

UNIVERSIDADE CATÓLICA DOM BOSCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU* EM
CIÊNCIAS AMBIENTAIS E SUSTENTABILIDADE AGROPECUÁRIA

TRATAMENTO TERMOFÍLICO DE VINHAÇA EM REATOR
UASB COM LEITO FIXO DE CALCÁRIO

Autora: Sheyla Thays Vieira Barcelos
Orientadora: Dra. Marney Pascoli Cereda

Campo Grande
Mato Grosso do Sul
Novembro - 2018

UNIVERSIDADE CATÓLICA DOM BOSCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO STRICTO SENSO
CIÊNCIAS AMBIENTAIS E SUSTENTABILIDADE AGROPECUÁRIA

Tratamento termofílico de vinhaça em reator UASB com leito
fixo de calcário

Autora: Sheyla Thays Vieira Barcelos
Orientadora: Dra. Marney Pascoli Cereda

“Dissertação apresentada, como parte das exigências para a obtenção do título de MESTRE EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS E SUSTENTABILIDADE AGROPECUÁRIA, no Programa de Pós-graduação em *Stricto Sensu* em Ciências Ambientais e Sustentabilidade Agropecuária da Universidade Católica Dom Bosco - Área de Concentração: Sustentabilidade Ambiental e Produtiva aplicada ao Agronegócio e Produção Sustentável.”



Campo Grande
Mato Grosso do Sul
Novembro de 2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Biblioteca da Universidade Católica Dom Bosco - UCDB, Campo Grande, MS, Brasil)

B242t Barcelos, Sheyla Thays Vieira

Tratamento termofílico de vinhaça em reator UASB com
leito fixo de calcário / Sheyla Thays Vieira Barcelos;
orientadora Marney Pascoli Cereda.-- 2018.

Dissertação (mestrado em ciências ambientais e sustentabilidade
agropecuária) - Universidade Católica Dom Bosco, Campo
Grande, 2018)

Inclui bibliografia

1. Vinhaça - Tratamento. 2. Agroindústria canavieira.
3. Resíduos agroindustriais. 4. Gás - Produção. 5.
Reator UASB. I.Cereda, Marney Pascoli. II. Título.

CDD: 660.2

Tratamento termofílico de vinhaça em reator UASB com leito fixo de calcário

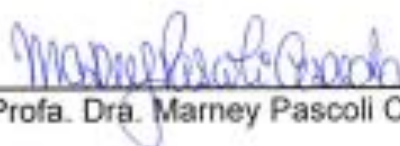
Autor(a): Sheyla Thays Vieira Barcelos

Orientador(a): Profa. Dra. Marney Pascoli Cereda

TITULAÇÃO: Mestre em Ciências Ambientais e Sustentabilidade Agropecuária

Área de Concentração: Sustentabilidade Ambiental e Produtiva

APROVADA em 13 de novembro de 2018.



Profa. Dra. Marney Pascoli Cereda - UCDB



Prof. Dr. Fernando Jorge Corrêa Magalhães Filho - UCDB



Profa. Dra. Edinéia Lazarotto Formagini - Uniderp

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus, por ter me abençoado, protegido e confortado durante todos os meus anos de vida e, principalmente, nos piores momentos.

Aos meus pais, Jorge Wilson Larea Barcelos e Ruth Vieira de Paula Barcelos, pela compreensão, apoio, companheirismo e todo amor que me dedicaram durante esses dois anos e minhas irmãs Magda Larissa Vieira Barcelos, Evellyn Cristina Vieira Barcelos e Lais Vieira Cardoso por todo tempo dedicado aos meus ensaios de apresentações, leituras de textos e lamentações.

A professora doutora Marney Pascoli Cereda pela orientação, auxílio (até financeiro), dedicação nos momentos finais de correção e paciência.

Agradeço grandemente aos professores doutores Edinéia Lazarotto Formagini e Fernando Jorge Corrêa Magalhães Filho que se disponibilizaram a participar da minha banca e, com muito louvor, souberam contribuir com minha pesquisa, além de toda ajuda, até mesmo por mensagens de celular.

Ao Aluno de iniciação científica Igor Felipe Lima Ferreira por toda ajuda nas análises laboratoriais, desenvolvimento da pesquisa e companheirismo nos feriados, fins de semana, férias, até mesmo dia dos pais.

Aos grandes amigos adquiridos durante os anos de pesquisa no CeTeAgro, Carla Rodrigues, Beatriz Santos, Vitor Hugo, Jeniffer Narcisa, Ismael Tomielis, Juliane Gonçalves e todos os outros, por compartilharem comigo todas as angústias vividas nesses dois anos e, também, todas as vitórias conquistadas.

Agradecimentos especiais ao meu querido amigo Demeciano Arce Neto, por ter cuidado dos meus “filhos” reatores nos momentos em que estive ausente.

À Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa de estudos Programa de Suporte à Pós-graduação de Instituições de Ensino Particulares e Comunitárias (PROSUC).

A todos da família, em especial minha avó Maria Teixeira, que em suas orações pedia para minha pesquisa dar certo.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE TABELAS	v
LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE ABREVISTURAS.....	vii
RESUMO.....	viii
ABSTRACT	ix
INTRODUÇÃO	1
OBJETIVOS	4
OBJETIVO GERAL	4
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
Cana-de-açúcar (<i>Saccharum officinarum</i>).....	5
Usinas sucroalcooleiras	6
A vinhaça.....	9
Digestão anaeróbia	10
Digestão anaeróbia em sistemas de reatores	12
Leito fixo como elemento de estabilidade na digestão anaeróbia	15
Partida de reatores anaeróbios	16
Digestão anaeróbia da vinhaça	19
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	21
CAPÍTULO I: Partida de biorreator UASB com leito fixo de calcário operando na faixa termófila utilizando vinhaça como substrato	25
RESUMO.....	26
INTRODUÇÃO	27

MATERIAIS E MÉTODOS	31
RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
CONCLUSÃO	44
REFERÊNCIAS.....	44
NORMAS DA REVISTA CIENTÍFICA	49

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1: Composição química da vinhaça provenientes de diferentes tipos de mosto e as referências da literatura.....	11
Capítulo I	
Tabela 1 - Caracterização da vinhaça bruta conforme a literatura.....	28
Tabela 2 - Caracterização físico-química do esterco bovino diluído utilizado como fonte de inóculo e da vinhaça utilizada como substrato.....	32
Tabela 3 - Etapas da partida dos reatores A e B, com aumento gradual da temperatura, carga orgânica e redução do Tempo de Detenção Hidráulico (TDH).....	36
Tabela 4 – Monitoramento da partida dos reatores A e B com aumento gradual da temperatura e carga orgânica e redução do Tempo de Residência Hidráulico (TDH) (média de 3 repetições)	41

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1 - Mapa do percentual de área total de cana-de-açúcar por unidade da federação.....	06
Figura 2: Estrutura física de uma usina.....	07
Figura 3: Etapas da digestão anaeróbia de matéria orgânica.....	12
Figura 4: Esquema de um reator UASB – Upflow Anaerobic Sludge Blanket.....	14
Capítulo I	
Figura 1. Esquema dos reatores utilizados com suas respectivas estruturas.....	33
Figura 2. Perfil da produção de gás durante a estabilização do inoculo de esterco bovino em reatores UASB e decaimento de DQO.....	38
Figura 3: Comportamento do rendimento de biogás diante do aumento da carga orgânica e mudança de temperatura, na fase de aclimação.....	40
Figura 4: Influência da aclimação sobre os sólidos totais e sólidos totais voláteis durante a partida dos reatores.....	43

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

A.C. – Antes de Cristo

AV/AI – Acidez Volátil / Alcalinidade Intermediária

AV/AT – Acidez Volátil / Alcalinidade Total

AV – Acidez Volátil

AT – Acidez Total

BIOSUL – Associação dos Produtores de Bioenergia de Mato Grosso do Sul

CH₄ - Metano

cm – Centímetros

CNP-IAA – Conselho Nacional de Petróleo e Instituto de Açúcar e Alcool

CO – Monóxido de Carbono

CO₂ – Dióxido de Carbono

COV – Carga Orgânica Volumétrica

CTC – Centro de Tecnologia Canavieira

DA – Digestão anaeróbia

DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio

DQO – Demanda Química de Oxigênio

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

FA – Fase de Aclimação

FP – Fase de Partida

FT – Fase de Testes

H₂S – Ácido Sulfídrico

H₂SO₄ – Ácido Sulfúrico

g.L⁻¹ – Gramas / Litros

INPM – Instituto de Pesos e Medidas

K – Potássio

L – Litros

LF – Leito Fixo

m – Metros

mm - Milímetros

N – Nitrogênio

NaOH – Hidróxido de Sódio

NH₃ - Amônia

P - Fósforo

pH – Potencial Hidrogeniônico

PET - Polietileno Terephthalato

PVC – Policloreto de Vinila

SO₄ – Sulfato

ST – Sólidos Totais

STF – Sólidos Totais Fixos

STV – Sólidos Totais Voláteis

t/m³ – Toneladas / Metros cúbicos

TDH – Tempo de Detenção Hidráulico

UASB - Upflow Anaerobic Sludge Blanket

USDA – Departamento de Agricultura dos Estados Unidos

US\$ - Dólares

RESUMO

Nos centros urbanos, a disposição e tratamento dos resíduos sólidos e líquidos despertam preocupação, pois afetam grande número de pessoas. Uma possibilidade são as soluções centralizadas, como o caso das estações de tratamento de água, esgoto e lixo. Por outro lado, a área rural, com baixa concentração humana, atrai soluções de tecnologias descentralizadas. Nas agroindústrias, como as sucroalcooleiras, a quantidade de resíduos gerados é diretamente proporcional ao volume de produção. A vinhaça gerada no processo de destilação, tanto do etanol combustível como na produção de aguardente, logo se transformou em grande problema, porém, atualmente é destinada à fertirrigação, que não compromete a química e a microbiologia do solo, desde que dentro dos limites estabelecidos para cada tipo e uso de solo. A digestão anaeróbia se tornou uma possibilidade interessante para as usinas sucroalcooleiras, pois ao passo que remove a carga orgânica da vinhaça, aumenta proporcionalmente os minerais do efluente e aumenta seu pH a níveis de neutralidade, podendo ainda produzir biogás que pode ser convertido em energia excedente e comercializada. Entretanto, a vinhaça apresenta outro desafio, além da carga orgânica superior ao do esgoto doméstico, possui baixo teor proteico que acarreta baixo poder tamponante, ocasionando frequentes instabilidade no sistema, o que exige um monitoramento permanente. Neste caso, a produção de gás atenderia a outros usos como os equipamentos movidos a GLP da própria usina, empilhadeiras, permitiria manter um piloto para iniciar as fornalhas e além disso poderia ser usado para aquecer esteiras e secar o bagaço usado como combustível em toda a usina. Ajustando-se a digestão anaeróbia ao meio rural, utilizou-se esterco bovino como inóculo e pedras de calcário como leito fixo que, ao ser gradativamente dissolvido, ajusta o pH sem necessidade de dosador de agente alcalinizante. Fazendo uso da vinhaça como substrato, a pesquisa avaliou a partida e estabilidade da digestão anaeróbia na faixa termófila, uma vez que o resíduo segue para a fertirrigação com temperatura entorno de 60°C. Os resultados mostram que o esterco diluído produziu 0,11 Lgás.gDQOconsumido⁻¹ aos 48 dias da fase de estabilização, que durou 72 dias, terminando com o DQO do lodo em 8,4 gO₂.L⁻¹. Durante a aclimatação do inóculo, o TDH foi ajustado para 4 dias, a máxima carga orgânica de vinhaça para 1,70 gDQO.L⁻¹, a relação alcalinidade total/acidez volátil variou entre 0,14 e 0,86, de forma que o pH permaneceu entre 6,6 e 8,3, o que demonstra os reatores resistiram bem às variações de carga e ao aumento de temperatura. No mesmo período, a média de produção de gás foi de 0,13 Lgás.gDQO⁻¹ consumido, o que é considerado como adequado para a partida.

