

III-425 - DESENVOLVIMENTO DE BIODIGESTORES ANAERÓBIOS COM SISTEMA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO PARA A PRODUÇÃO DE BIOGÁS UTILIZANDO RESÍDUO ALIMENTAR E ESGOTO

Claudinei de Souza Guimarães⁽¹⁾

Engenheiro Químico pela Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro (EQ/UFRJ). Mestre em Físico-Química pelo Instituto de Química e doutorado em Química pelo Instituto de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro (IQ/UFRJ). Professor do Departamento de Engenharia Bioquímica da Escola de Química (DEB/EQ/UFRJ) e coordenador do Laboratório de Controle da Poluição do Ar (LCPA).

David Rodrigues da Silva Maia⁽²⁾

Engenheiro Químico pela Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro (EQ/UFRJ). Mestrando em Engenharia Química pelo Programa em Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos da Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro (TPQB/EQ/UFRJ).

Eduardo Gonçalves Serra⁽³⁾

Engenheiro Industrial pela Universidade Federal do Rio de Janeiro. Mestre em Engenharia de Produção pela COPPE/UFRJ e Doutorado em Engenharia Oceânica pela COPPE/UFRJ. Professor da Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, e Pró-Reitor de Graduação da UFRJ.

Endereço⁽¹⁾: Av. Athos da Silveira Ramos, 149, Centro de Tecnologia, Escola de Química, Bloco E, Sala 203 Cidade Universitária - Rio de Janeiro - RJ - CEP: 21941-909 - Brasil - Tel: +55 (21) 3938-7572 - e-mail: claudinei@eq.ufrj.br

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi construir e desenvolver biodigestores anaeróbios para otimização da produção de biogás, em específico biometano, a partir da codigestão de resíduo alimentar (RA) e esgoto (S) de uma estação de tratamento de esgoto. Os biodigestores operaram com misturas diferentes e na fase mesofílica (37 °C) a fim de verificar a eficiência e viabilidade dos biodigestores construídos, assim como os sensores de gases, sensor de pH, agitadores e *software* desenvolvido. Durante os 60 dias de experimentos foram testados e avaliados todos os parâmetros de controle e monitoramento dos biodigestores, necessários para a produção de biogás. O biodigestor contendo misturas de RA, S e lodo anaeróbio obtiveram as maiores reduções de matéria orgânica, expressada com a remoção de 88.3% de SV e 84.7% de COD, maior produção de biogás (63 L) e maior porcentagem, em volume, de metano (95%) e uma produção específica de metano de 0.299 L CH₄/g VS removido. Por fim, foi possível verificar que o sistema embarcado de controle e automação foi simples, eficaz e robusto e o *software* supervisor bastante eficiente em todos os quesitos definidos para sua concepção.

PALAVRAS-CHAVE: Desenvolvimento de Biodigestores, codigestão, esgoto, resíduo orgânico, biogás.

INTRODUÇÃO

Atualmente, um dos maiores problemas enfrentados por boa parte dos países, principalmente, os em desenvolvimento, é a disposição final dos resíduos sólidos urbanos (RSU), sobretudo, pelos problemas ambientais, sociais e econômicos causados pelo seu mau gerenciamento. Os custos associados à coleta, transporte e tratamento, inclusive o mais importante destes, ainda dificultam o correto gerenciamento dos resíduos, pois o descarte acaba sendo realizado em áreas inadequadas, como “lixões”, valas e outros locais não providos de infraestrutura adequada ao recebimento destes resíduos (APETATO et al., 1999). Além dos problemas dos RSU, historicamente, a poluição dos recursos hídricos e o acesso a fontes de energia representam desafios para o desenvolvimento econômico, para a saúde humana e a preservação ambiental de todos os países (LANSING et al., 2008).

No Brasil, o resíduo sólido urbano apresenta matéria orgânica como sua fração majoritária, que advém principalmente de restaurantes e resíduos domésticos (PNRS, 2010). Uma das soluções para diminuir estes problemas gerados e tentar reaproveita-los está no tratamento anaeróbio. Sabe-se que a digestão anaeróbia é um processo através dos quais resíduos orgânicos são biologicamente convertidos, por um consórcio microbiano, na ausência de oxigênio (LI et al., 2011). Além de estabilizar a carga orgânica de resíduos, gera

produtos como o biogás, rico em metano, e o digestato, que pode ser usado como condicionador de solos que é historicamente utilizada para a estabilização de lodo gerado no tratamento de esgotos, porém uma aplicação viável para o tratamento de qualquer matéria orgânica (CECCHI et al., 1991). Além do potencial de geração de energia renovável, a digestão anaeróbia vem se tornando um tratamento cada vez mais estudado e mais popular por diversos fatores como a diminuição da disposição de resíduos em aterros sanitários e o atendimento a pequenas comunidades longe dos centros urbanos. Outra vantagem bastante evidente da digestão anaeróbia é a menor geração de lodo. No tratamento anaeróbio cerca de 10% da matéria orgânica é convertida em lodo, com os outros 90% sendo aproveitados como biogás. Destaca-se ainda a aplicabilidade de processos anaeróbios em grande e pequena escala, tendo baixo custo de implantação, baixa demanda de área e alta tolerância a cargas orgânicas elevadas (CHERNICARO, 1997). Desta forma a produção de biogás e o desenvolvimento de tecnologias para a geração de biometano vêm sendo incentivado por vários países como alternativa para a geração de eletricidade ou cogeração de motores de energia interna (BUDZIANOWSKI, 2015; PATTERSON et al., 2011; JHA et al., 2013; VENKATESH, 2013).

