

## II-440 - DESENVOLVIMENTO DE UMA NOVA CONFIGURAÇÃO DE BIODIGESTOR ANAERÓBIO PILOTO COM POSSIBILIDADE DE DESLOCAMENTO *IN COMPANY* PARA TRATAMENTO DE RESÍDUOS ORGÂNICOS

**Valmor José Bandiera<sup>(1)</sup>**

Graduação em Viticultura e Enologia pelo IFF - Bento Gonçalves. Especialista em processo e controle de qualidade aplicado à indústria de alimento/UFLA e Mestre em Biotecnologia Industrial pela Universidade Positivo-PR em 2012. Faz parte da equipe da Bio4 - Soluções Biotecnológicas Ltda. como pesquisador e desenvolvimento de tecnologia.

**Marcelo Calide Barga<sup>(2)</sup>**

Coordenador das atividades de transferência de tecnologia da empresa Bio4 - Soluções Biotecnológicas Ltda. Engenheiro de Bioprocessos e Biotecnologia pela Universidade Federal do Paraná em 2004 e Mestre em Engenharia de Processos Térmicos e Químicos pela Universidade Federal do Paraná em 2007.

**Selma Aparecida Cubas<sup>(3)</sup>**

Professora Titular Programa de Pós Graduação em Gestão Ambiental e do Curso de Engenharia Civil da Universidade Positivo (UP). Engenheira Civil pela Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUC-PR) e Doutora em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC - USP).

**Endereço<sup>(3)</sup>:** Rua Professor Pedro Viriato Parigot de Souza, 5300. Campo Comprido, Curitiba-PR. CEP: 81280-330- Tel: 55- (41) 3317-3452 - e-mail: [selmacubas@up.edu.br](mailto:selmacubas@up.edu.br)

### RESUMO

O objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento de um biodigestor piloto, aplicável ao tratamento de resíduos sólidos orgânicos, através da biodigestão anaeróbia com possibilidade de deslocamento *in company*, permitindo o conhecimento prévio da matéria prima e dos parâmetros necessários para o projeto definitivo bem como o entendimento do processo por parte do interessado. Inicialmente, foram realizadas visitas técnicas a produtores rurais, para avaliar os tipos de biodigestores utilizados, materiais empregados e problemas operacionais. Em seguida, foi feita uma revisão de literatura a fim de conhecer o *design* de reatores anaeróbios aplicados no tratamento de resíduos sólidos orgânicos, bem como os principais fatores ligados ao dimensionamento do sistema, parâmetros físico-químicos e microbiológicos envolvidos no processo. Com isso, um biodigestor foi construído em aço inoxidável, com capacidade útil de carga de 1.000 L, pesando, aproximadamente, 380 kg, com agitador tipo âncora, bomba centrífuga para alimentação, separador de espuma, comando elétrico, resistência elétrica para aquecimento, podendo operar com uma pressão de 1,5 kgf/cm<sup>3</sup>. O equipamento foi instalado na Universidade Positivo, Curitiba – PR, para avaliações do potencial de tratamento do biodigestor água residuária doméstica e, posteriormente, com adição de resíduos alimentares do refeitório universitário. No primeiro experimento adotou-se a operação em batelada alimentada com pulsos de alimentação de água no volume de 400 L/dia e tempo de ciclo de 12 horas, agitação intermitente, acionamento manual diário, temperatura ambiente e sem inóculo. No segundo experimento o biodigestor foi inoculado com 300 L de lodo e a resistência elétrica foi acionada para controle da temperatura em 35°C ( $\pm 2^\circ\text{C}$ ), a alimentação e agitação seguiram os procedimentos similares ao primeiro experimento, entretanto com volume de 250 L/d. No terceiro experimento o biorreator foi inoculado e alimentado de forma contínua, com vazão de 350L/d, com controle de temperatura de  $35 \pm 2^\circ\text{C}$  e agitação sincronizada ao acionamento da resistência elétrica. Neste experimento foi introduzido 1 kg/dia de alimento triturado. Durante o processo foram monitoradas variáveis na entrada e saída do biorreator como: pH, temperatura, alcalinidade, acidez volátil, sólidos totais, sólidos voláteis e DQO. Os resultados obtidos no primeiro e segundo experimentos não indicaram a metabolização da carga orgânica, pois não houve variação da DQO. No terceiro experimento o biodigestor apresentou resultados que caracterizam atividade microbiológica, com redução de 56% da DQO e manutenção do pH e alcalinidade do meio.

**PALAVRAS-CHAVE:** Biodigestão Anaeróbia, Projeto de Biodigestores, Tratamento de Resíduos Orgânicos

## INTRODUÇÃO

A tecnologia anaeróbia é um dos sistemas de tratamento biológico mais utilizado para o tratamento de resíduos orgânicos, por apresentar várias vantagens em relação aos sistemas aeróbios, entre eles o custo e a possibilidade da utilização do biogás formado. Por isso, a digestão anaeróbia vem crescendo, em nível mundial, em uso e aceitação nas últimas décadas. O processo anaeróbio pode ser considerado como um ecossistema no qual diferentes grupos metabólicos de microrganismos trabalham juntos na conversão da matéria orgânica em gás carbônico, metano e outros metabólitos. Essa microbiota vive em um sistema ecológico delicadamente balanceado, e pequenos distúrbios no ambiente podem afetar todo o processo da digestão anaeróbia.