Palavras-chave: Estabilização, Esterco bovino, Carga orgânica, Produção de gás, Agroindústrias, Sucroalcooleiras.

ABSTRACT

In urban centers, the disposal and treatment of solid and liquid wastes are of concern as they affect large numbers of people. One possibility is centralized solutions, such as in the case of water, sewage and waste treatment plants. On the other hand, the rural area, with low human concentration, attracts solutions of decentralized technologies. In agro-industries, such as sugar-alcohol, the amount of waste generated is directly proportional to the volume of production. The vinasse generated in the distillation process, both from ethanol fuel and in the production of brandy, soon became a major problem, however, it is currently destined to fertirrigation, which does not compromise soil chemistry and microbiology, provided that within the established limits for each type and use of soil. Anaerobic digestion has become an interesting possibility for sugarcane mills, since it removes the organic load from the vinasse, proportionally increases the minerals of the effluent and increases its pH to levels of neutrality, and can also produce biogas that can be converted into surplus energy and marketed. However, the vinasse presents another challenge, besides the organic load superior to that of the domestic sewage, has low protein content that causes low buffering power, causing frequent instability in the system, which requires a permanent monitoring. In this case, gas production would meet other uses such as LPG-powered equipment from the plant itself, forklifts, would allow a pilot to be kept to start the furnaces and could also be used to heat mats and dry the bagasse used as fuel throughout the power plant. By adjusting the anaerobic digestion to the rural environment, bovine manure was used as inoculum and limestone as a fixed bed which, when gradually dissolved, adjusted the pH without the need of an alkalizing agent. Using the vinasse as substrate, the research evaluated the starting and stability of the anaerobic digestion in the thermophilic range, once the residue goes to the fertirrigation with temperature around 60°C. The results show that the diluted manure produced 0.11 Lg.gDQO-1 at 48 days of the stabilization phase, which lasted for 72 days, ending with the COD of the sludge at 8.4 gO₂.L-1. During acylation of the inoculum, the TDH was adjusted to 4 days, the maximum organic vinasse load to 1.70 gDQO.L-1, the total alkalinity / volatile acidity ratio varied between 0.14 and 0.86, so that the pH remained between 6.6 and 8.3, which demonstrates that the reactors were able to withstand well the variations in charge and temperature increase. In the same period, the gas production average was 0.13 Lgás.gDQO-1 consumed, which is considered suitable for starting.

Key words: Stabilization, bovine manure, Organic load, Gas production, Agro-industries, Sugar-alcohol.

INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior processador mundial no complexo sucroalcooleiro, exercendo liderança na produção da matéria-prima cana-de-açúcar, com processamento de 630 milhões de toneladas na safra 2014/2015. Com isso, o país assume também a primeira posição no ranking em produção de açúcar, e o segundo lugar no segmento do etanol, perdendo apenas para os Estados Unidos que produz álcool a partir do amido de milho (UNICA, 2016).

A produção brasileira está concentrada na Região Centro-Sul, destacando o Estado de São Paulo como maior produtor do país (MAPA, 2017). Segundo a Associação dos Produtores de Bioenergia de Mato Grosso do Sul (BIOSUL, 2013), no estado, as 22 usinas de açúcar e álcool em funcionamento processam 47 milhões toneladas de cana-de-açúcar, gerando um total de 1,9 bilhões de litros de etanol.

A vinhaça é um subproduto originado na destilação do caldo da cana-de-açúcar fermentado durante a fabricação do álcool. De acordo com dados da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2005) a cada litro de álcool produzido são gerados de 12 a 15 litros de vinhaça.

A carga poluidora varia em função das características da usina e da eficiência do processo de produção, mas o efluente tem elevado conteúdo orgânico que pode atingir Demanda Química de Oxigênio (DQO) em concentrações acima de 100 g.L⁻¹, podendo se tornar poluidor diante do mau uso. O pH permanece próximo a 4,5 enquanto a temperatura de saída ao redor de 90°C. Apresenta elevado potencial fertilizante em razão dos teores de nitrogênio, fósforo e potássio, mas com baixo poder tamponante (Ribas & Cereda, 2003).

Até o final da década de 70, a vinhaça era simplesmente lançada nos mananciais superficiais, principalmente nos cursos d'água. Como efeitos dessa prática, a proliferação de microrganismos esgotava o oxigênio dissolvido na água, destruindo a

flora e a fauna aquática. A Portaria nº 323 do Ministério do Interior (BRASIL, 1978) proibiu a prática de lançamento da vinhaça nos corpos hídricos.

Após comprovação científica de que seu efeito em dosagem adequada não acidifica o solo, mas até aumentava sua alcalinidade, a vinhaça passou a ser utilizada como fertilizante de maneira cada vez mais intensa. Sua utilização in natura, através da fertirrigação em quantidades racionais, apresenta efeitos positivos sobre a produtividade agrícola, além de diminuir a poluição de rios e mananciais. Os efeitos poluidores da vinhaça quando disposta no solo podem ser minimizados com prévio tratamento, visando posterior descarte (RIBAS, 2006), mas Fuess & Garcia (2014) ressaltam que não se deve esquecer as preocupações ambientais associadas à vinhaça de irrigação.

Dependendo do processo, o tratamento da vinhaça pode resultar no aproveitamento da carga orgânica para a geração de energia térmica, sem prejuízo da fração mineral, que é a que exerce efeito sobre a fertilidade do solo e nutrição vegetal. Apesar destas vantagens da fertirrigação, a redução da carga orgânica poderia ser obtida por digestão anaeróbia, sem prejuízo do efeito fertilizante e ainda com redução da acidez que caracteriza a vinhaça (RIBAS et al., 2010).

Além disso, se for para tratar o resíduo líquido, a digestão anaeróbia requer menor consumo energético que as tecnologias aeróbias, com a vantagem de gerar energia do biogás. Ambas podem ser operadas em temperatura ambiente, mas a digestão anaeróbia em faixa termófila apresenta vantagens de maior rendimento de processo e rapidez. Neste caso, para alcançar a faixa termófila há necessidade de aquecimento por meio da combustão de biogás gerado, resultando assim em aumento de custos do tratamento (CHERNICHARO, 1997) e perda da vantagem competitiva referente a outros tipos de tratamento.

O caso específico da vinhaça difere dos demais resíduos líquidos porque, nas condições da usina, a vinhaça é gerada a 90°C ou acima, mas para ser usada em fertirrigação há necessidade de que seja resfriada a 60°C ou abaixo, o que faz da digestão anaeróbia em condição termófila (55°C) uma opção única para aproveitar a temperatura sem gasto energético.

A digestão anaeróbia é um processo de dois estágios. No primeiro, um grupo de bactérias facultativas e anaeróbias, as formadoras de ácidos ou fermentativas, converte a matéria orgânica complexa, como carboidratos e lipídios, em derivados mais simples, principalmente em ácidos voláteis. No segundo estágio ocorre a

conversão dos ácidos orgânicos, monóxido de carbono e hidrogênio em metano e gás carbônico reduzindo a acidez livre, fase essa considerada mais lenta que a primeira. A conversão é efetuada por um grupo especial de bactérias, as metanogênicas, as quais são estritamente anaeróbias e exigentes em pH. A maior parte do material orgânico biodegradável presente no despejo é convertida em biogás com cerca de 60 a 90 % de metano, que é separado ainda da fase líquida e retirado do reator.

Este sistema com tratamento biológico pode ser considerado de baixo custo de implantação e operação, quando comparado a outras tecnologias, embora de elevado investimento. O processo pode ser aplicado a reatores que admitem alta taxa que com a imobilização da biomassa, maximiza o tempo de residência celular e minimiza o tempo de detenção hidráulica.

Fuess et al. (2017), reforçam a argumentação de que a maneira mais adequada para o manejo da vinhaça em destilarias de cana-de-açúcar é a digestão anaeróbia, pois com a produção de biogás pode-se alcançar adequação ambiental e a recuperação da bioenergia. No entanto, Tomielis, Barcelos e Cereda (2017), lembram que a técnica é pouco utilizada nas destilarias brasileiras, uma vez que é difícil justificar o custo de implantação quando a fertirrigação já está implantada, mas a pesquisa mostra que o bioprocessamento pode até melhorar a qualidade da vinhaça para ser usada como fertilizante e o biogás gerado pode ser aproveitado na partida das fornalhas, secagem do bagaço antes da queima, uso em empilhadeiras e geração de energia.

Neste contexto, diversas vertentes sobre aspectos de tratamentos de resíduos sólidos e líquidos em usinas sucroalcooleiras ainda restam ser estabelecidos, e como tema de trabalho optou-se avaliar a faixa termófila do sistema de tratamento da vinhaça por meio de bioprocessos.

OBJETIVOS

OBJETIVO GERAL

Avaliar a eficiência da digestão anaeróbia de vinhaça de usina sucroalcooleira em reator tipo UASB com leito fixo de calcário operando em faixa termófila.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Avaliar a partida e estabilidade de sistema biorreator UASB com leito fixo de calcário, inoculado com esterco bovino utilizando vinhaça de caldo como substrato.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*)

A cana-de-açúcar tem centro de origem na Nova Guiné, de onde o cultivo expandiu-se para as Ilhas Salomão, Novas Hébridas, Nova Caledônia, Indonésia, Filipinas e Norte da Índia, de onde foi levada para o continente americano na primeira metade do século XVI (GALLOWAY, 1990).

Constitui em um dos principais cultivos em nível mundial, cultivada em mais de 100 países. Apesar desta distribuição, 75% da produção está concentrada em quatro países, entre os quais o Brasil, que é o maior produtor mundial, seguido por Austrália, China e Colômbia (FAOSTAT, 2014).

