentally operated under relative thermal stability conditions, during four months, in mesophilic environment (22-33°C) with average organic rate of 23.9 kgSV/m³day. It presented an average biogas production rate of 13.8 dm³/kgSVday, total solids removal rate (96%) and volatile solids removal rate (18.7%). The generated biogas presented a higher CO₂ concentration and fractions of other gases, without considerable methane concentration. The project holds the potential efficiency and replicability for technological innovation at the biogas and bio fertilizer production.

Keywords: Biodigester; Food Waste; Biogas; “Vitrine da Sustentabilidade”.

Data Submissão: 30/04/2016

Data Aceite: 09/06/2016