Inicialmente foi avaliada, em diferentes proporções, a codigestão anaeróbia mesofílica de uma mistura de resíduo alimentar de um restaurante universitário e o esgoto de uma estação de tratamento, a fim de obter um melhor aproveitamento do resíduo orgânico e maior produção de metano. O uso da digestão anaeróbia para o tratamento da fração orgânica do resíduo sólido municipal, resíduos alimentares e de feiras de horticultores é largamente citado na literatura (WARD et al., 2008; FERNANDEZ et al., 2010; KIM, 2011; CHARLES et al., 2009). Dessa forma, a digestão anaeróbia vem se mostrando um tipo de tratamento promissor para os resíduos sólidos urbanos gerados no Brasil. Além do biogás, a digestão anaeróbia produz um digestato rico em nutrientes que, dependendo de suas características, pode ser usado como fertilizante ou corretivo de solo. Aplicá-lo ao solo se mostra uma opção mais atrativa em termos ambientais, pois permite que os nutrientes sejam recuperados e reduz a perda de matéria orgânica sofrida por solos sob exploração agrícola (MATA-ALVAREZ et al., 2000).

Entretanto, para que haja viabilidade na geração de energia, faz-se necessário à utilização de biodigestores anaeróbios e que sejam construídos com baixo custo e com alta tecnologia empregada, além de controlar todos os parâmetros para a otimização da produção de biogás.

Neste sentido, o objetivo principal deste trabalho foi desenvolver os biodigestores anaeróbios com sistema de controle e automação e para isso o projeto foi dividido nas seguintes etapas: desenvolvimento dos biorreatores (biodigestores anaeróbios), construção do sistema de aquecimento, sistema de agitação, sistema de monitoramento dos gases utilizando, inicialmente, sensores de metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) e gás sulfídrico (H_2S) e por fim o desenvolvimento do *software* a partir das plataformas C e C# para monitorar e controlar os principais parâmetros durante o processo. E teve como fundamentos principais, a utilização materiais de baixo custo, porém com tecnologias atuais, e métodos simples de utilização do sistema visando à reprodutibilidade em larga escala e aplicação industrial.

MATERIAIS E MÉTODOS

Coleta e caracterização das amostras: resíduo alimentar, esgoto e lodo anaeróbio (inóculo)

O esgoto bruto foi coletado em uma estação de tratamento de esgoto localizado na cidade do Rio de Janeiro após a etapa de desarenação do tratamento preliminar. A caracterização foi realizada em termos de DQO, umidade, pH, Sólidos Totais (Voláteis e Fixos), Nitrogênio Kjeldahl Total (NKT) e Fósforo Total (PT). O lodo anaeróbio empregado como inóculo nos experimentos foi coletado do reator UASB em operação de uma indústria local, sendo realizadas as mesmas caracterizações do esgoto bruto e depois de retirar a alíquota para caracterização, o lodo era armazenado sob refrigeração (4°C) até o momento de uso. Todas as análises foram determinadas de acordo com APHA (2005). Para o resíduo alimentar, foi realizada a mesma caracterização do esgoto bruto e lodo, e o teste do carbono total (CT). A coleta dos resíduos alimentares era realizada após o período de refeição, onde a sobra removida dos pratos e utensílios era submetida a uma triagem, para separação da fração orgânica, e homogeneizada por meio de quarteamento, conforme norma brasileira (ABNT, 2004). Em seguida, o material homogeneizado era triturado com água destilada nas devidas proporções, sendo parte do material triturado (denominado resíduo alimentar) armazenado sob refrigeração (4°C) até o momento de uso e parte preservado em freezer (-20°C). Inicialmente foram realizados vários experimentos em pequena

escala, utilizando frascos de penicilina com volumes de 100 mL, a fim de encontrar as proporções ideais para a maior produção de biogás.

Nos experimentos com frascos penicilina, o resíduo alimentar triturado foi misturado com esgoto bruto para obtenção de diferentes proporções de Peso Seco (PS): 20, 15, 10 e 5%, a fim de se avaliar o efeito da umidade. Os experimentos foram conduzidos com e sem adição de lodo anaeróbio (inóculo) na proporção de 10% v/v, para avaliação do efeito da sementeira. A umidade selecionada, também, foi usada como base para a mistura dos resíduos nos experimentos em biodigestores de bancada. As misturas tiveram seu pH corrigido para valores entre 7 e 8 empregando-se solução 1 M de bicarbonato de sódio (NaHCO_3), e foram suplementadas com fosfato monobásico de potássio para correção da concentração de fósforo, segundo uma relação DQO:P de 350:1. Os frascos foram lacrados com batoques de borracha e lacres de alumínio e, em seguida, incubados a $37 \pm 2^\circ\text{C}$ até estabilização da produção de biogás, durante 30 dias, cujo volume foi medido pelo deslocamento do êmbolo de seringas plásticas de 60 mL conectadas aos selos de borracha. O volume final utilizado foi o de 75% do volume total do frasco, dando assim uma margem de segurança de 25% da superfície do meio à boca do frasco. Essa margem foi importante, pois durante o processo as bolhas de biogás perturbam o meio e o carregam para cima, podendo entupir as seringas. O biogás produzido, acondicionado em seringas, foram armazenados em temperaturas de -5°C até a análise ser feita em cromatográfica em fase gasosa, sempre que atingida à estabilização do volume de biogás presente nas seringas. Nesta etapa inicial da otimização dos experimentos eram realizadas análises de DQO, Sólidos Totais (voláteis e fixos) e pH antes e após o processo de digestão anaeróbia. O lodo anaeróbio utilizado como inóculo foi coletado em reator anaeróbio da indústria de abate de aves, sendo caracterizado em termos de sólidos totais voláteis. Cada condição foi avaliada com triplicatas, sendo considerados os valores médios de produção de biogás. Posteriormente a esta etapa dos experimentos, a fração ideal foi utilizada nos biodigestores desenvolvidos neste trabalho, em escala de bancada, construídos com volume total de 7 Litros. Os experimentos iniciais de otimização das proporções ideais da codigestão seguiram as etapas descritas no fluxograma apresentado na Figura 1.