No Brasil, a produção de cana-de-açúcar se concentra na região Sudeste, Centro-Oeste e Nordeste (Figura 1).

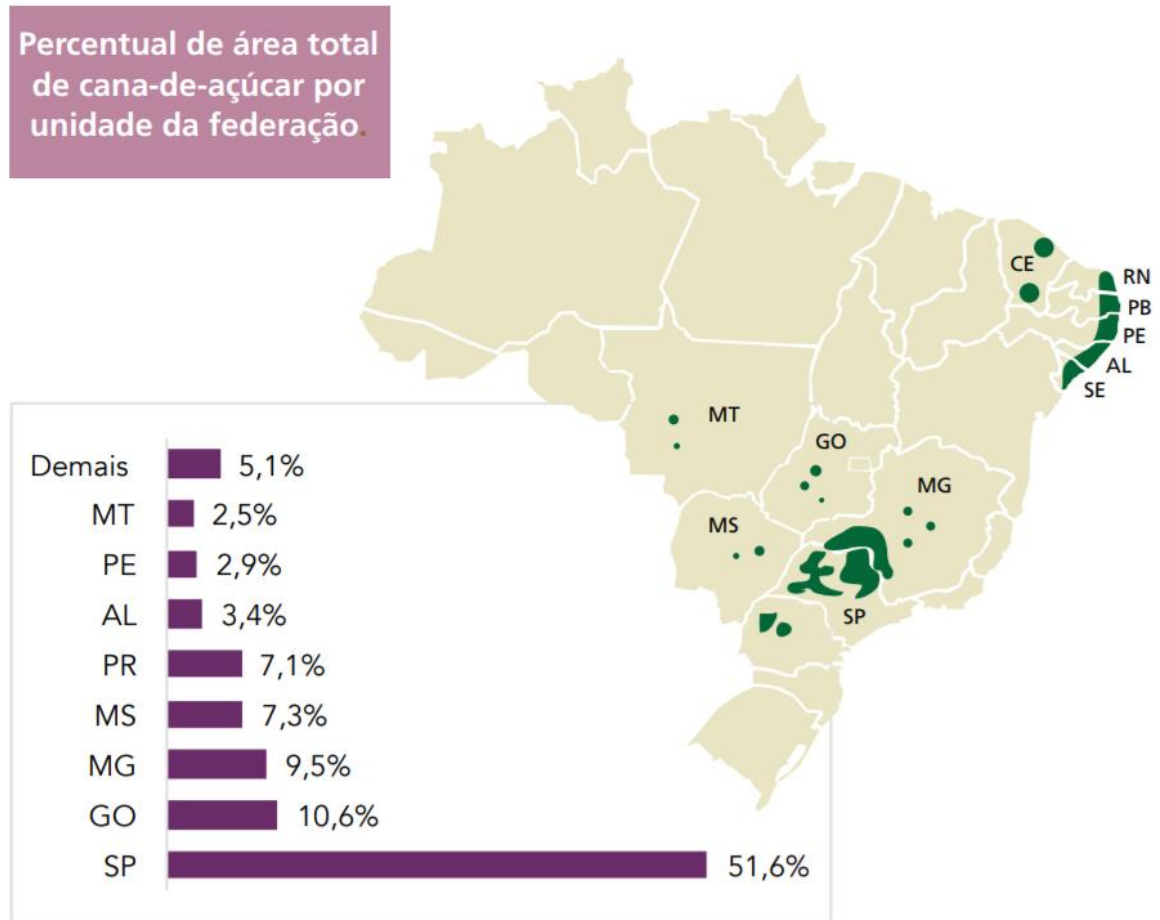


Figura 1 - Mapa do percentual de área total de cana-de-açúcar por unidade da federação

Fonte: MAPA (2017).

Usinas sucroalcooleiras

As usinas sucroalcooleiras podem produzir o açúcar, o etanol (álcool) e a energia elétrica. A produção de cada segmento é variável em função dos aspectos mercadológicos, onde a variação de preços está diretamente relacionada a produção dos itens açúcar e álcool, sendo que quando um destes se apresenta satisfatório, logo há um redirecionamento da produção.

Na Figura 2 é ilustrado a estrutura física de uma usina sucroalcooleira, juntamente com o detalhamento dos processos de produção.

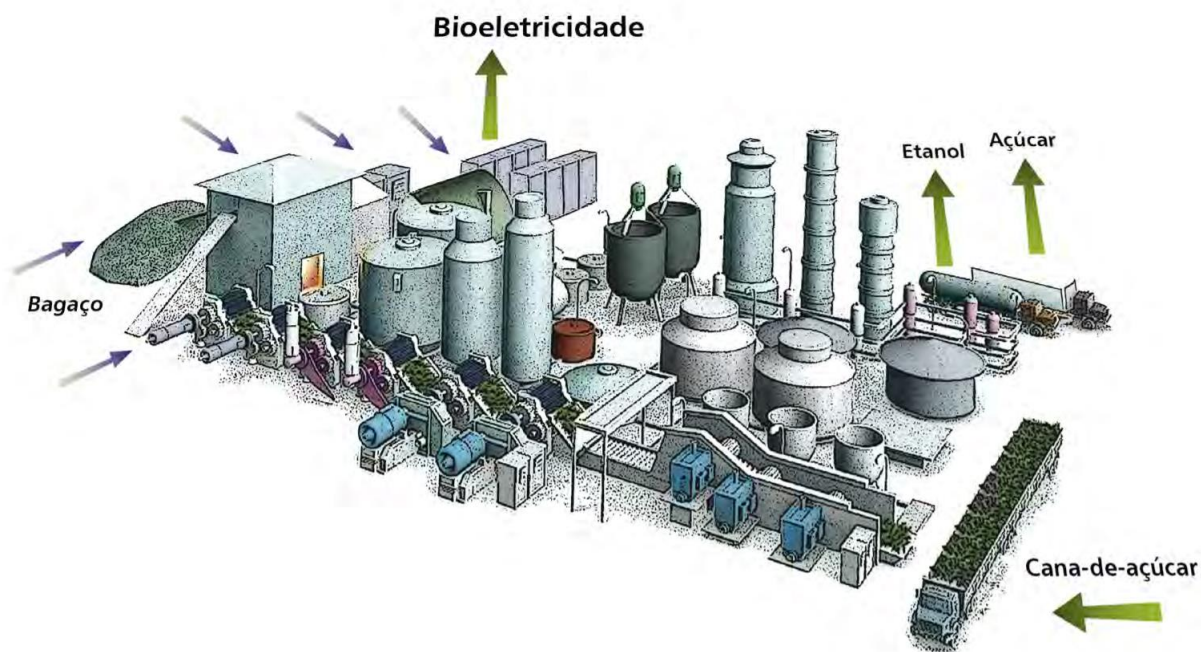


Figura 2: Estrutura física de uma usina
Fonte: Secex e CONAB (2017)

Ao chegar à indústria, os colmos de cana-de-açúcar são pesados e em seguida descarregados diretamente na mesa alimentadora. Ainda na mesa alimentadora antes de ser processada, a cana-de-açúcar é limpa a seco com sopradores de ar, isso possibilita a utilização da palha, que pode ser queimada na caldeira, visando seu aproveitamento na geração de energia (CTC, 2009).

Depois de limpar os colmos da cana-de-açúcar, a esteira irá transportá-la até o picador, que a fraciona em pedaços. A cana-de-açúcar fragmentada passa pelo desfibrador, que tem por função abrir os colmos em camadas para o esmagamento e extração do caldo (PAULO, 2010).

A extração pode ser feita em difusores ou moendas. Para que todo caldo seja aproveitado, a cana-de-açúcar passa entre quatro a seis ternos de moenda no total são constituídas por rolos metálicos que exercem pressão sobre os colmos. Para que ocorra a extração com eficiência é feita a adição de água (processo de embebição), após a passagem do primeiro terno, na entrada do segundo terno. Dessa moagem vai resultar o caldo rico em carboidratos e minerais, e a fração fibrosa que recebe denominação de bagaço. Este bagaço é incinerado na caldeira, que é a unidade produtora de vapor, capaz de gerar toda energia necessária ao complexo industrial (LOPES, 1983).

Quase todos os carboidratos presentes na cana-de-açúcar estão no caldo, que devido o processo de produção envolver uma diluição com a água de embebição, é chamado de caldo misto. O caldo misto passa pelo trocador de calor em contracorrente entre 90 e 105°C, em seguida é direcionado para o decantador, onde ocorre a separação das impurezas nele contidas. No final desta etapa, resultam caldo clarificado e lodo. O componente lodo será processado em filtros rotativos a vácuo para recuperação do caldo residual, desta forma o material resultante desta etapa de processamento é denominado como torta, e este possui grande quantidade de sais minerais, sendo empregado na lavoura como adubo (VIANA, 2006).

O caldo clarificado é bombeado para um tanque “pulmão” e depois segue para um trocador de calor, no qual é resfriado ao passar em contracorrente com nova partida de caldo misto. Em temperatura adequada é encaminhado para o processo de fermentação em dornas (tanques) onde, por ação de leveduras, os carboidratos, especialmente sacarose são metabolizados em álcool e gás carbônico, em processo com controle de condições de temperatura e pH, e possui tempo de duração de 6 a 8 horas (VIANA, 2006).

O mosto fermentado, é centrifugado e separado em leite de levedura e vinho. O leite de levedura é tratado com ácido em pH 2,5 por duas horas e reutilizado em novas fermentações (LUDWIG et al., 2001) e o vinho deslevedurado contém de 7 a 8% de álcool (v:v). Como o ponto de ebulição do álcool, é menor que o da água, é possível separar os dois componentes por processo de destilação. Quando o vinho é destilado obtém-se o etanol e seus subprodutos, entre os quais a vinhaça que é a fração aquosa do vinho, rico em sais minerais. A vinhaça foi tida como problema nas agroindústrias, entretanto em função do desenvolvimento de tecnologias e estudos sobre o tema, tornou-se um produto empregado em sistemas de fertirrigação da própria produção canavieira (VIANA, 2006).

No final do processamento agroindustrial de produção de álcool, o etanol hidratado recebe especificações técnicas de acordo com as normas do Conselho Nacional de Petróleo e Instituto de Açúcar e Álcool (CNP-IAA). O etanol deve apresentar grau alcoólico entre 92,6° e 93,8° INPM – Instituto de Pesos e Medidas (porcentagem de álcool em peso) (UNICA, 2014).

A vinhaça

No processo de destilação do mosto e produção do etanol, o subproduto líquido gerado recebe a denominação de vinhaça (LUKSEMBERG et al., 1980). Este componente trata-se de um efluente com 2 a 6% de constituintes sólidos, onde a matéria orgânica se destaca. Apresenta quantidade apreciável de potássio, além de quantidade média de cálcio e magnésio (ROCHA, 2012).