A digestão anaeróbia pode ser aplicada para o tratamento de resíduos orgânicos gerados em indústrias e agroindústrias como abatedouros, frigoríficos, cervejarias, curtumes, laticínios, indústrias produtoras de açúcar e sucos, entre outros. No caso específico de resíduos sólidos orgânicos, a digestão anaeróbia pode ser realizada de várias maneiras: sistema contínuo ou em batelada para conversão do material seco ou semiseco, sistema contínuo úmido ou a codigestão. Um exemplo de codigestão é a mistura de esgoto com resíduos alimentares, agroindustriais, culturas energéticas e dejetos suínos, gerando no final biofertilizante e biogás (MCDONALD et al., 2008).

O processo de digestão anaeróbia é realizado por reatores comumente chamados de biodigestores, biorreatores ou reatores anaeróbios, dependendo das configurações e formas de operação. Segundo Pires e Ribeiro (1992), “a crescente utilização desta tecnologia exigiu mais compreensão dos aspectos hidrodinâmicos dos reatores utilizados e, devido à maioria dos trabalhos realizados abordarem principalmente a eficiência da remoção de matéria orgânica, sólidos e outros parâmetros, evidencia-se a escassez de informações sobre as características hidrodinâmicas o/ou operacionais do sistema”.

Lübbert e Jorgensen (2001) citam que o desempenho do sistema de tratamento é alcançado pela otimização do processo, o que pode resultar na minimização dos custos das operações e processos específicos das instalações de tratamento, ou seja, para os autores a engenharia tem como objetivo aperfeiçoar os sistemas e minimizar os custos. Citam ainda, que é necessário encontrar um ponto ótimo no procedimento operacional através da dinâmica do processo, considerando as restrições e interferências inerentes ao sistema, o que resultaria na diminuição ou eliminação de problemas construtivos, operacionais ou voltados ao processo da biodegradação por microrganismos. Entretanto, não há um sistema único, sendo que os biodigestores devem ser adaptados às condições reais, levando em consideração os aspectos quantitativos (volume) e qualitativos através de parâmetros físico-químicos e biológicos dos resíduos orgânicos a serem tratados.

Em função dos aspectos mencionados como o aumento da geração e diversidade físico-químicas dos resíduos orgânicos, configurações, carga e operações de biorreatores foi desenvolvido uma nova configuração de biodigestor anaeróbio em escala piloto para o tratamento de diferentes resíduos orgânicos, que possa ser deslocado e instalado *in company*, podendo ser facilmente adaptado às condições locais e ao sistema de produção da empresa.

Este desenho de biorreator anaeróbio permite diferentes formas de operação e controle das variáveis de processo e vem ao encontro com as necessidades das empresas que pretendem aplicar essa tecnologia no tratamento de resíduos orgânicos e águas residuais. Pois, com o resultado obtido *in loco*, acredita-se poder dar suporte à construção de um sistema de tratamento definitivo, apoiado em dados mais próximos a realidade da empresa, minimizando as possibilidades de erro, tanto de engenharia quanto de processo, considerando também os aspectos ambientais, econômicos e de treinamento dos recursos humanos que estarão envolvidos na operação e controle do sistema de tratamento.

## METODOLOGIA

O trabalho constou de uma investigação a campo com visitas técnicas e uma pesquisa literária, para obtenção de parâmetros de projetos para a construção de uma nova configuração de biodigestor anaeróbio transportável em escala piloto para tratamento de resíduos sólidos orgânicos *in company*, bem como três experimentos envolvendo avaliações físico-químicas ao longo do processo. O trabalho foi dividido nas seguintes etapas:

### **ETAPA 1- Visitas Técnicas para análise de Diferentes Biodigestores**

Foram realizadas 12 visitas a produtores rurais e instalações, sendo oito de Santa Catarina e quatro no Paraná, contendo diferentes biodigestores (modelo *plug flow*, indiano chinês e UASB). Durante a visita foi realizada uma entrevista de maneira informal, onde foram questionados os seguintes itens: vantagens e desvantagens da implantação do biodigestor; quais os inconvenientes e dificuldades mais comuns de operação; aplicação e produção do biogás; aplicação do lodo, formas de melhorar a eficiência do processo.

### **ETAPA 2 - Projeto e construção um biodigestor em escala piloto**

No projeto do biodigestor levaram-se em consideração todos os aspectos construtivos e operacionais observados durante as visitas técnicas, com objetivo de aperfeiçoar o processo e evitar ou minimizar os problemas descritos pelos usuários dos biodigestores. Entre os quais se destacam: Formato; Número de tanques; Carga orgânica (carga orgânica volumétrica); Temperatura; Pressão; Homogeneização e sedimentação dos sólidos; Tempo de detenção hidráulica; Saída de gases; Descarte do lodo; Resistência mecânica à corrosão; Modo de Operação (batelada ou contínua); Forma de alimentação; Forma de Transporte.

### **ETAPA 3 - Teste mecânicos e hidráulicos**

Para testar o funcionamento mecânico e hidráulico do biodigestor, foi realizado um teste inicial na empresa Rozalcool, situada na cidade de Jacinto Machado, em Santa Catarina. O teste visou verificar o funcionamento dos equipamentos auxiliares como bomba, agitador, selo hidráulico, bem como a operacionalidade, carga e descarga, possíveis gargalos em tubulações, vedação e comandos elétricos.