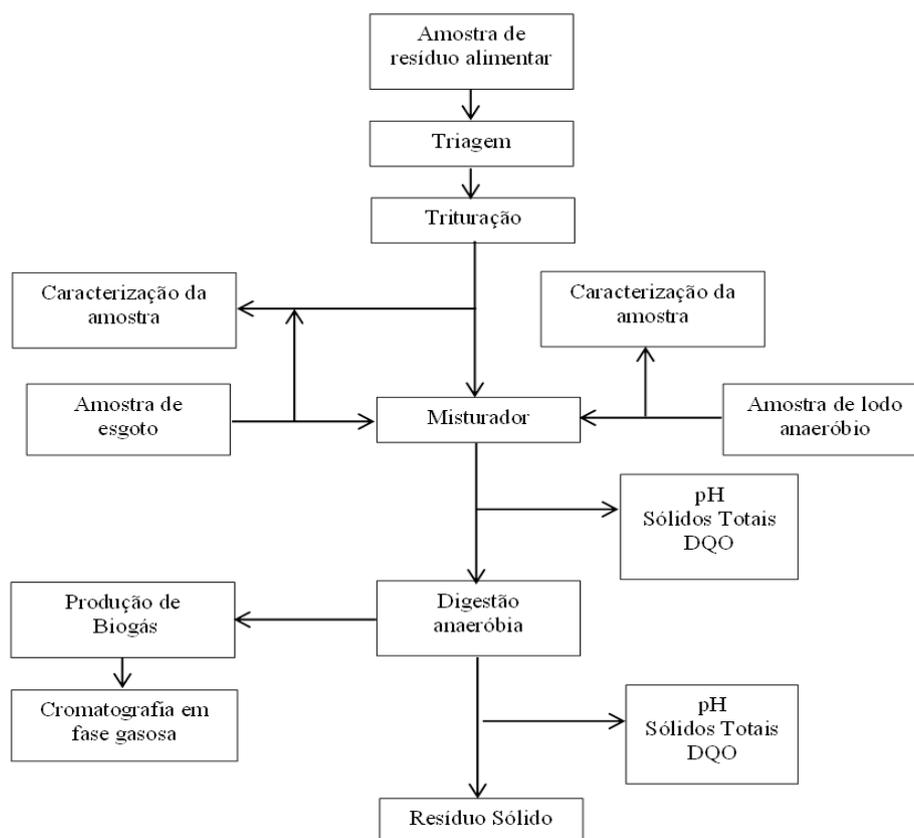


Figura 1: Fluxograma das etapas experimentais realizadas neste trabalho.

Determinação do Peso Seco (PS) ideal para serem usados nos biodigestores

A escolha da quantidade do PS ideal para ser colocado nos biodigestores em escala de bancada foi realizada a partir de três experimentos, nos frascos de penicilina, descritos a seguir: Experimento 1 com diferentes misturas de resíduo alimentar, com e sem sementeira. As misturas foram feitas com o objetivo de se obter 20%, 15% e 10% em PS. Experimento 2, foram feitas triplicatas de diferentes misturas de esgoto e resíduo alimentar, com e sem sementeira. As misturas foram feitas com o objetivo de se obter 20%, 15%, 10% e 5% em OS e Experimento 3, realizado com triplicatas de misturas de 10% e 5% PS de esgoto e resíduo alimentar com lodo anaeróbio (inóculo), e ajuste de pH no início do experimento. Um branco com água no lugar de esgoto foi feito concomitantemente com o objetivo de verificar a viabilidade da codigestão. Todos os experimentos foram conduzidos a $37 \pm 2^\circ\text{C}$ e pressão atmosférica, por 30 dias.