A vinhaça apresenta mau odor, devido à formação de gases decorrentes da decomposição anaeróbia, podendo transferir para o corpo hídrico características de toxicidade, turbidez e coloração escura (CRUZ, 1991).

A grande preocupação com o descarte da vinhaça deve-se à composição química que confere potencial poluidor, devido a concentração de matéria orgânica, aproximadamente 45 g L⁻¹ expressa como DQO (Demanda Química de Oxigênio) (WILKIE et al, 2000). Por sua composição química, dois litros de vinhaça equivalem a carga orgânica do esgoto sanitário (habitante dia⁻¹), com o agravante de que sua carga volumétrica pode atingir até 14 litros de vinhaça por litro de etanol produzido (LUKSEMBERG et al., 1980).

A composição da vinhaça pode variar, dependendo das características e qualidade do vinho submetido à destilação. Também depende da composição da matéria prima, do preparo do mosto, do método de fermentação adotado e de modo em que a fermentação alcoólica é conduzida. Deve-se considerar também a linhagem de levedura utilizada, o tipo de aparelho destilador, a forma de destilação e a sazonalidade da produção vegetal (SILVA e ORLANDO FILHO, 1981).

O constituinte principal da vinhaça é a matéria orgânica, basicamente sob a forma de ácidos orgânicos e, em menor quantidade, por cátions como o potássio (K⁺), Cálcio (Ca⁺²) e Magnésio (Mg⁺²). Dos efluentes líquidos da indústria, a vinhaça é a que apresenta maior carga orgânica. A temperatura com que a vinhaça sai dos aparelhos de destilação varia de 85 a 90°C (ROSSETTO, 1997). Em termos de demanda química de oxigênio (DQO), a concentração da matéria orgânica da vinhaça pode atingir valores superiores em cem vezes a DQO do esgoto sanitário, que varia entre 450 e 800 mg L⁻¹ (VON SPERLING, 2005).

Para a vinhaça a relação DBO/DQO média é de 46%, ou seja, quase metade de toda a DQO presente na vinhaça é constituída de matéria orgânica biodegradável o que indica o potencial poluidor e a possibilidade de tratamento biológico destes

resíduos para redução, em especial o tratamento anaeróbio (WILKIE et al., 2000). Na Tabela 1 estão dispostos os valores de concentrações médias de componentes presentes na vinhaça.

A legislação brasileira veta o lançamento direto ou indireto da vinhaça em qualquer tipo de corpos hídricos. Desta forma, as destilarias ficaram obrigadas a desenvolver projetos para implantação de sistemas de tratamento e/ou manejo e utilização da vinhaça, bem como das demais águas residuais do processo de fabricação do etanol (PINTO, 1999).

Além da opção de uso em fertirrigação do cultivo da cana-de-açúcar, outra opção seria o tratamento por digestão anaeróbia, tecnicamente viável, mas pouco rentável em sua versão em temperatura mesófila.

Digestão anaeróbia

A digestão anaeróbia pode ser considerada um biossistema onde diversos grupos de microrganismos atuam interativamente na conversão da matéria orgânica complexa em metano, gás carbônico, água, gás sulfídrico e amônia, além de biomassa. As bactérias que participam do processo de decomposição anaeróbia podem ser divididas em três importantes grupos, em função de sua fisiologia distinto, bactérias fermentativas, acetogênicas e metanogênicas (CHERNICHARO, 1997). Na Figura 3 estão dispostas as etapas da digestão anaeróbia de matéria orgânica.

Um reator de digestão anaeróbia é o espaço físico, um ecossistema onde diversos grupos de microrganismos atuam conjuntamente na estabilização da matéria orgânica. O consórcio de microrganismos ativos no tratamento anaeróbio envolve muitas espécies de bactérias, atuando de forma simbiótica, evidenciando algumas etapas intermediárias. As reações bioquímicas principais que ocorrem no processo caracterizam os grupos de microrganismos predominantes, podendo o mesmo ser dividido em quatro etapas: a hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (LETTINGA, 1985).

Tabela 1. Composição química da vinhaça provenientes de diferentes tipos de mosto e as referências da literatura.

Referência	Tipo de Mosto	*pH	**DBO	***DQO	Nitrogênio	Enxofre	Fósforo	Potássio
			g L ⁻¹	g L ⁻¹	g L ⁻¹	g L ⁻¹	g L ⁻¹	g L ⁻¹
Callander e Badford (1983)	Caldo	3,9	-	26,0	1,19	0,32	2,10	1,47
Van Haandel e Catunda (1994)	Caldo	3,5	12,0	25,0	0,40	0,20	0,80	-
Driessen et al (1994)	Caldo	3,5	15,0	22,0	0,40	0,06	-	0,40
Costa et al (1996)	Caldo	4,2	16,5	33,0	0,70	0,09	1,74	0,76
Lampoglia e Roseel (1997)	Caldo	4,1	11,0	24,0	0,45	0,65	0,11	1,65
Souza et al (1992)	Misto	3,9	-	31,5	0,37	0,03	1,30	0,42
Costa et al (1996)	Misto	4,5	19,8	45,0	0,71	0,09	3,82	3,73
Lampoglia e Roseel (1997)	Misto	4,5	19,8	45,0	0,60	3,70	0,10	4,00
Sheehan e Greenfield (1980)	Melaço	4,2	35,7	77,7	1,78	0,17	8,90	4,36
Sanchez Riera et al (1985)	Melaço	4,8	-	100	2,50	0,30	1,75	0,70
Costa et al (1986)	Melaço	4,6	25,0	65,0	1,61	0,13	6,50	6,40
Casarini et al (1987)	Melaço	4,2	-	24,6	0,81	0,03	1,98	0,61
Menezes, (1989)	Melaço	4,1	25,8	48,0	0,82	0,16	-	-
Bazual et al (1991)	Melaço	5,0	27,5	64,0	1,30	-	-	2,80
Driessen et al (1994)	Melaço	3,9	39,0	100	1,03	0,03	7,00	9,50
Harada et al (1996)	Melaço	4,1	30,0	120	1,60	0,06	1,92	4,60
Goyal et al (1996)	Melaço	4,1	60,0	98,0	1,20	1,50	1,20	5,00
Lampoglia e Rossel (1997)	Melaço	4,6	25,0	65,0	1,03	6,40	0,20	5,60

Legenda: (-) sem informações; *pH – potencial hidrogeniônico; **DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio; ***DQO – Demanda Química de Oxigênio.

Fonte: Wilkie et al (2000).

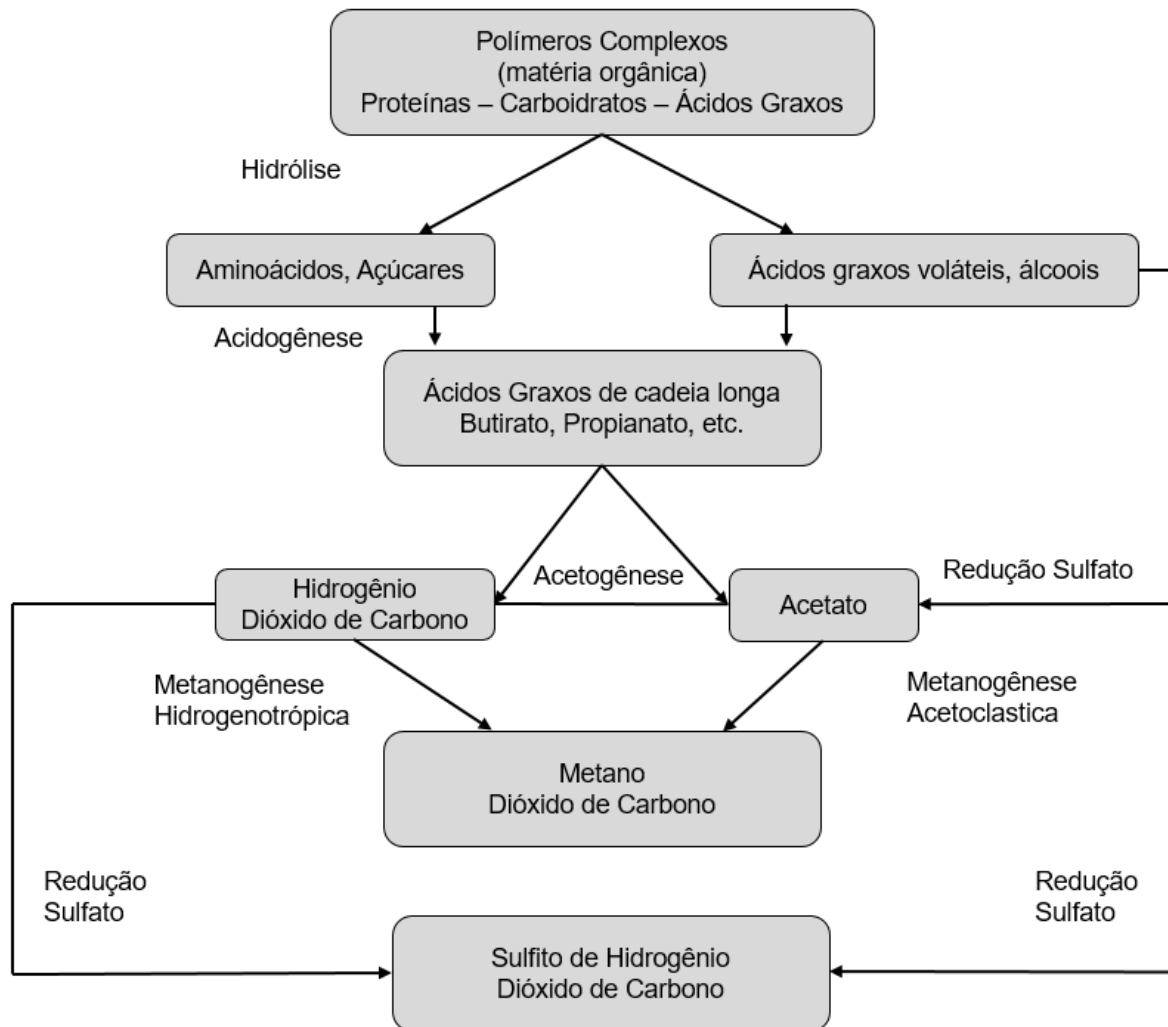


Figura 3: Etapas da digestão anaeróbia de matéria orgânica
Fonte: Adaptado de Lettinga (1995)

De acordo com Viana (2006), outra vantagem da digestão anaeróbia, quando comparada com os tratamentos aeróbios convencionais, é a baixa produção de lodo biológico, com aproximadamente 50 % da DQO destruída convertida em biogás e 10 % em lodo, enquanto que no tratamento aeróbio 50 % da DQO é convertida em lodo.