### **ETAPA 4- Avaliação das condições operacionais do biodigestor em diferentes condições de alimentação e partida.**

Para avaliar as condições operacionais do sistema de tratamento proposto foi feita a instalação do biodigestor no Campus da Universidade Positivo, Curitiba – Paraná, próximo ao refeitório da universidade e do Ribeirão dos Müller, que atravessa todo o Campus. A avaliação do funcionamento do sistema foi através do monitoramento diário do sistema, onde foram avaliados os aspectos ligados à temperatura, forma de alimentação e operação da bomba, possíveis vazamentos, instalações elétricas e sistema de agitação e controle operacional. Além disso, foram feitas coletas de amostras três vezes por semana para avaliar as interferências da operação do sistema nos parâmetros físico-químicos como: pH, Sólidos Totais, Sólidos Totais Voláteis e DQO, seguindo os procedimentos descritos no APHA (2005), e alcalinidade Total e Acidez Volátil conforme Dilallo e Albertson (1961). A avaliação consistiu em três experimentos descritos a seguir:

- No primeiro experimento o biodigestor recebeu apenas a água proveniente do Ribeirão dos Müller, um rio urbano com alto grau de poluição proveniente de esgoto doméstico. Nesta fase não houve controle de temperatura, entretanto, ocorreu 400 L/d e tempo de ciclo de oito horas. Não foi possível alimentar o sistema com esgoto doméstico *in natura* em função de normas de segurança da instituição.

O Ribeirão dos Müller é um rio afluente do Rio Barigui e situa-se na região oeste da cidade de Curitiba PR. A bacia hidrográfica do Ribeirão dos Müller drena uma área de 10,29 km<sup>2</sup> e abrange uma região composta por residências, indústrias, comércios e pelo Campus da Universidade Positivo. Esse rio é classificado como Classe 3, segundo a portaria SUREHMA nº92, de 12 de maio de 1992, artigo 1º, inciso VII. Há um intenso processo de degradação da qualidade das águas do Ribeirão dos Müller, sendo percebido um odor desagradável e uma cor acinzentada, indicando, em muitos pontos, degradação anaeróbia (BREGUNCE, 2008). As características físico-químicas da água do Ribeirão dos Müller estão descritas na Tabela 1.

**Tabela 1- Características físico-químicas do Ribeirão dos Müller (BREGUNCE, 2008).**

PARÂMETRO	UN	MÉDIA	DESVIO PADRÃO
Cor	uC	26,80	$\pm 11,21$
Turbidez	UNC	46,64	$\pm 34,10$
Temperatura	°C	17,20	$\pm 2,24$
ST	mg/L	472,20	$\pm 324,80$
SST	mg/L	105	$\pm 43,10$
DQO bruta	mg/L	250,82	$\pm 186,48$
DQO filtrada	mg/L	128,29	$\pm 126,67$
pH		7,30	$\pm 0,24$
OD	mg/L	1,14	$\pm 0,94$
AV	mg/L	37,90	$\pm 19,50$
AB	mg/L	34,30	$\pm 10,70$

- No segundo experimento houve a inoculação do biodigestor com 300 L de lodo proveniente dos RALFs da SANEPAR. Também foi feito o controle de temperatura, com agitação intermitente e a alimentação foi em regime de batelada alimentada com água do Ribeirão. O volume de alimentação foi de 250 L/s e tempo de ciclo de 8 horas.
- No terceiro experimento, o biodigestor também foi inoculado lodo dos RALFs e a alimentação do sistema foi feita com água do Ribeirão misturada com 1,0 kg de resíduos triturados provenientes do Refeitório da Universidade. Nesta fase o sistema operou de forma contínua com vazão de 350 L/d, tempo de detenção hidráulica de oito horas, a temperatura constante de  $35\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  e agitação intermitente.

## RESULTADOS

### 1. Visitas técnicas

Durante as visitas observaram-se os tipos de biodigestores empregados, o funcionamento dos sistemas, as dificuldades operacionais, vantagens e desvantagens. Os pontos principais destacados foram:

- 1) Limpeza: necessidade de limpeza a cada três meses devido ao acúmulo de terra, lodo, resíduos vegetais e areia na parte inferior do mesmo (todos os modelos);
- 2) Temperatura: a produção de biogás decai consideravelmente no inverno (modelo *plug-flow*, Indiano, Chinês), no período de verão a produção de biogás é mais intensa;
- 3) Odor: a utilização do biogás para cocção de alimentos apresenta o inconveniente do cheiro desagradável em determinados períodos, além do escurecimento na parte inferior dos utensílios (modelo indiano);
- 4) Corrosão: corrosão do gasômetro pela condensação de água e pelo gás sulfídrico (os biodigestores, modelo indiano, visitados que tinham o gasômetro construído em chapa metálica sem proteção para corrosão);
- 5) Pressão: alguns produtores colocam pedra sobre o gasômetro (modelo indiano) a fim de aumentar a pressão e acúmulo de biogás. As informações destas visitas indicaram a necessidade de uma pressão interna suficiente para posterior tratamento e utilização do biogás.

Além disso, alguns produtores rurais que utilizavam biodigestores tipo *plug flow*, aplicados à biodigestão de dejetos suínos, relataram inconvenientes de assoreamento do leito, produção de biogás abaixo do esperado, vazamento de gás através do gasômetro, dificuldades de *start-up* e operação.

Também foram observados sistemas com bom desempenho, cujos problemas operacionais foram sendo resolvidos, com a implantação de sistema de aquecimento e agitação. Em visita realizada a um suinocultor do Paraná observou-se um biodigestor tipo *plug flow* produzindo biogás de forma constante, o qual é utilizado como fonte de energia, através do acionamento de um motor adaptado e um gerador. Este biodigestor apresentava algumas modificações interessantes como agitação do leito por pressurização do biogás através de uma malha quadriculada de tubos plásticos de PVC na parte inferior do biodigestor, uniformização da entrada de biomassa e agitação da mesma e manutenção da temperatura através da construção de uma estufa.