Desenvolvimento e construção dos biodigestores anaeróbios para a produção de biogás

Após a otimização das proporções realizadas nos frascos de penicilina, foram iniciados os experimentos nos biorreatores (biodigestores anaeróbios). Os biorreatores foram construídos com sistema de controle e automação e teve como fundamentos principais a utilização de materiais de baixo custo, porém com tecnologias atuais, e métodos simples de utilização do sistema visando à reprodutibilidade em larga escala futuramente. Seguindo a tendência de utilização de materiais simples, primeiramente, foi concebido o biorreator, sendo confeccionado um recipiente de vidro com geometria cilíndrica, envolvido com acrílico tendo um volume total de 7 Litros, hermeticamente fechado por uma tampa em poliuretano. Nessa tampa foram feitos sete furos, sendo um furo central para passagem da haste da agitação e os outros para: saída do biogás, alojamento dos sensores de temperatura, pH, entrada e retirada de material do biodigestor e os demais foram fechados e reservados para uma aplicação futura. O sistema de aquecimento foi baseado em um banho termostático, composto por um recipiente, confeccionado em acrílico e dimensionado para que pudesse comportar o biorreator e o líquido de banho, uma resistência elétrica vulgarmente conhecida como “aquecedor de copo” e uma bomba d’água, utilizada no sistema de esguicho do limpador de para-brisa dos automóveis, para a circulação do fluido de banho. O sistema de agitação foi desenvolvido utilizando um motor, comumente, utilizado para girar o prato de fornos de microondas. Esse tipo de motor foi escolhido por apresentar um baixo custo e por funcionar em baixa rotação o que é preferível em digestores anaeróbios. A esse motor foi fixado uma haste de agitação desenvolvida especialmente para a utilização destes biodigestores. Na Figura 2 é apresentado o esquema de montagem e adição dos materiais utilizados nos experimentos, em seguida o pH era ajustado, antes de ser selado para que impedisse a entrada de oxigênio.

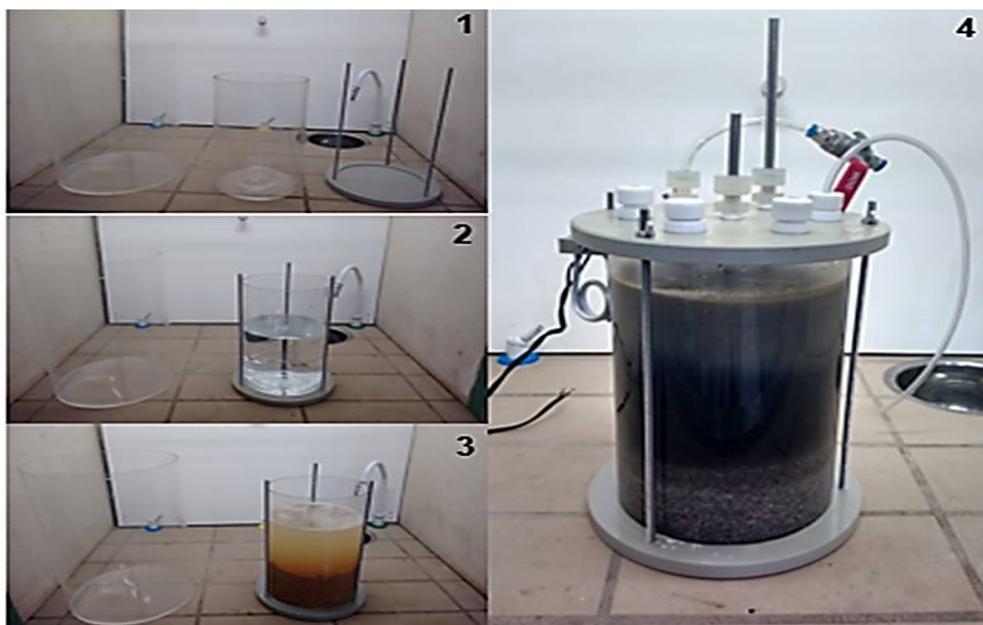


Figura 2: Etapas de montagem dos biodigestores para a realização dos experimentos.

Desenvolvimento do software para o controle e monitoramento

A unidade de controle e automação desenvolvida foi composta por um sistema embarcado de controle, Controlador Lógico Programável (CLP), que se comunica com um software supervisor. Esse sistema foi desenvolvido por completo: hardware, firmware e software supervisor. O hardware projetado pode ser dividido em quatro partes principais: microcontrolador-Unidade Central de Processamento, comunicação entre o microcomputador-microcontrolador, módulos de potência e módulos de condicionamento de sinais dos sensores e visou a atender as necessidades do sistema, que são os Conversores Analógico Digital (ADC), para os sensores, atuadores de alta potência, um para a resistência elétrica, outro para a bomba d'água e o último para o motor de agitação e o sistema de comunicação com o microcomputador. O software de controle e automação foi desenvolvido através do Microsoft Visual Studio 2012 utilizando a programação orientada a objetos e a linguagem Visual Basic e teve como requisitos, definidos na sua concepção, o monitoramento online do pH, temperatura, controle de acionamento da bomba d'água e motor de agitação e PID de temperatura, armazenamento de dados coletados, análise e visualização dos parâmetros monitorados por acesso remoto. O esquema completo do funcionamento do biodigestor é apresentado na Figura 3.