Digestão anaeróbia em sistemas de reatores

A estrutura física do reator é simples, e constitui num sistema de câmara, onde existe uma entrada para o fornecimento do substrato (matéria orgânica) a ser fermentado e uma saída de efluente tratado durante o bioprocessamento. No mesmo sistema podem existir uma câmara de armazenamento de gás, entretanto comumente é encontrado um sistema de saída por meio de tubulação. Os biodigestores podem

ser classificados segundo o seu tipo de construção, modo de operação, sua forma de armazenamento do gás, fluxo, temperatura, com ou sem agitação e com ou sem dispositivo para agregar a biomassa bacteriana (meio de suporte) (PINTO, 1999).

O processo de biodigestão realizado em reatores convencionais são relativamente lentos, com tempo de retenção hidráulica de vários dias, um dos principais obstáculos para aplicação deste processo no tratamento de vinhaça, pois este componente é produzido de forma contínua na destilaria, requerendo assim um processo mais rápido. A redução do tempo de retenção potencialmente pode ser obtida mantendo-se uma elevada carga de microrganismos no reator. Biodigestores de alta eficiência, geralmente com fluxo ascendente, alcançam este objetivo (PINTO, 1999).

Um dos modelos de reatores mais empregados em todo mundo, de elevada eficiência, é o reator anaeróbio de manta de lodo com fluxo ascendente (UASB – Upflow Anaerobic Sludge Blanket). Este sistema está exemplificado na Figura 4. O UASB foi desenvolvido no final da década de 1970, e baseia-se na tendência que a biomassa tem para formar agregados densos que são retidos do reator pelas características de sedimentação e com o auxílio de um separador gás, podendo ser sólido e/ou líquido (LETTINGA et al., 1980).

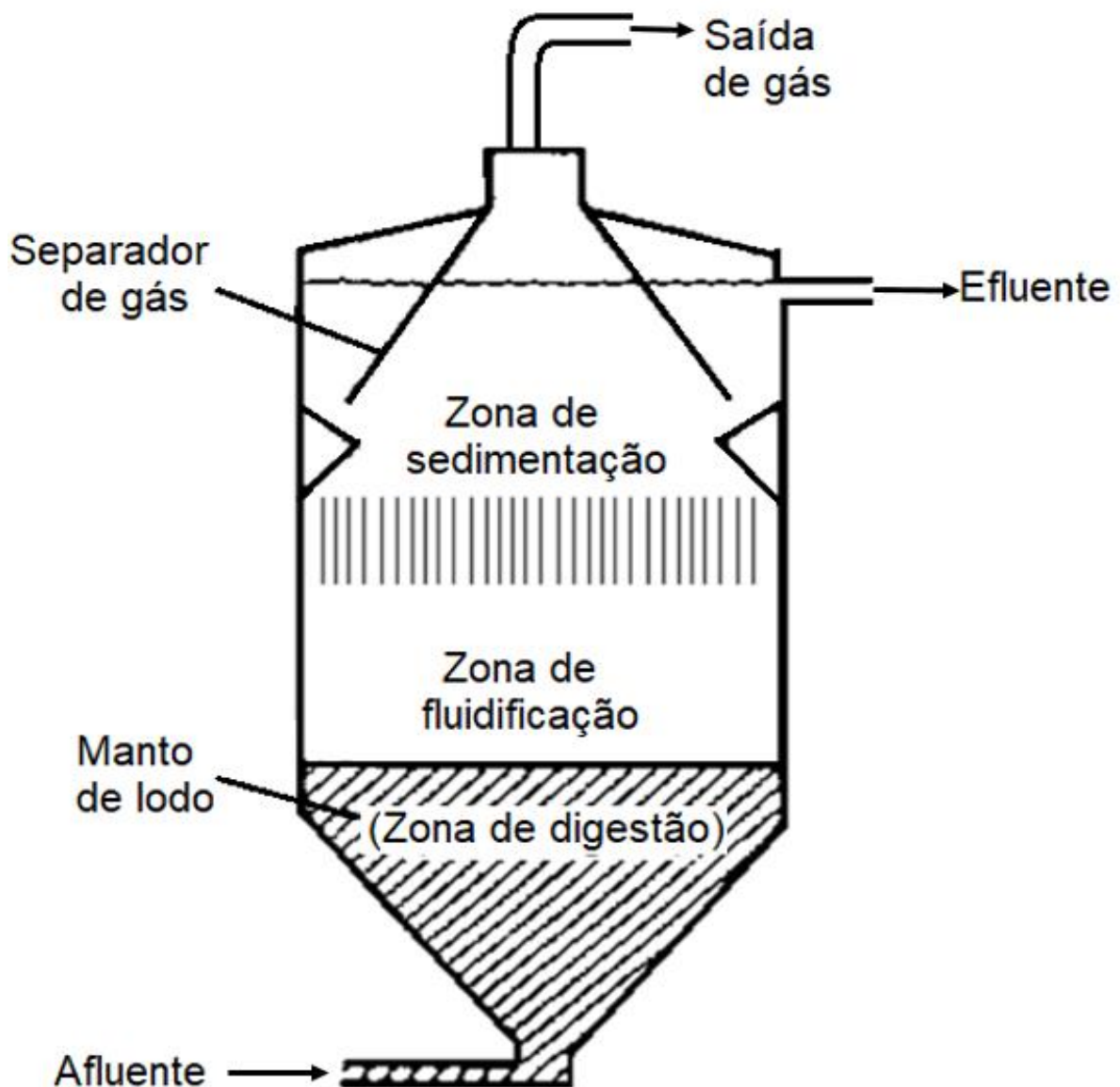


Figura 4: Esquema de um reator UASB – Upflow Anaerobic Sludge Blanket
 Fonte: Adaptado de Méndez-Novelo (2012)

No reator UASB, o substrato é distribuído ao longo da parte inferior, através de uma densa camada de lodo anaeróbio. O lodo tende a se depositar na parte basal do reator (fundo), o efluente flui na direção da parte superior, passando pelo leito de lodo, no qual sua DQO é parcialmente convertida em biogás (NOGUEIRA, 1986).

Os filtros anaeróbios mais usuais têm fluxo ascendente e descendente, nos filtros de fluxo ascendente o leito é necessariamente submerso “afogado”. Nos filtros de fluxo descendente podem trabalhar “afogados” ou não. Aparentemente os filtros com fluxo ascendente comportam-se da mesma maneira que os de fluxo descendente afogado,

uma vez que os filtros de fluxo ascendente são os mais utilizados no tratamento de esgoto, e em pesquisas (ANDRADE NETO et al., 2001).

Quando comparando dois reatores com o mesmo volume nas mesmas condições de vazão e substratos (efluentes), variando apenas o sentido dos fluxos (ascendente e descendente afogado), os dois sistemas apresentaram resultados satisfatórios e com eficiência equivalente na remoção de matéria orgânica e sólidos (ANDRADE NETO et al., 2001).

Segundo Chernicharo (1997), os filtros de fluxo descendente são mais indicados para o tratamento de despejo que contenham elevadas concentrações de sólidos suspensos, uma vez que nos reatores ascendentes pode provocar o entupimento ou a formação de caminhos preferencias. Porém esse não é um problema para o tratamento da vinhaça, pois apresenta como suas características predominantes sólidos suspensos.

Leito fixo como elemento de estabilidade na digestão anaeróbia

O meio de suporte utilizado em reatores anaeróbios pode ser em geral, de características muito variadas, materiais utilizados como pedras, tubos de policloreto de vinila - PVC, esponja de poliuretano, argila expandida, anéis plásticos e enchimentos plásticos modulares, podendo ainda serem dispostos no reator de forma ordenada ou aleatória (ALVES, 1998).

A digestão anaeróbia atinge melhores resultados na produção de biogás em temperaturas em torno de 55 °C (WARD et al., 2008; FUESS et al., 2017), situação em que em razão do estresse as condições operacionais dos reatores, devem ser levados em consideração, entre as quais a disponibilidade de alcalinidade suficiente para garantir adequado tamponamento ao sistema (BONCZ et al., 2012).

A vinhaça apresenta baixo teor de proteína o que facilita o desequilíbrio microbiano e instabilidade de pH. Uma grande variação no valor do pH pode ocorrer com esse efluente, mesmo quando ocorre uma pequena variação da acidez causada pela acidificação no interior do reator (RIBAS et al., 2010; OLIVEIRA-JUNIOR et al., 2012), o que pode interromper ou reduzir o grau de tratamento e de produção de gás.

Oliveira-Junior et al (2012), reuniram formas de contornar o baixo poder tamponante na digestão anaeróbia da vinhaça. Além de operar com separação de

fase, utilizaram calcário dolomítico para como leito fixo. Avaliaram também proporções de calcário/vinhaça sendo 3,75, 2,50, 1,88 e 1,25 t/m³. Os autores ressaltam que quanto maior é a proporção de calcário em relação ao volume de vinhaça tratado, maior era a estabilidade, representado pelo pH e relação Acidez Volátil/Alcalinidade Intermediária. Houve uma boa estabilidade da relação AV/AI e pH para todas as proporções de calcário/vinhaça testado. Considerando que um maior peso de pedra calcária reduz o volume útil do reator foi selecionado 1,88 toneladas de calcário/m³ como melhor para a partida, proporcionando relação AV/AI entre 0,6 e 0,7 com o valor de pH mantido entre 7,5 e 8,0.

A instabilidade da digestão anaeróbia pode ser controlada por separação física em dois estágios, porém a necessidade de construir mais um reator gera alto custo. Outra maneira, é o uso de meios de suporte que permitem aos microrganismos crescerem aderidos à superfície dos leitos fixos, que ao tornarem-se menor susceptíveis a condições extremas, tornam o processo mais estável. Na literatura são citados vários materiais de suporte com o objetivo de proporcionar a fixação de biomassa, entre os quais: argila expandida, carvão, cerâmica porosa e o polietileno que é o mais comum (FERRAZ JÚNIOR et al. 2016).

A utilização de pedras de calcário foi avaliada para efluentes de baixo poder tamponante por atuar ao mesmo tempo como agente neutralizante e material de suporte, e pode aumentar a concentração de cálcio livre no reator, porém a grande vantagem é que a solubilização do calcário ocorre naturalmente com a aumento da acidez, isso torna possível o descarte do o uso de dispersores (RIBAS & CEREDA, 2003; RIBAS et al., 2010).

Tomielis et al. (2017), afirmam que com um tempo de detenção hidráulico de 4 dias a concentração de cálcio (próximo de 200 mgCa²⁺·l⁻¹) permanece em níveis apropriados na vinhaça tratada, garantindo uma faixa não prejudicial o processo.

Partida de reatores anaeróbios

A partida de um reator é o período necessário para alcançar a estabilidade do inóculo o que resulta em uma quantidade constante do efluente e massa de lodo. É um processo lento, devido a necessidade de desenvolver uma massa bacteriana adaptada às características do efluente e as condições de tratamento.