## **2. Projeto e Construção do Biodigestor**

O projeto do biodigestor resultou em um equipamento com as seguintes características: transportável, resistente, construído em aço inoxidável, com capacidade útil de carga de 1000 litros, pesando aproximadamente 380 kg, dotado de agitador tipo âncora, bomba centrífuga e dosadora para alimentação, separador de espuma, comando elétrico, resistências elétrica para aquecimento, podendo operar com uma contrapressão de 1,5 kgf/cm<sup>3</sup> e em três diferentes regimes de alimentação (batelada, batelada alimentada ou contínua).

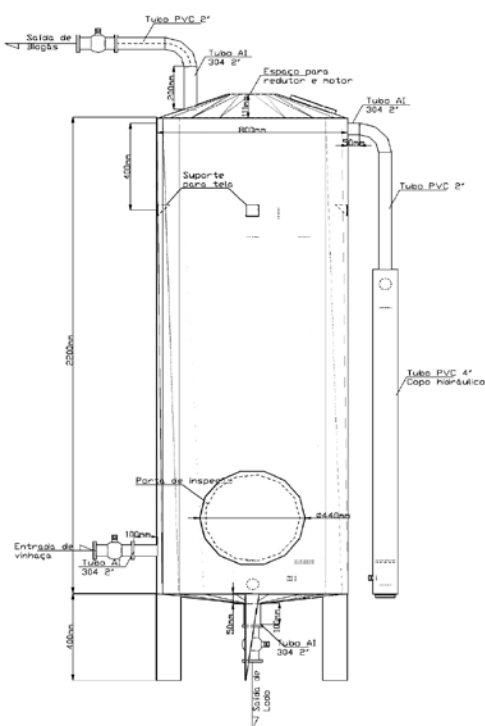
O biodigestor foi construído em três fases: Na primeira fase foi construído o corpo central do reator, formado de um cilindro calandrado de chapas de aço inox AISI 304, com espessura de 1,5 mm, com soldas específicas tipo TIG (Tungsten Inert Gas). Na segunda fase, os tubos de alimentação e saída foram medidos e ponteados (fixados através de um ponto de solda), colocados em nível e soldados ao cilindro central. Na terceira fase foram fixados os pés para sustentação do tanque com carga e as portas, que receberam atenção especial, pois deveriam resistir à pressão de 1,5 atm mais a pressão exercida pela altura do líquido (porta inferior).

Para agitação, construiu-se um agitador em forma de âncora e fixado antes da colocação da parte superior do biodigestor, pois o tamanho do mesmo não permitiria sua inserção pela porta inferior. Foram introduzidas borrachas de vedação junto ao anel superior de fixação do agitador, preso a parte inferior do biodigestor por um anel de nylon. Para controle da temperatura, foi inserida na parte superior do biodigestor uma resistência elétrica com potência de 6000 W, sendo a mesma controlada por um termostato acoplada à caixa de comandos elétricos.

Duas portas de inspeção foram colocadas no projeto, uma superior e outra inferior: a porta superior permite a carga e descarga do material inerte, cargas de substratos na operação de regime em batelada, visualização do líquido no interior do biodigestor e acesso ao suporte do moto redutor. A porta inferior foi colocada como acesso de trabalho, manutenção e limpeza. Foram também adicionados pontos de saída para coleta das amostras, prevendo a perfuração da parede do biodigestor e a colocação de um *niple* de aço inoxidável.

A Figura 1 apresenta o desenho e uma foto do biodigestor proposto.





**Figura 1 - Desenho e foto do biodigestor projetado e construído.**

### 3. Testes mecânicos e hidráulicos

Os testes iniciais foram realizados em Santa Catarina com duração de 20 dias. Nesse período não foram observadas falhas na bomba, sistema de agitação ou sistema de descarga passando pela garrafa hidráulica (copo hidráulico), que funcionou realizando a descarga em vazão igual ao da alimentação, mantendo o volume interno constante na simulação de operação em contínuo.

Para a realização do teste, o biodigestor foi alimentado com uma mistura na proporção de 50% de esterco suíno (proveniente de uma propriedade de suinocultura) e vinhaça (oriunda de arroz hidrolisado e fermentado para produção de etanol), completando todo o seu volume (1.000 L). Após 24 horas foi feita uma descarga de 200 L de efluente e duas alimentações de 100 L com vinhaça em um intervalo de 6 horas entre as alimentações, buscando reproduzir um sistema de batelada alimentada.