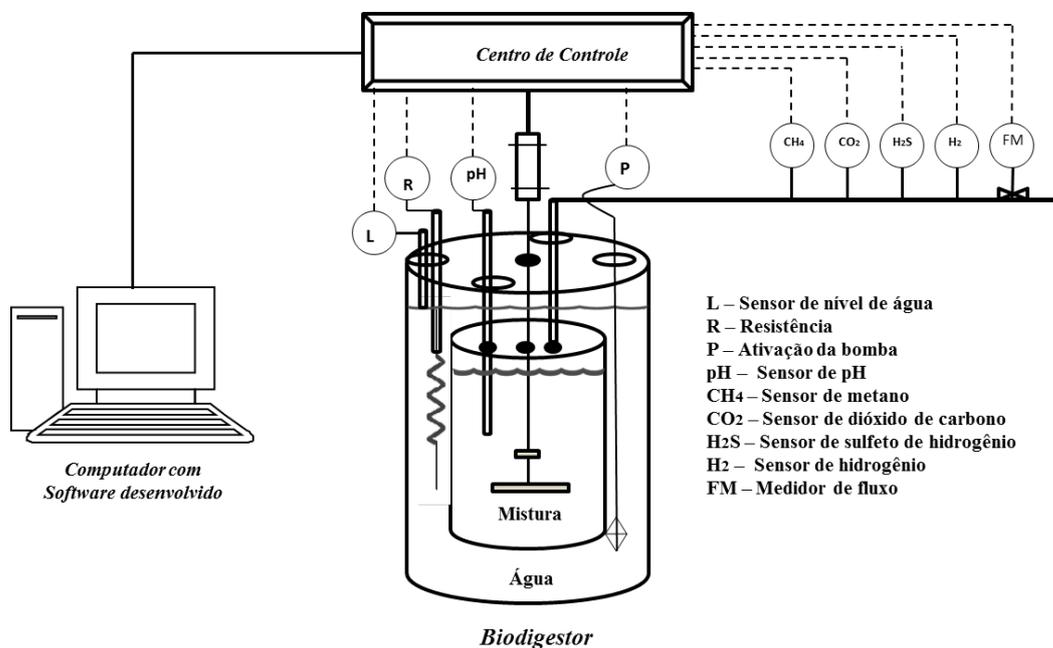


Figura 3: Representação completa do funcionamento do biodigestor anaeróbico desenvolvido e utilizado nos experimentos deste trabalho.

Análise e calibração dos sensores dos compostos produzidos no biogás

Inicialmente o biogás produzido nos biodigestores era armazenado em bolsas de *Tedlar*, especialmente preparadas para gases, obtidas da Sigma Aldrich. A caracterização do biogás foi feita num Cromatógrafo em fase gasosa, marca da Agilent Technologies, modelo 7820A com detectores de condutividade térmica (DCT) e de ionização de chamas (DIC). As amostras foram analisadas em triplicatas e para os cálculos das concentrações foram utilizados padrões de CO₂, CH₄ e H₂S, adquiridos da White Martins. Os sensores de gases utilizados foram os modelos MQ da Hanwei Eletronics Co., LTD, sendo os mesmos calibrados com os padrões. Os resultados eram comparados com as análises cromatográficas a fim de verificar a eficiência de detecção e quantificação do sistema de monitoramento online feito pelos sensores instalados e o *software* desenvolvido.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Caracterização dos resíduos utilizados antes da mistura

Durante esta etapa de otimização, a fim de verificar as melhores proporções para serem utilizados nos biodigestores, foram feitas três coletas do lodo secundário, resíduo alimentar e esgoto, sendo realizado somente um teste do carbono total (CT) para o resíduo alimentar de 68.6 mg/L, e as demais caracterizações estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Características dos resíduos utilizados nas misturas.

Parâmetros	Resíduo Alimentar (Média ±SD)	Esgoto (Média ±SD)	Lodo (Média ±SD)
Umidade %	75±8.2	97±2.1	93±4.1
pH	5.4±0.2	6.2±0.6	6.5±0.3
SFT (mg/g)	8.4±4.6	0.7±0.2	22.4±3.1
SVT (mg/g)	95.4±34.1	0.6±0.2	31.6±4.4
TKN (mg/L)	18.0	42.0	26.0
PT (mg/L)	0.05	8.2	15.4

O resíduo alimentar apresentou umidade menor que o lodo e o esgoto, mas após serem misturados apresentaram umidade próxima aos valores obtidos para o esgoto e o lodo. Os resíduos apresentaram pH ácido, abaixo de 7, indicando que sua mistura final terá pH ácido, e que será necessário a adição de um alcalinizante a fim de ajustar o pH no início dos experimentos. Inicialmente o ajuste de pH foi realizado com NaHCO₃ que poderia dificultar o tratamento anaeróbio, pois causaria o aumento da concentração de sódio em níveis inibitórios. A baixa relação C/N do resíduo alimentar (3.8) indicou a presença de altas concentrações de nitrogênio no resíduo que neste caso poderá ser convertido a amônia, promovendo o aumento do pH e causando a inibição de microrganismos metanogênicos (APPELS et al., 2008). O valor elevado de SVT no resíduo alimentar indica a possibilidade de aumento na produção de biogás, em especial o metano, quando em mistura com lodo de esgoto. Kim et al. (2003) avaliaram a mistura de resíduo alimentar com lodo de esgoto e verificaram que a adição de resíduo orgânico melhora a digestão anaeróbia. Com base nos resultados obtidos na etapa inicial, a melhor proporção foi a 10% em peso seco (PS).