O início de operação de um biodigestor constitui em dos principais e importantes aspectos na digestão anaeróbia. A partida está relacionada com a existência de uma população microbiana aclimatada ao substrato, que pode ser suprida por microrganismos presentes no próprio substrato ou pode ser introduzida no biodigestor pelo uso de inóculo (BACKES, 2011). A massa microbiana pode ser produzida de três formas, (1) utilizando-se um inóculo já adaptado ao resíduo a ser tratado, (2) empregando-se um inóculo não adaptado e sem a utilização de inóculo, (3) em condição mais desfavorável (ALVES et al., 2008).

Amaral et al. (2008) apontam que o ideal seria utilizar um inóculo oriundo de um sistema similar ao que se pretende inocular. Porém, muitas vezes se torna difícil a disponibilidade deste tipo de inóculo, sendo necessário de testes com novos inóculos que se adaptem melhor ao substrato que se deseja digerir.

Dentre os resíduos disponíveis, destacam-se como fontes promissoras de inóculo o lodo mesofílico proveniente das estações de tratamento de esgotos, estratos de solo, lodos de plantas de tratamento de efluentes industriais e outros materiais de origem animal, como rúmen, esterco bovino, suíno e de frango, que são ricos em microrganismos anaeróbios (BARCELOS, 2009; ELBESHBISHY et al., 2012; KHALID et al., 2011).

O uso de inóculo como lodo de esgoto e esterco bovino na partida é uma estratégia que tem sido estudada para melhorar o rendimento da digestão anaeróbia utilizando substrato que, em muitos casos, aumentam a produção de biogás e diminui o tempo de degradação (BARCELOS, 2009).

Além de protozoários e fungos anaeróbios em abundância, micro-organismos metanogênicos do domínio Archaea. também fazem parte da comunidade microbiana presente no rúmen bovino (LIN, RASKIN E STAHL, 1997; JANSSEN E KIRST, 2008; KONG et al., 2010). Devido à presença desses micro-organismos no sistema digestivo bovino, eles também estão presentes no dejetos bovino, como reporta Griffin et al. (1998), ao encontrar principalmente Methanobacteriaceae no dejetos bovino (fezes + urina).

Uma partida de sistema satisfatória é definida pelo fornecimento de condições favoráveis ao crescimento microbiano, para isso, é desejável que se siga determinadas orientações, conforme sugerido por Chernicharo (1997), onde a temperatura no interior dos reatores deve ser próxima à faixa ótima de crescimento das bactérias anaeróbias (35°C); o pH deve ser preferencialmente na faixa de 6,8 a

7,2 e; os fatores de crescimento (micro e macronutrientes) devem estar presentes em quantidades suficientes.

A primeira partida de um reator anaeróbio é um processo relativamente delicado, onde Lettinga et al., (1980) estabeleceram os principais cuidados que devem ser tomados durante a fase de partida como não retornar ao reator o lodo disperso perdido juntamente com o efluente; promover a diluição do efluente quando a concentração da água residuária for muito alta; aumentar a carga orgânica progressivamente, e fornecer alcalinidade necessária ao sistema, de forma a manter o pH próximo a 7,0.

No caso da DA da vinhaça, o problema é ainda mais sério devido ao baixo poder tamponante, característico de um resíduo com baixo teor de proteína.

Ribas e Cereda (2003), comparam a eficiência de hidróxido de sódio (NaOH) e pedras de calcário na partida da manipueira, que apresenta características de baixa poder tamponante, semelhante ao que ocorre na vinhaça. Concluíram que o calcário exigiu menos tempo para estabilizar o pH que o NaOH, na mesma faixa de valores. Os autores também abordaram que as pedras de calcário liberaram de forma gradual seus cátions solúveis, evitando assim o estresse das bactérias. No experimento realizado por Ribas (2003), a manipueira estabilizada com calcário apresentou redução de carbono orgânico total, de sólidos totais e de sólidos voláteis, além de uma economia de 1,27% no custo total.

Palma (2012), utilizou pedras de calcário dolomítico como agente fornecedor de alcalinidade em reator anaeróbio para tratamento de manipueira, a dissolução das pedras de calcário dolomítico garantiu a presença dos íons cálcio e magnésio, formando altos níveis de alcalinidade que resultou em uma ótima manutenção do pH como da relação acidez volátil/alcalinidade total. Mais recentemente, Tomileis, Barcelos e Cereda (2017), demonstraram a capacidade de tamponamento com o uso de material natural, como rochas, direcionando pesquisas nesta temática.

Santana-Júnior (2013), utilizou tanto vinhaça quanto melaço como substrato para produção de biogás em reator UASB, porém o melaço foi utilizado apenas na entressafra devido à ausência de vinhaça nas usinas. O melaço causou a queda no pH e diminuição da alcalinidade no sistema, exigindo a correção do pH com bicarbonato de amônia, além de apresentar baixa eficiência na remoção de DQO (43%). Por outro lado, utilizando a vinhaça como substrato, obteve melhor eficiência na remoção de DQO (55%) e maior produção de biogás.

Os procedimentos durante a partida do reator referem-se principalmente à inoculação, alimentação e monitoramento do processo. A inoculação pode ocorrer tanto com reator cheio ou vazio, descarregando sempre ao fundo do reator, evitando turbulências e contato excessivo com o ar. Após inoculado, o lodo deve ser mantido em repouso para que ocorra a aclimação gradual ao meio até a fase de partida. Após esse período, inicia-se a alimentação do reator, promovendo o aumento gradual da vazão afluente, de acordo com a resposta do sistema, procedendo monitoramento de rotina durante o processo de tratamento (CHERNICHARO, 1998).

Digestão anaeróbia da vinhaça

No processo da biodigestão anaeróbia da vinhaça, em geral, a degradação da carga orgânica gera biogás e um efluente com carga orgânica reduzida, mas que ainda pode ser reaproveitado como fertilizante.

Os macronutrientes, fósforo e nitrogênio, além dos micronutrientes presentes na vinhaça, suprem as necessidades fisiológicas dos microrganismos presentes no reator, contribuindo assim ao bom desenvolvimento do processo. O potencial de geração do biogás a partir da vinhaça é variável, entretanto, a proporção de metano no biogás produzido é de 55 a 65%, sendo o restante constituído por dióxido de carbono (VIANA, 2006).

Pinto (1999), relata que a tecnologia da digestão anaeróbia da vinhaça contribuiria para a melhoria da sustentabilidade da produção do etanol, uma vez que é viável economicamente, em alguns casos, e poderia ser instalada junto às indústrias para utilização integral da energia da biomassa da cana-de-açúcar. Salomon (2007), concorda com a literatura anterior e acrescenta que a vinhaça apresentaria como vantagem o fato de gerar energia na forma gasosa, com redução de odores e da matéria orgânica, mas com permanência dos nutrientes.

A produção de biogás pode aumentar esse arrecadamento através da queima do metano presente no biogás. Souza et al (1992) compararam a viabilidade da digestão anaeróbia termófila (55°C) e mesofílica (35°C) da vinhaça em reatores UASB. Nas condições termofílicas, verificou-se alta conversão de matéria orgânica, com 72% de eficiência na remoção de DQO. Wilkie et al. (2000), mostram que o tratamento termófilo da vinhaça alcança eficiência de tratamento da demanda química de oxigênio (DBO) de quase o dobro da carga orgânica de entrada do sistema

mesofílico, entando que a eficiência média de tratamento termofílico de DQO foi menor que a do mesofílico.

Apesar de a vinhaça apresentar reação ácida, o consumo dos ácidos orgânicos e formação de compostos como amônia após sua introdução no reator, dá origem a rápida elevação do pH do meio reacional, sem necessidade de adição de compostos alcalinos (CARVALHO, 2005).

No presente estudo, foi elaborado trabalho técnico-científico com intuito de desenvolvimento de processos e produtos a partir de resíduos agroindustriais de usinas sucroalcooleiras. Os trabalhos a seguir foram elaborados segundo as normas da Revista Ciência Rural.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, M. M. S., **Estudo e Caracterização de Digestores Anaeróbios de Leite Fixo**. Universidade do Minho, Dissertação (Mestrado), Portugal, 1998.

ALVES, R. G. C. de M. et al. **Digestores Anaeróbios para Tratamento de Dejetos Suínos – Avaliação de Partida para Diferentes Configurações de Reatores**. 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Florianópolis – SC, 2008.

ANDRADE NETO, C. O. MELO H. N. S., LUCAS M. **Filtros Anaeróbios Com Fluxo Ascendente e Fluxo Descendente**. Pós-tratamento de efluentes em reator anaeróbio, Coletânea de Trabalhos Técnicos – volume 2, p185. Belo Horizonte – MG 2001.

BACKES, M. B., **Avaliação do Processo de Digestão Anaeróbia na Geração de Energia a Partir de Dejetos Suínos e Bovinos de Leite com Suplementação de Glicerina Residual Bruta Oriunda da Produção de Biodiesel**. Dissertação (Pós-Graduação) UNIVATES, Lajeado – RS, 2011.

BARCELOS, B. R., **Avaliação de Diferentes Inóculos na Digestão Anaeróbia da Fração Orgânica de Resíduos Sólidos Domésticos**. Dissertação (Mestrado), Universidade de Brasília, Brasília – DF, 2009.

BONCZ, M. A.; FORMAGINI, E. L.; SANTOS, L. DA S.; MARQUES, R. D.; PAULO, P. L. Application of urea dosing for alkalinity supply during anaerobic digestion of vinasse. **Water Science Technology**, v.66, n.11, p.2453, 2012.

CARVALHO, L. C. C., Panorama do Setor Sucoalcooleiro. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL STAB, 3, 2005. **Anais...Águas de São Pedro**. Trabalho apresentado.

CHERNICHARO, C. A. de L., **Reatores Anaeróbios**. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG Belo Horizonte – MG, 1997.

CRUZ, R. L., **Efeito da Aplicação de Vinhaça Sobre o Solo e a Água Subterrânea**, EESC-USP, Dissertação (Mestrado), São Carlos-SP, 1991.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa e Agropecuária. Disponível em: <<http://www.embrapa.br>>. Acesso em: 24 de março de 2014.

FERRAZ JÚNIOR, ADN et al. Digestão anaeróbica termofílica de vinhaça de cana-de-açúcar em bruto. **Energia Renovável**, V.89, p.245-252, 2016. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/artigo / pii / S0960148115304808>>. Acessado: 12 de outubro de 2016. doi: 10.1016 / j.renene.2015.11.064.

FUESS, L.T.; ARAÚJO JUNIOR, M. M. de; GARCIA, M.L.; ZAIAT, M. Designing full-scale biodigestion plants for the treatment of vinasse in sugarcane biorefineries: how phase separation and alkalization impact biogas and electricity production costs? **Chemical Engineering Research and Design**, v.119, p.209-220, 2017.