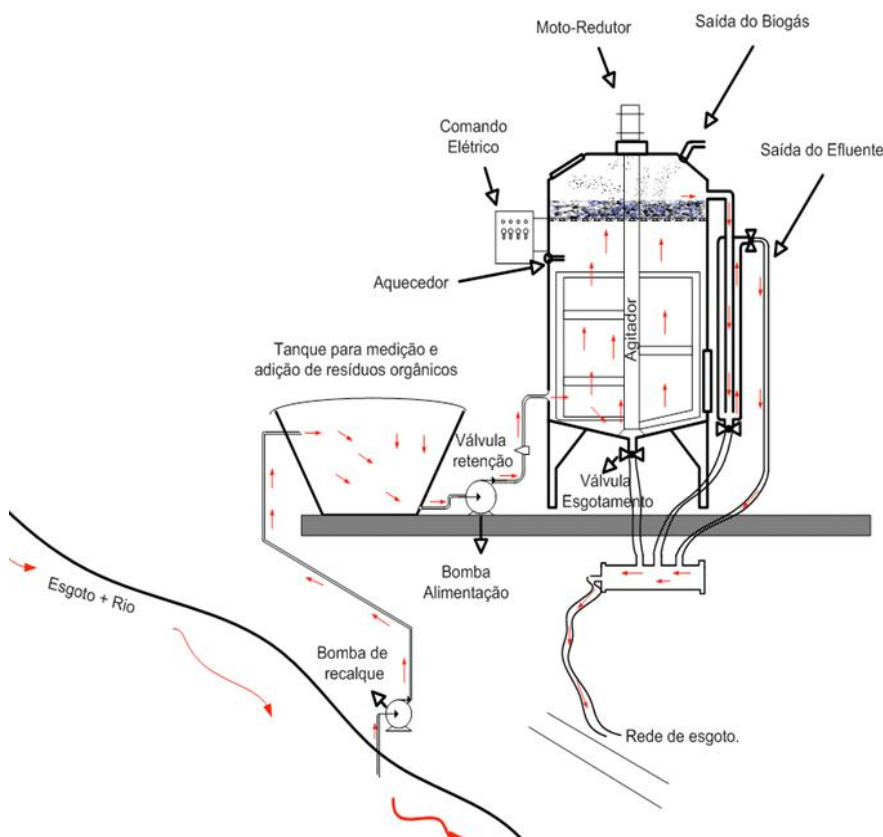
Depois de feitos todos os ajustes, mecânicos e hidráulicos foi realizado o teste do transporte do reator, por meio de um carro utilitário de pequeno porte, conforme apresenta a Figura 2. O veículo utilizado foi uma **Pick up** Strada com capacidade de carga de 500 kg.



**Figura 2 - Transporte do Biodigestor por meio de carro utilitário de pequeno porte.**

#### 4. Avaliações das condições operacionais do biodigestor em diferentes condições de alimentação e partida.

Para a avaliação das condições operacionais do biodigestor foi feita a sua instalação no Campus da Universidade Positivo, cuja instalação está apresentada na figura a seguir:



**Figura 3. Esquema da instalação do biodigestor anaeróbico em escala piloto na Universidade Positivo.**

O processo alimentação do biodigestor inicia-se pela captação da água residuária que é feita por uma bomba de recalque submersa (tipo sapo) até a caixa auxiliar ou caixa de recepção, conforme Figura 4 (A e B). Após, são adicionados os resíduos orgânicos triturados efetuando uma homogeneização manual para posteriormente alimentação, através de uma bomba dosadora (Fig. 4 C).



**Figura 4 - Sistema de alimentação do biodigestor. (A) Conjunto caixa d'água e biodigestor; (B) Caixa d'água contendo resíduo e efluente; (C) Bomba centrífuga para alimentação do biodigestor com alta vazão.**

No seu interior o líquido é agitado por um impelidor tipo turbina e mantido à temperatura constante. Na saída, o líquido passa por uma camada constituída de brita na parte superior lateral do reator para que se possa reter a espuma e, então, a saída ocorre pela tubulação que é dotada de um mecanismo para a manutenção da pressão interna chamado copo hidráulico e cujo objetivo é forçar a saída do gás metano pela parte superior do tanque, para então efetuar seu tratamento ou sua utilização adequada. Após sair do biorreator o efluente passa pela tubulação auxiliar até a rede de esgoto da cidade.

Foi instalada uma central de comandos elétricos na lateral do reator com interruptores e disjuntores necessários ao acionamento e proteção dos quatro motores auxiliares do biodigestor e um disjuntor / contactor para atender a demanda de energia da resistência elétrica instalada para aquecimento.

A instalação do biodigestor e o acesso ao fluxo de carga e descarga do produto a ser tratado estão representados na Figura 5.



**Figura 5 - Foto do Biodigestor instalado na Universidade Positivo (C) e do sistema de alimentação (D e E).**

O biodigestor dispõe ainda de uma central de comandos elétricos instalada na lateral do mesmo com interruptores e disjuntores necessários ao acionamento e proteção dos quatro motores auxiliares do biodigestor e um disjuntor / contactor para atender a demanda de energia da resistência elétrica instalada para aquecimento (Figura 6).



**Figura 6 - Quadro de comando elétrico: (A) Chave que liga a bomba dosadora de alimentação auxiliar identificada pela cor branca; (B) Chave que liga sistema de agitação identificado pela cor verde; (C) Chave que liga bomba principal identificando pela cor azul; (D) Chave que liga a bomba imersa, identificada pela cor amarela; (E) Chave que liga a resistência identificada pela cor vermelha.**



A avaliação do biodigestor após instalação no Campus da Universidade Positivo foi dividida em três experimentos, conforme observação do comportamento do mesmo em relação ao substrato, bem como as adequações mecânicas necessárias ao bom funcionamento do equipamento.

O primeiro experimento visou observar o comportamento do biodigestor à temperatura ambiente, variação compreendida entre 15 a 25°C, com agitação intermitente diária por 15 minutos a 40 rpm, alimentado apenas com água do Ribeirão, sem inoculação de lodo, considerando apenas a possibilidade de fermentação da matéria orgânica em ambiente anaeróbio e a retenção da mesma pela camada superior de brita. A alimentação foi feita diariamente através da caixa receptora em pulsos, com uma proporção de 400 L/d, sistema denominado batelada alimentada.