Construção dos biodigestores e a eficiência da codigestão do resíduo alimentar e o esgoto

Nesta segunda etapa do trabalho, após a otimização da proporção ideal da mistura de esgoto, lodo e resíduo alimentar, foram construídos três biodigestores nas seguintes situações: Biodigestor B1 contendo somente uma mistura de resíduo alimentar e Esgoto; Biodigestor B2 contendo mistura de Resíduo Alimentar, Esgoto e Lodo anaeróbio (inóculo) e Biodigestor B3 contendo mistura de Resíduo Alimentar, Água e Lodo anaeróbio. O biodigestor (B1) foi utilizado como um branco, ou seja, um experimento concomitantemente com o objetivo de verificar a viabilidade da co-digestão sem a presença do inóculo. Para as misturas foram realizados os testes de Demanda Química de Oxigênio (DQO), Sólidos Totais (ST) e Sólidos Voláteis (SVT) no início e monitorados durante os 60 dias do experimento, além do pH, rendimento, produção do biogás e todos os parâmetros de operacionalidade dos biodigestores. Um esquema completo dos biodigestores funcionando durante os experimentos é apresentado na Figura 4.

Os perfis de eficiência do bioprocessamento da co-digestão anaeróbia do resíduo alimentar e esgoto para os biodigestores B2 e B3 durante os 60 dias de experimento foram os que apresentaram maior volume de biogás e rendimento de metano, sendo o biodigestor B2 o mais eficiente na produção de biogás e remoção da matéria orgânica expressada pelo SV removidos e DQO, respectivamente, 88.3% de SV e 84.7% de COD. Estes resultados podem estar associados com os diferentes tipos de resíduos presentes nos biodigestores, em especial a codigestão do esgoto com o resíduo alimentar que provavelmente contribuiu para o aumento da degradação da matéria orgânica e na maior produção de biogás como apresentado na Tabela 2. A produção específica de metano foi de 0,299 LCH₄/g SV removidos para esta mistura.

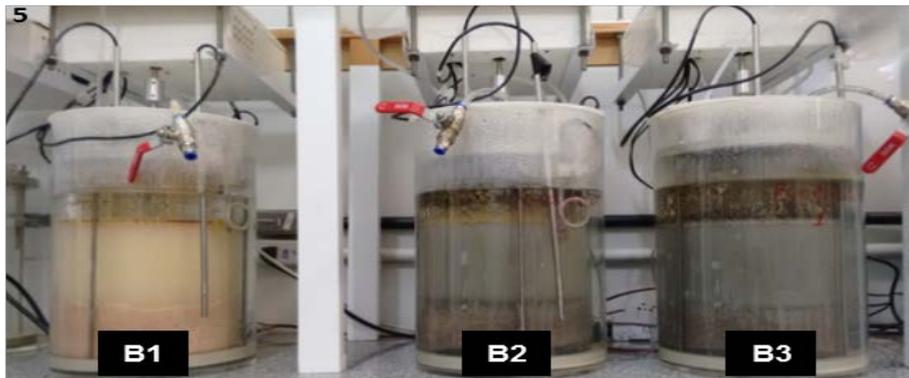


Figura 4: Experimentos de operacionalidade e eficiência nos biodigestores construídos utilizando misturas e proporções diferentes. (B1) - Resíduo alimentar + Esgoto; (B2) – Resíduo alimentar + Esgoto + Lodo (inóculo); (B3) – Resíduo alimentar + Água + Lodo (inóculo).

Tabela 2: Rendimento da matéria orgânica removida e na produção do metano nos biodigestores B2 após 60 dias de experimentos.

60 dias	Matéria Orgânica Removida (%)			Produção de Biogás (L/dia)	Volume acumulado (L)	
	SV	DQO	ST		Biogás	Metano
Biodigestor B2	88.3	84.7	63.3	1.1	63	59.9

Na Figura 5 pode ser observado a evolução e a eficiência de remoção dos Sólidos Totais e Voláteis obtidos e na Figura 6 a evolução da Demanda Química de Oxigênio (DQO) durante os 60 dias de experimentos para o Biodigestor B2 contendo misturas de resíduo alimentar, esgoto e lodo anaeróbio.

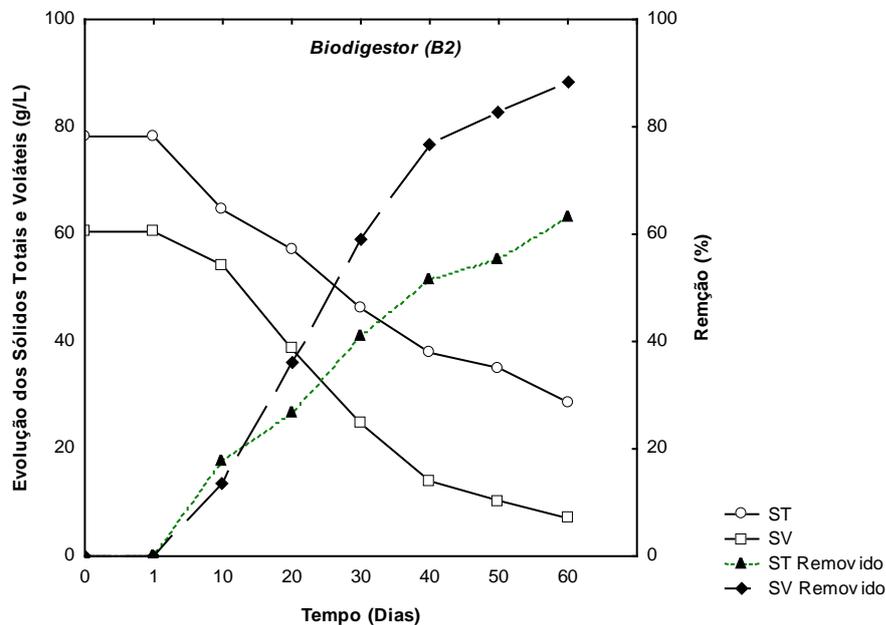


Figura 5: Evolução temporal observada no Biodigestor B2 – Sólidos Totais (ST), Sólidos Voláteis removidos (SV) e Demanda Química de Oxigênio (DQO) durante 60 dias de experimentos.