FUESS, L.T., GARCIA, M.L. Implications of stillage land disposal: a critical review on the impacts of fertigation. **Journal Environ Management**, v.145, p.210-229, 2014.

GALLOWAY, J.H., **The Sargar Cane Industry. A Historical Geography From its Origins to 1914**. Cambridge, 1990.

LETTINGA G., VAN VELSEN A. F. M., HOBMA S. W., DE ZEEUW W. E K LAPWIJK A. (1980) Use of Upflow Sludge Blanket (USB) Reactor Concept for Biological Wastewater Treatment, Especially for Anaerobic Treatment. **Biotechnol. Bioeng.** 22, 699-734, (1980)

LETTINGA, G. e RINZEMA, A., Anaerobic Treatment of Sulfate Containing Wastewater. **Bioenvironmental System**, 1985.

LUDWIG, K.M., OLIVA-NETO, P., DE ANGELIS, D.F., Quantificação da Floculação de SACCHAROMYCES CEREVISIAE por Bactérias Contaminantes da Fermentação Alcoólica. **Ciência Tecnologia Alimentícia**, Campinas – SP, p. 63-68, 2001.

LOPES, C.H., **Lavagem de Cana e Tratamento de Seus Efluentes, Saccharum spp.** Piracicaba – SP, v.6, n.76, p. 26-31, 1983.

MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento <<http://www.agricultura.gov.br/assuntos/politica-agricola/todas-publicacoes-de-politica-agricola/projecoes-do-agronegocio/projecoes-do-agronegocio-2017-a-2027-versao-preliminar-25-07-17.pdf/>> Acesso em: 22 out. 2017.

NOGUEIRA, L.A.H., **Biodigestão: a Alternativa Energética.** Editora Nobel, São Paulo, 1986.

OLIVEIRA JUNIOR, V. P., ALMEIDA, F. F. P., CEREDA, M. P., **Dolomitic Limestone Use for Stabilization of Vinasse in the Acidogenic Phase of Anaerobic Digestion.** CeTeAgro, Catholic University, Campo Grande – MS, 2012.

PALMA D., **Tratamento de Água Ressudaria de Fecularia em Reator Anaeróbio Contendo Pedras de Calcário Dolomítico.** Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Dissertação (Pós-Graduação), Cascavel – PR, 2012.

PINTO, C. P., **Tecnologia da Digestão Anaeróbia da Vinhaça e Desenvolvimento Sustentável.** UNICAMP, Dissertação (Mestrado), Campinas – SP, 1999.

RIBAS, M. M. F., **Tratamento de vinhaça em reator anaeróbio operado em batelada sequencial contendo biomassa imobilizada sob condições termofílicas e mesofílicas.** Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

RIBAS, M. M. F.; CEREDA, M. P., Stabilization of cassava wastewater during acidogenic phase in anaerobic reactor with sodium hydroxide and two sizes of dolomitic limestone. **Journal of Root Crops**, v.29, n.2, p. 1-6, 2003.

RIBAS, M. M. F.; CEREDA, M. P.; VILLAS BÔAS, R.L. Use of cassava wastewater treated anaerobically with alkaline agents as fertilizer for maize (*Zea mays* L.). **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 53, n. 1, p. 55-62, 2010.

ROSSETTO, A. J. **Utilização Agronômica Dos Subprodutos E Resíduos Da Indústria Açucareira e Alcooleira**. Paranhos, S.B. (ed.). Cana-de-açúcar: cultivo e utilização, Campinas: Fundação Cargill, p. 435-404, 1987.

SALOMON K. R., **Avaliação Técnico-Econômica e Ambiental da Utilização do Biogás Proveniente da Biodigestão da Vinhaça em Tecnologias para Geração de Eletricidade**. Tese (Doutorado) – Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá – MG, 2007.

SOUZA, M. E., FUZARO, G. & POLEGATO, A. R., Thermophilic Anaerobic Digestion of Vinasse in Pilot Plant UASB Reactor. **Water Science and Technology**, v. 25, n.7, p. 191-200, 1992.

TOMIELIS, I. P.; BARCELOS, S. T. V.; CEREDA, M. P. Hydraulic retention time on vinasse stabilisation with limestone in the acidogenic phase of anaerobic digestion. **Ciência Rural**, v. 47, n. 9, 2017.

ÚNICA - União da indústria de cana-de-açúcar. São Paulo, 2016. Disponível em: < <http://www.unica.com.br/faq/> >. Acesso em: 22 de outubro. 2017.

VIANA, A.B., **Tratamento anaeróbio de vinhaça em reator UASB operado em temperatura na faixa termofílica (55°C) e submetido ao aumento progressivo de carga orgânica**. Dissertação (Mestrado), São Carlos – SP, 102p Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2006.

VON SPERLING, M., **Introdução à qualidade das águas no tratamento de esgoto**. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, v. I, 2005.

WARD, A.J., HOBBS, P.J., HOLLIMAN, P.J., JONES, D.L. Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. **Bioresour. Technol.** 99, 7928–40. doi:10.1016/j.biortech.2008.02.044, 2008.

WILKIE, A. C., RIEDESEL, K. J., OWENS, J.M., Stillage characterization and anaerobic treatment of ethanol stillage from conventional and cellulosic feedstocks. **Biomass and Bioenergy**, 19, p. 63-102. 2000.

CAPÍTULO I: Partida de biorreator UASB com leito fixo de calcário operando na faixa termófila utilizando vinhaça como substrato

**Partida de biorreator UASB com leito fixo de calcário operando na faixa termófila
utilizando vinhaça como substrato**

**UASB bioreactor starting with fixed limestone bed operating in thermophilic
range using vinasse as substrate**

Sheyla Thays Vieira Barcelos¹ Igor Felipe Lima Ferreira¹ Marney Pascoli Cereda^{2*}

RESUMO

A vinhaça é um efluente líquido resultante do processamento da cana-de-açúcar para produção de etanol, gerado entre 12 a 15L para cada litro de etanol. Apresenta elevado potencial poluidor devido à carga orgânica e concentração de sólidos o que pode causar danos ambientais se mal administrada, mas desde os anos 1980 é destinado à fertirrigação. O tratamento por biodigestão anaeróbia remove matéria orgânica, sólidos e, como subproduto, eleva o pH, produz biogás e biofertilizante. Como a vinhaça apresenta baixo poder tamponante, pode gerar instabilidade do processo anaeróbio. Em reatores, a neutralização gradual com pedra de calcário é adequada por tratar-se de material disponível no meio rural, capaz de fornecer alcalinidade em um processo de fácil uso. O mesmo ocorre com o uso do esterco bovino como alternativa de inoculo. O objetivo do artigo é avaliar a partida de reatores para chegar à eficiência do tratamento anaeróbio da vinhaça em temperatura termofílica. Foram utilizados dois reatores UASB com volume útil de 15 L, cada um inoculado com esterco bovino fresco peneirado, além de 16kg de pedra de calcário dolomítico como leito fixo e agente alcalinizante. A aclimação dos reatores se deu em três faixas de temperatura: (i) ambiente (26 +/- 2°C); (ii) mesofílica (36 +/- 2°C) e termofílica (52 +/- 2°C). A eficiência foi avaliada pelo rendimento de biogás gerado e pela remoção de DQO, quando a temperatura aumentou de 26 para 52°C e a carga orgânica de 0,02 a 1,70 gDQO.L⁻¹.d⁻¹. Também foram quantificados os sólidos (Sólidos Totais e Sólidos Totais Voláteis), pH, alcalinidade total e acidez volátil. Os resultados mostram que o esterco diluído produziu 0,11 Lgás.gDQOconsumido⁻¹ aos 48 dias da fase de estabilização, que durou 72 dias, terminando com o DQO do lodo em 8,4 gO₂.L⁻¹. Durante a aclimação do inoculo, o TDH foi ajustado para 4 dias, a máxima carga orgânica de vinhaça para 1,70 gDQO.L⁻¹, a relação alcalinidade total/acidez volátil variou entre 0,14 e 0,86, de forma que o pH permaneceu entre 6,6 e 8,3, o que demonstra os reatores resistiram bem às variações de carga e ao aumento de temperatura. No mesmo período, a média de produção de gás foi de 0,13 Lgás.gDQO⁻¹ consumido, o que é considerado como adequado para a partida.

Palavras-chave: Estabilização, Esterco bovino, Carga orgânica, Produção de gás, Agroindústrias, Sucroalcooleiras.

¹Universidade Católica Dom Bosco (UCDB), Campo Grande, MS, Brasil.

^{2*}Centro de Tecnologia e Análise do Agronegócio, Universidade Católica Dom Bosco (UCDB), 79117-900, Campo Grande, MS, Brasil. E-mail: cereda@ucdb.br. Autor para correspondência.

ABSTRACT

Vinasse is a liquid effluent resulting from the processing of sugarcane for the production of ethanol, generated between 12 and 15 L for each liter of ethanol. It presents high polluting potential due to organic load and solids concentration, which can cause environmental damage if poorly administered, but since the 1980s it is destined to fertirrigation. Treatment by anaerobic bio digestion removes organic matter, solids and, as a by-product, raises the pH, produces biogas and bio fertilizer. But, as the vinasse has low buffering power, it can generate anaerobic instability. In reactors, the gradual neutralization with limestone is adequate because it is a material available in the rural environment, capable of providing alkalinity in an easy-to-use process. The same occurs with the use of cattle manure as an inoculum alternative. The objective of this paper is to evaluate the starting of reactors to reach the efficiency of anaerobic treatment of vinasse in thermophilic temperature. Two UASB reactors with a useful volume of 15 L were used, each one inoculated with fresh sieved bovine manure, as well as 16 kg of dolomitic limestone as fixed bed and alkalinizing agent. The acclimation of the reactors occurred in three temperature ranges: (i) ambient (26 +/- 2°C); (ii) mesophilic (36 +/- 2 ° C) and thermophilic (52 +/- 2 ° C). The efficiency was evaluated by the biogas yield generated and the removal of COD when the temperature increased from 26 to 52°C and the organic load from 0.02 to 1.70 gDQO.L⁻¹.d⁻¹. Solids (Total Volatile Solids and Total Solids), pH, total alkalinity and volatile acidity were also quantified. The results show that the diluted manure produced 0.11 Lg.gDQO⁻¹ at 48 days of the stabilization phase, which lasted 72 days, ending with the COD of the sludge at 8.4 gO₂.L⁻¹. During the acclimation of the inoculum, the TDH was adjusted to 4 days, the maximum organic vinasse load to 1.70 gDQO.L⁻¹, the total alkalinity / volatile acidity ratio ranged between 0.14 and 0.86, so that the pH remained between 6.6 and 8.3, which demonstrates that the reactors were able to withstand well the variations in charge and temperature increase. In the same period, the average gas production was 0.13 Lgás.gDQO⁻¹ consumed, which can be considered as suitable for starting.