No segundo experimento, buscou-se corrigir as deficiências encontradas no primeiro experimento. A resistência foi ligada e controlada por um termostato acoplado à caixa de comando elétrica do biodigestor, regulando-se a temperatura a 35°C  $\pm$  2 °C, temperatura esta compreendida dentro da faixa adequada para o desenvolvimento de microrganismos mesófilos, também foi feita a agitação do sistema e a operação continuou por batelada alimentada com volume de 250 L/d e tempo de ciclo de 12 horas. Os resultados do monitoramento do sistema nos dois experimentos estão apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2– Resultados obtidos durante os dois primeiros experimentos de avaliação da operação do biodigestor.**

		PRIMEIRO EXPERIMENTO		SEGUNDO EXPERIMENTO	
PARÂMETRO	UN	ENTRADA	SAÍDA	ENTRADA	SAÍDA
pH		7,50 $\pm$ 0,24	7,42 $\pm$ 0,22	7,52 $\pm$ 0,17	7,44 $\pm$ 0,20
AV(mg/L)	mg/L	27,96 $\pm$ 11,97	31,45 $\pm$ 9,57	22,08 $\pm$ 8,11	25,35 $\pm$ 10,98
AT (mg/L)	mg/L	132,31 $\pm$ 26,63	167,91 $\pm$ 11,42	149,08 $\pm$ 8,61	135,93 $\pm$ 25,81
ST (mg/L)	mg/L	528,54 $\pm$ 185,53	549,36 $\pm$ 167,26	399,41 $\pm$ 205,77	374,09 $\pm$ 130,18
STV (mg/L)	mg/L	291,55 $\pm$ 137,42	291,28 $\pm$ 129,58	181,78 $\pm$ 119,98	176,73 $\pm$ 104,70
DQO (mg/L)	mg/L	528,57 $\pm$ 96,89	549,36 $\pm$ 77,15	225,28 $\pm$ 192,99	187,18 $\pm$ 120,86

Em função dos dados apresentados na Tabela 2, pode-se verificar que no primeiro experimento não houve eficiência de tratamento na remoção de matéria orgânica, o que indica que a biomassa presente não se desenvolveu ou não estava ativa. Neste experimento não houve controle de temperatura e inoculação do reator, duas condições importantíssimas para a melhoria do desempenho de sistemas anaeróbios de tratamento. Antes de finalizar esta etapa foi feita uma avaliação da biomassa presente através da análise de sólidos presentes no lodo do fundo do reator e obteve uma média de ST igual a 2.911,33  $\pm$  522,54 mg/L e STV igual a 1322,66  $\pm$  352,67 mg/L, muito baixa quando comparada com a literatura.

Assim, para o segundo experimento foi feita a inoculação do reator, com objetivo de acelerar o processo de biodegradação. Para isto, adicionou-se 300 L de lodo da unidade da SANEPAR do bairro Santa Quitéria, o que corresponde a 30% da capacidade do biodigestor. Neste experimento o tempo de ciclo também foi de 12 horas, porém a alimentação foi de 250 L/d, em batelada alimentada.

Os resultados obtidos mostram uma eficiência na remoção de matéria orgânica em DQO de aproximadamente 38,1%, sendo que, praticamente, não houve redução na remoção de ST e STV. Dois problemas operacionais foram detectados: o primeiro foi quanto à velocidade ascensional que era muito elevada, em função da bomba de alimentação; e o segundo quanto ao controle de temperatura, que apresentou defeito, oscilando muito e alcançando temperaturas acima de 50° C. Possivelmente, isto impediu a estabilização do sistema e, possivelmente, acelerou o arraste da biomassa do sistema.

Para o terceiro experimento foram corrigidas as questões operacionais já relatadas e foi modificada a forma de alimentação do sistema, passando a ser alimentado de forma contínua com vazão de 350 L/d. Também houve a

inoculação do reator com 200 L de lodo, correspondendo a 20% do volume do biodigestor, e a introdução de resíduos alimentares do refeitório universitário na proporção de 1 kg/d. A temperatura e o agitador foram sincronizados para evitar a formação de gradiente de temperatura e o sistema foi mantido a temperatura de a temperatura a  $35^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ .

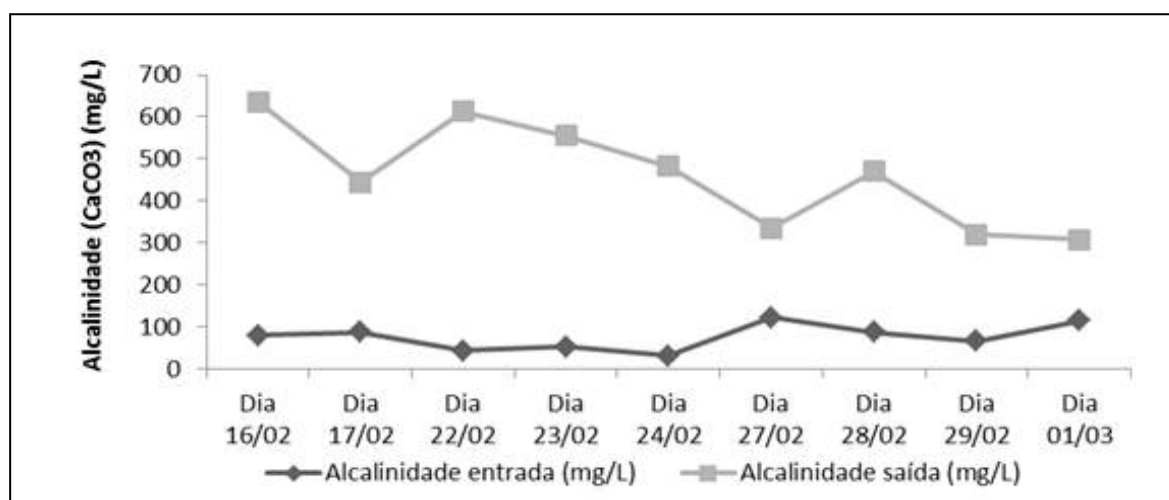
No terceiro experimento, diferente dos dois primeiros, alcançou uma eficiência de tratamento na remoção de matéria orgânica de 56,76% e uma condição de tamponamento do meio. Também se observou a estabilidade do sistema, indicando que as modificações nas condições alcançaram os objetivos. Os resultados obtidos no terceiro experimento estão apresentados na Tabela 3.