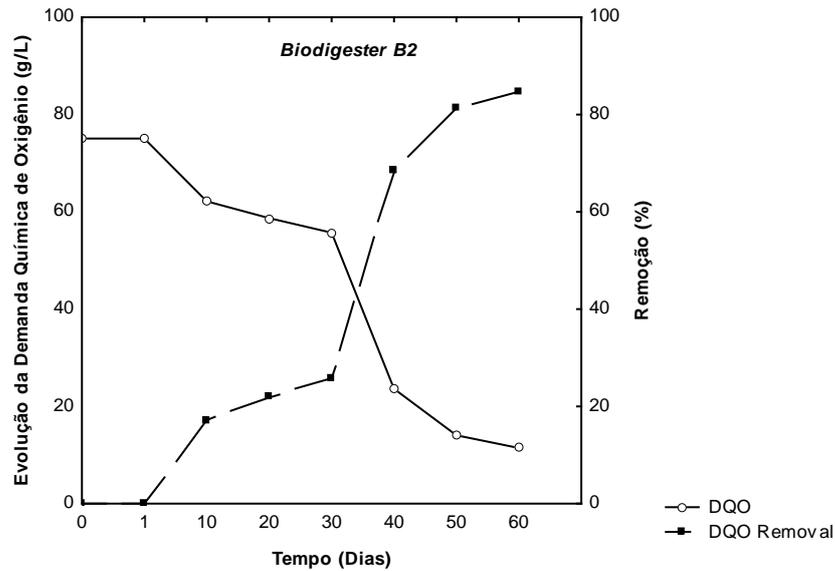


Figura 6: Evolução temporal observada no Biodigester B2 – Demanda Química de Oxigênio (DQO) durante 60 dias de experimentos.

Com a finalidade de avaliar o nível de detecção e quantificação dos sensores de gases (CH_4 , CO_2 e H_2S), foi utilizado um sistema que acondicionasse o biogás em um sistema fechado e a cada dois dias esta amostra passava pelos sensores e depois o resultado era comparado com os das análises cromatográficas. Em todas as amostras foram encontrados erros menores que 5%, implicando em uma confiabilidade do sistema desenvolvido nos biodigestores. O perfil de eficiência da produção de metano associada à variação de pH no biogás é apresentado na Figura 7. Os resultados apresentados indicaram que no início ocorreu alta produção de CO_2 (fase acetogênese) e pH ácido e com o passar do tempo a concentração de CO_2 foi diminuindo e aumentando a concentração do metano. O comportamento do H_2S foi detectado e quantificado em baixas concentrações durante todo experimento comprovando a eficiência do biodigester para processos anaeróbios. No biodigester B2 foi necessário corrigir o pH durante os primeiros 10 dias iniciais. O controle de pH necessário foi feito com a adição de hidróxido de sódio (6N).

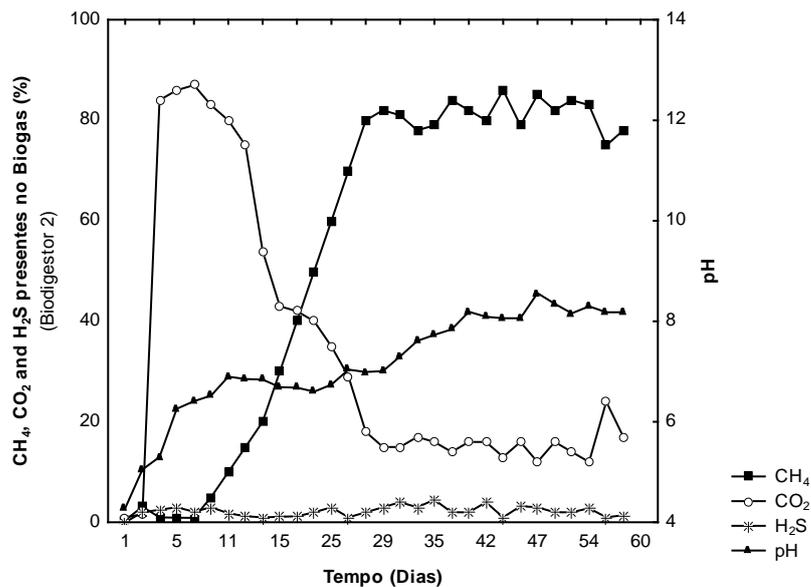


Figura 7: O perfil de eficiência da produção de metano associada à variação de pH no Biogás.