**Tabela 3– Resultados obtidos durante o terceiro experimento de avaliação da operação do biodigestor**

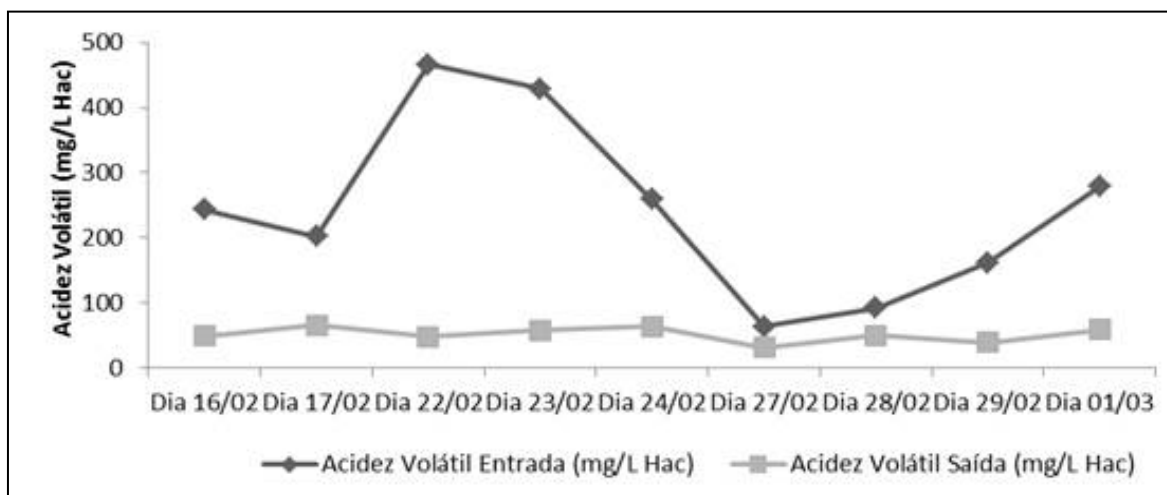
TERCEIRO EXPERIMENTO			
PARÂMETRO	UN	ENTRADA	SAÍDA
pH		$5,07 \pm 0,52$	$6,97 \pm 0,42$
AV(mg/L)	mg/L	$243,86 \pm 128,86$	$50,86 \pm 10,69$
AT (mg/L)	mg/L	$24,98 \pm 12,09$	$336,63 \pm 116,76$
ST (mg/L)	mg/L	$1.543,70 \pm 784,30$	$1.136,30 \pm 315,38$
STV (mg/L)	mg/L	$1.308,39 \pm 771,51$	$712,10 \pm 277,16$
DQO (mg/L)	mg/L	$2.855,72 \pm 1.262,57$	$1.235,56 \pm 530,33$

O fato do pH de entrada do terceiro experimento estar ácido indica uma atividade de hidrólise e acidogênese na caixa de recepção, pois, os resíduos alimentares, segundo Bouallagui et al. (2005), são facilmente metabolizados e acidificados, sendo um dos critérios que merece atenção, face à alta biodegradabilidade destes compostos. Por outro lado, considerando a caixa de recepção como a primeira fase da biodigestão, o pH de entrada dos resíduos no biodigestor no terceiro experimento aproxima-se dos valores descritos por Mohan e Bindhu (2008), com valores mais recomendados para esta etapa, variando o pH entre 5 e 6.

No que se refere ao pH de saída, o valor de 6,97 remete ao poder de tamponamento e a atividade das bactérias metanogênicas (DEUBLEIN e STEINHAUSER, 2008), pois se pH tivesse baixado, muito provavelmente as bactérias metanogênicas teriam encontrado uma condição limite no seu desenvolvimento, pois se recomenda um valor de pH próximo a neutralidade ( $\text{pH} = 6,7 - 7,5$ ) (DEUBLEIN e STEINHAUSER, 2008). Esta condição citada pelos autores pode ser confirmada pelos resultados obtidos de alcalinidade e ácidos voláteis, cujos resultados estão apresentados nas figuras 7 e 8, respectivamente.