CONCLUSÕES

Com todos os experimentos realizados desde a otimização em pequenas escalas com frascos de penicilina e as misturas utilizadas nos biodigestores desenvolvidos em escala de bancada comprovaram que é fundamental este tipo de procedimento para realização de projetos em grande escala, pois além de economizar custos, teremos um maior rendimento nos processos de interesses. Desta forma foi possível observar que o biodigestor B2 (contendo esgoto, resíduo alimentar e lodo anaeróbio) apresentou melhor rendimento na produção de biogás e redução da matéria orgânica. Entretanto é importante destacar que a maior produção de biogás no biodigestor B2, em comparação às outras misturas, não pode ser atribuída tão somente à adição de esgoto à mistura, pois a concentração de matéria orgânica no esgoto é baixa. Tal resultado, talvez, indique que o esgoto contém em sua composição substâncias que complementam as necessidades dos microorganismos anaeróbios e/ou mantém melhores condições para a biodegradação dos constituintes do resíduo.

Para a elevada diferença de volume de biogás entre os biodigestores B2 e os outros indica o efeito da sementeira na biodegradação do resíduo. O resíduo alimentar provavelmente não contém representantes de toda a população microbiana necessária para a completa degradação de seus constituintes, fazendo com que a degradação e, conseqüentemente, a produção de biogás fosse lenta e praticamente interrompida aos 8-10 dias do experimento.

Os biodigestores 2 por apresentar maior produção de biogás, indica que a população microbiana presente no esgoto, pode ter contribuído para a degradação da matéria orgânica.

Experimentos realizados somente com resíduo orgânico comprovaram que o resíduo alimentar, apenas, não possui o consórcio microbiano necessário para a biodigestão anaeróbica mais eficiente.

Com estes resultados encontrados podemos concluir que o biodigestor desenvolvido no laboratório com o sistema de automação e controle foi satisfatório para a produção de biogás. Os parâmetros de controle do pH, temperatura, agitação e o *software* desenvolvido funcionaram corretamente. O emprego de tecnologias atuais e matérias de baixo custo foram suficientes para o propósito dos experimentos, podendo ser empregado em maior escala no futuro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. APETATO, M. M., NOBRE, A. M., ALVES, J. C., ROBALO, G. S., FERREIRA, F., Taxa de Resíduos Urbanos: Deficiências e Soluções, 6ª Conferência Nacional sobre Qualidade do Ambiente, v. 03, p. 363-369, Editora Plátano, Lisboa, 1999.
2. LANSING, S., BOTERO, R. B., MARTIN, J. F., *Waste treatment and biogas quality in small-scale agricultural digesters. Bioresource Technology*, v. 99, p. 5881-5890, 2008.
3. Plano Nacional de Resíduos Sólidos. Lei nº 12.305/10. Versão para consulta pública. http://www.mma.gov.br/estruturas/253/_publicacao/253_publicacao02022012041757.pdf, 2010.
4. Li, Y., PARK, S. Y., ZHU, J., *Solid-state anaerobic digestion for methane production from organic waste, Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vl. 15, p. 821-826, 2011.
5. CECCHI, F., PAVAN, P., ALVAREZ, J. M., BASSETTI, A., COZZOLINO, C., *Anaerobic digestion of municipal solid waste: Thermophilic vs. mesophilic performance at high solids, Waste Management & Research*, v. 9, Issue 4, p. 305-315, 1991.
6. CHENICARO, C.A.L. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: Volume 5:Reatores Anaeróbios, Belo Horizonte, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA/UFMG), v. 5, 246p, 1997.
7. BUDZIANOWSKI, W. M. and BUDZIANOWSKA, D. A., *Economic analysis of biomethane and bioelectricity generation from biogas using different support schemes and plant configurations, Energy*, v. 88, p. 658-666, 2015.
8. PATTERSON, TIM., ESTEVES, S., DINSDALE, R., GUWY, A., *Life cycle assessment of biogas infrastructure options on a regional scale, Bioresource Technology*, v. 102, p. 7313-7323, 2011.
9. JHA, A. K., LI, J., ZANG, L., BAN, Q., JIN, Y., *Comparison between Wet and Dry Anaerobic Digestions of Cow Dung under Mesophilic and Thermophilic Conditions, Advances in Water Resource and Protection*, v. 1, Issue 2, 2013.

10. VENKATESH, G. and ELMI, R. A., *Economic-environmental analysis of handling biogas from sewage sludge digesters in WWTPs (wastewater treatment plants) for energy recovery: Case study of Bekkelaget WWTP in Oslo (Norway)*, *Energy*, V. 58, p. 220-235, 2013.
11. WARD, A. J., HOBBS, P. J., HOLLIMAN, P. J., JONES, D. L., *Optimization of the Anaerobic Digestion of Agricultural Resources*, *Bioresource Technology*, V. 99, Issue 17, p. 7928-7940, 2008.
12. FERNANDEZ, J., PEREZ, M., ROMERO, L.I., *Kinetics of mesophilic anaerobic digestion of the organic fraction of the municipal solid waste: influence of initial total solid concentration*, *Bioresource Technology*, v. 101, p. 6322-6328, 2010.
13. KIM, D.H., OH, S.E., *Continuous high-solids anaerobic co-digestion of organic solid wastes under mesophilic conditions*, *Waste Management*, v. 31, p. 1943-1948, 2011.
14. CHARLES, W., WALKER, L., CORD-RUWISCH, R., *Effect of pre-aeration and inoculum on the start-up of batch thermophilic anaerobic digestion of municipal solid waste*, *Bioresource Technology*, v. 100, Issue 8, p. 2329-2335, 2009.