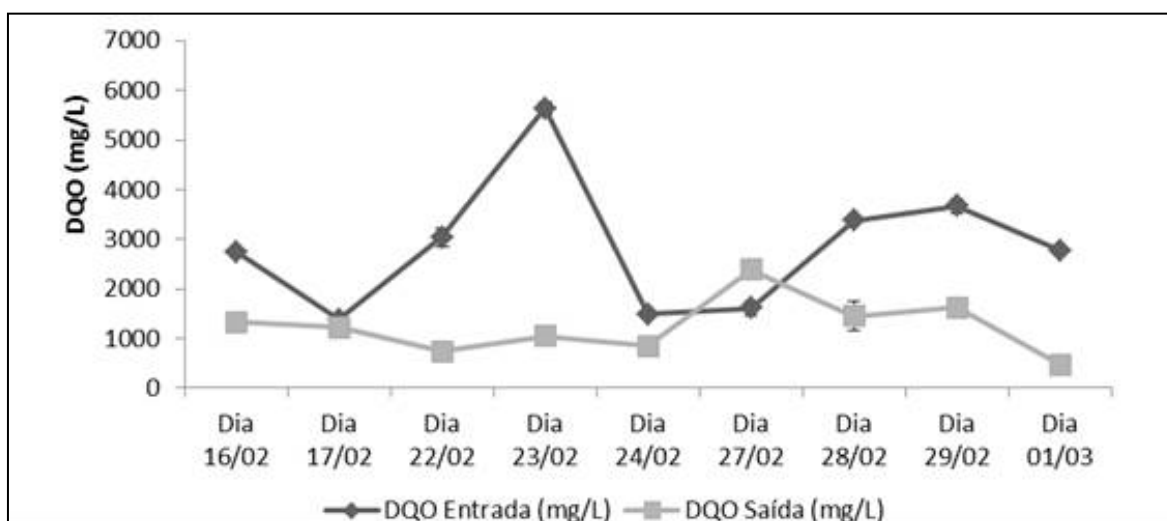


**Figura 7 – Valores de alcalinidade total na entrada e saída do biodigestor durante o terceiro experimento.**



**Figura 8- Valores de ácidos voláteis na entrada e saída do biodigestor durante o terceiro experimento**

A matéria orgânica presente na entrada e saída do reator está apresentada na Figura 9, onde se pode observar que ocorreu uma grande variação na entrada, em função da introdução dos resíduos do refeitório. Entretanto, esta variação foi absorvida pelo sistema, principalmente no dia 23/02, quando ocorreu um sobrecarga, alcançando um DQO de aproximadamente 6000 mg/L, mesmo assim, a DQO de saída permaneceu próximo de 1000 mg/L.



**Figura 9 - Matéria Orgânica em DQO na entrada e saída durante a operação do biodigestor no terceiro experimento.**

Cabe destacar, também, as eficiências alcançadas estão diretamente relacionadas: à temperatura, que neste sistema foi mantida constante em  $35^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ . Pois, tem influencia no metabolismo microbiano e afeta as taxas de oxidação das matérias carbonáceas e nitrogenadas e, nessa faixa de temperatura, a taxa de degradação da matéria orgânica é maior; à condição de operação, que foi de forma contínua e com agitação intermitente; e a inoculação do reator, que tem influência diretamente na partida do sistema.

## CONCLUSÃO

O modelo proposto foi executado conforme projetado, o que resultou em um biodigestor robusto e transportável, com capacidade de metabolizar a matéria orgânica através da biodigestão anaeróbia. Foram avaliados todos os interferentes na operação e desempenho do sistema.

No que diz respeito à formatação final o projeto resultou em um equipamento com as seguintes características: transportável, resistente, construído em aço inoxidável, com capacidade útil de carga de 1000 litros, pesando aproximadamente 380 kg, dotado de agitador tipo âncora, bomba centrífuga e dosadora para alimentação, separador de espuma, comando elétrico, resistências elétrica para aquecimento, podendo operar com uma contrapressão de 1,5 kgf/cm<sup>3</sup> e em três diferentes regimes de alimentação batelada, batelada alimentada e contínuo.

Quanto à operação do sistema e monitoramento, foi verificado que o controle de temperatura e a inoculação do sistema são essenciais. O primeiro e o segundo experimento serviram como testes para avaliar o modo de operação dos sistemas e determinar os ajustes necessários para melhorar o desempenho, que foi confirmado pelos resultados obtidos no terceiro experimento, onde se alcançou eficiência de remoção de matéria orgânica de 56,76% em DQO e tamponamento do meio. Também se verificou a estabilização do sistema.

Assim, conclui-se que esta nova configuração está apta para ser utilizada como piloto *in company* e que os problemas operacionais são de fácil solução e podem ser adequadas as condições que as empresas necessitam, servindo com apoio ao projeto, construção e operação dos sistemas definitivos ou em escala real.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ANDERSON, G. K., YANG, G. Determination of bicarbonate and total volatile acid concentration in anaerobic digesters using a simple titration. **Water Environment Research**, v. 64, n. 1, p. 53-59, jan.-fev., 1992.
2. APHA - Standard methods for the examination of water and wastewater. 21ª edição. Washington: American Public Health Association, 2005.
3. BOUALLAGUI, H., TOUHAMI, Y., CHEIKH, R. B., HAMDI, M. Bioreactor performance in anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes. **Process Biochemistry**, v. 40, n. 3-4, p. 989-995, mar., 2005.
4. BREGUNCE, D. T. **Avaliação de sistemas de leito cultivado com a macrófita *Sagittaria montevidensis* Cham. e Schltdl. para tratamento de águas urbanas poluídas com águas residuárias** Estudo de caso - Ribeirão dos Müller. Dissertação: Gestão Ambiental, Universidade Positivo, Curitiba, 2008.
5. DEUBLEIN, D., STEINHAUSER, A. **Biogas from Waste and Renewable Resources - An Introduction**. Weinheim: WILEY-VCH, 2008.
6. DILALLO, R., ALBERTSON, O. E. Volatile acids by direct titration. **Journal Water Pollution Control Federation**, v. 33, n. 4, p. 356-365, abr., 1961.
7. LÜBBERT, A., JORGENSEN, S. B. Bioreactor performance: a more scientific approach for practice. **Journal of Biotechnology**, v. 85, n. 2, p. 187 - 212, fev., 2001.
8. MCDONALD, T., ACHARI, G., ABIOLA, A. Feasibility of increased biogas production from the co-digestion of agricultural, municipal, and agroindustrial wastes in rural communities. **Journal of Environmental Engineering and Science**, v. 7, n. 4, p. 263-273, abr., 2008.
9. PIRES, E. C.; RIBEIRO, A. P. **Avaliação preliminar do comportamento hidrodinâmico de reatores anaeróbios de escoamento ascendente e manta de lodo**. Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 1992.