Key words: Stabilization, Cattle manure, Organic load, Gas production, Agro-industries, Sugar-alcohol.

INTRODUÇÃO

No processo de produção de etanol, a vinhaça é um resíduo líquido gerado na destilação, na proporção de 10 a 18 litros por litro de etanol produzido. Esta relação pode variar em função da eficiência do processo da agroindústria (SILVA et al., 2007; SIMABUCO & NASCIMENTO FILHO, 1994). No Brasil a vinhaça é usada na fertirrigação da lavoura de cana, entretanto, devido a elevada carga orgânica, apresenta potencial para outras aplicações (PRAMOD, 2011).

Embora exista grande variação no teor de matéria orgânica da vinhaça, que gira em torno de 45 g.L^{-1} , a carga é apropriada para a produção de biogás por digestão anaeróbia (WILKIE et al., 2000). Entretanto, o baixo teor de proteína reduz seu poder tampicante. Ribas et al., (2010) pesquisaram a Digestão Anaeróbia da água residuária de fecularia, outro resíduo líquido de baixo poder tampicante e os resultados citados mostram que o efluente apresentou pH entre 7,0 e 8,0 e manteve a composição mineral rica em fósforo (P), potássio (K) e magnésio (mg), entre outros e em função destes atributos, avaliaram o efeito do efluente como biofertilizante.

A Tabela 1 apresenta a variação da composição da vinhaça segundo a literatura, lembrando que a referência de Elia-Neto & Nakahodo (1995) é um valor médio de revisão sobre o tema, incluindo amostras de procedência variada. A referência de Tomielis et al (2017) trata de vinhaça coletada na mesma região que a usada na presente pesquisa. De forma geral, a Tabela 1 evidencia a variabilidade que caracteriza a vinhaça, com destaque para a Demanda Química de Oxigênio (DQO) elevada, assim como o teor de minerais representados pelo Sólidos Totais Fixos, com pH baixo e de nitrogênio total. A elevada carga orgânica destaca o potencial para digestão anaeróbia (DA) se comparado com esgoto doméstico, que segundo Von Sperling (2005), apresenta uma média de 700 mg.L^{-1} .

Tabela 1 - Caracterização da vinhaça bruta conforme a literatura.

Parâmetro	Unidade	Elia-Neto & Nakahodo	Tomielis et al
		(1995)	(2017)
pH		4,2	4.5
Temperatura	°C	89	70
Demanda Química de Oxigênio	$\text{mgO}_2.\text{L}^{-1}$	28450	106

Nitrogênio Total	g.L ⁻¹ N	357	0,18
Sólidos Totais (ST)	mg.L ⁻¹	25155	10612
Sólidos Totais Fixos (STF)	mg.L ⁻¹	11872	3714
Sólidos Totais Voláteis (STV)	mg.L ⁻¹	6580	6898
Cálcio	mg.L ⁻¹ CaO	515	0,015
Cobre	g.L ⁻¹ CuO	1,20	0,14
Ferro	g.L ⁻¹ Fe ₂ O ₃	25,20	57,62
Fósforo	g.L ⁻¹ P ₂ O ₄	60,40	0,001
Magnésio	mg.L ⁻¹ ¹ MgO	226	0,004
Manganês	mg.L ⁻¹ ¹ MnO	4,80	0,81
Potássio	mg.L ⁻¹ K ₂ O	2035	0,01
Zinco	mg.L ⁻¹ ZnO	1,70	0,81

A vinhaça, assim como as águas residuais de agroindústrias do setor de extração de amido, apresenta pH em torno de 4,0 com nitrogênio total que varia de 0,18 a mais de 300g.L⁻¹ e baixo teor de proteínas, característica que proporciona baixo poder tamponante, o que pode causar instabilidade ao sistema (Elia-Neto & Nakhado, 1995; Tomielis et al., 2017; RIBAS et al., 2010). Essa instabilidade ocorre nestes resíduos líquidos, mesmo quando há uma pequena variação da acidez produzida por microrganismos acidogênicos, que resulta em uma grande variação no valor do pH (RIBAS et al., 2010; OLIVEIRA-JUNIOR et al., 2012). Neste caso, a literatura preconiza o uso de agentes neutralizantes (BONCZ et al., 2012).

A produção de gás depende da carga orgânica, mas também do modelo de reator utilizado. Segundo Campos et al (2000), o reator anaeróbico de manta de lodo com fluxo

ascendente ou *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* (UASB) é um dos sistemas anaeróbios mais eficientes no tratamento de resíduos agroindustriais líquidos, por reduzir a carga orgânica de forma satisfatória e ao mesmo tempo produzir biogás, que é usado como fonte de energia. Neste sistema de tratamento, os microrganismos apresentam a particularidade de aderência à superfície dos leitos fixos, o que lhes permite melhor contornar a instabilidade da digestão anaeróbia (FERRAZ JÚNIOR et al. 2016).

Ribas et al. (2010) relatam o uso deste modelo no tratamento de água residual de feculárias de mandioca, um resíduo também pobre em compostos nitrogenados, portanto de baixo teor tamponante e que conseguiram contornar a instabilidade pelo uso de calcário como meio de suporte e agente alcalinizante.

Além da carga orgânica elevada e reator adequado, é preciso considerar o inóculo utilizado. O inóculo de esterco bovino é mais adequado para o meio rural, que o lodo de esgoto, que por ser muito diluído exigiria um volume muito grande a ser deslocado, o que torna seu uso inviável (TOMIELIS et al., 2017). Pramod et al. (2011) citam que a potencialidade desta fonte de inóculo é devida à especificidade e número de microrganismo metanogênicos, que representam cerca de 40% da população microbiana do esterco bovino fresco e além disso, o fato de não ter custo na zona rural.

Para contornar a tendência à acidificação, o uso de meios de suporte ou leito fixo de rochas alcalinas é uma alternativa ao uso de agentes neutralizantes como soda (NaOH), bicarbonato e cal hidratada (Ca(OH)_2) (TORRES et al., 2005; CABELLO et al., 2009). A literatura que trata deste tema afirma que, entre os agentes alcalinizantes, o calcário destaca-se como um material eficiente, com baixo custo e fácil aquisição (TOMIELIS et al., 2017; RIBAS et al., 2010; RIBAS & CEREDA, 2003).

Uma grande vantagem na utilização de pedras de calcário como agente neutralizante e material de suporte é que a solubilização do calcário ocorre naturalmente com o aumento da

acidez, dispensando assim, o uso de dispersores (RIBAS & CEREDA, 2003; RIBAS et al., 2010).

Além destas vantagens, a rocha calcária é frequente no meio rural, onde é processada na forma de um pó, amplamente utilizado em agricultura como agente neutralizante do solo. Segundo Sun et al. (2010) o calcário é de baixo custo e grande disponibilidade.

Apesar da literatura (OLIVEIRA-JUNIOR et al., 2012; TOMIELIS et al., 2017; RIBAS et al., 2010; RIBAS & CEREDA, 2003) haver avaliado como vantajoso o uso de pedras de calcário na DA, o processo só foi avaliado em faixa mesófila. Tomielis et al., (2017) informa ainda que seu uso não representa risco de implosão do reator porque o teor de cálcio permanece abaixo do limite de 2000 a 5000 mgCa⁺².L⁻¹ estabelecido por Kugelman et al. (1965) e Yu et. al. (2001). Por essa razão, o presente trabalho objetivou avaliar a partida e estabilidade de sistema biorreator UASB em faixa termofílica (52 +/- 2°C), utilizando vinhaça como substrato para geração de biogás e inóculo de esterco bovino.

MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa foi desenvolvida em laboratório, nas coordenções 20°23'17" latitude Sul e 54°36'26" longitude Oeste, a 538 metros de altitude.

Material

Para a realização dos testes, foi utilizada vinhaça de caldo originária de uma usina com produção de açúcar e etanol, situada na região da Grande Dourados, Mato Grosso do Sul, Brasil apresentando as características apresentadas na Tabela 2. Após caracterizada a vinhaça, foi armazenada em garrafas de polietileno terephthalato (PET) sob congelamento (-20° C) até o momento de uso. Para inóculo, foi utilizado esterco bovino fresco que foi obtido na coleta de dejetos na própria instituição de pesquisa no momento de ordenha. Aproximadamente 16 kg de

material foram diluídos em 30 L de água destilada e filtrados em peneiras malha 40 mesh e posteriormente, como inoculo caracterizado de acordo com os parâmetros da Tabela 2.

Tabela 2 - Caracterização físico-química do esterco bovino diluído utilizado como fonte de inoculo e da vinhaça utilizada como substrato.

Parâmetro	Unidade	Inoculo	Vinhaça de caldo
pH		7,3 ± 0,02	4,8 ± 0,02
Temperatura	°C	26	75
Densidade	g.cm ⁻³	1,01 ± 0,3	-
Demanda Química de Oxigênio	gO ₂ L ⁻¹	41,70 ± 0,3	21,2 ± 0,2
Sólidos Totais (ST)	mg L ⁻¹	16773 ± 2,2	12303 ± 1,3
Sólidos Totais Fixos (STF)	mg L ⁻¹	3802 ± 2,1	3497 ± 2,0
Sólidos Totais Voláteis (STV)	mg L ⁻¹	12971 ± 2,5	8826 ± 2,2
Alcalinidade Total	mg. L ⁻¹ CaCO ₃	1590 ± 1,2	393,3 ± 1,3
Ácidos Voláteis	mg.L ⁻¹ H _{ac}	1637,2 ± 1,5	1328 ± 1,4

Legenda: (-) sem dados.

As rochas de calcário empregadas como meio de suporte e neutralizante, foram obtidas da região de Bonito (Mato Grosso do Sul, Brasil). Sua granulometria foi padronizada, por meio de peneiras entre ABNT 1” (25,0 mm) e ABNT ¾” (19,0 mm) conforme preconizado por Oliveira-Junior et al (2012).

Especificações dos reatores

Para a realização do experimento foram utilizados reatores tipo UASB, confeccionados com tubos de Policloreto de Vinila (PVC) com capacidade total de 26,38 litros, como indicado na Figura 1, dotados de separador trifásico confeccionado em chapa galvanizada. Para a manutenção de temperatura do sistema, os reatores foram condicionados em recipiente metálico

e imersos em fluido mineral (óleo mineral), aquecido por meio de termostato elétrico (2000 W; a 110 V). Durante o procedimento, a temperatura do sistema foi ajustada em três estágios, correspondendo a ambiente ($26 \pm 2^\circ\text{C}$), mesofílica ($36 \pm 2^\circ\text{C}$) e termofílica ($52 \pm 2^\circ\text{C}$), empregando controlador de temperatura analógico (marca DIGImec[®], modelo FH-1).

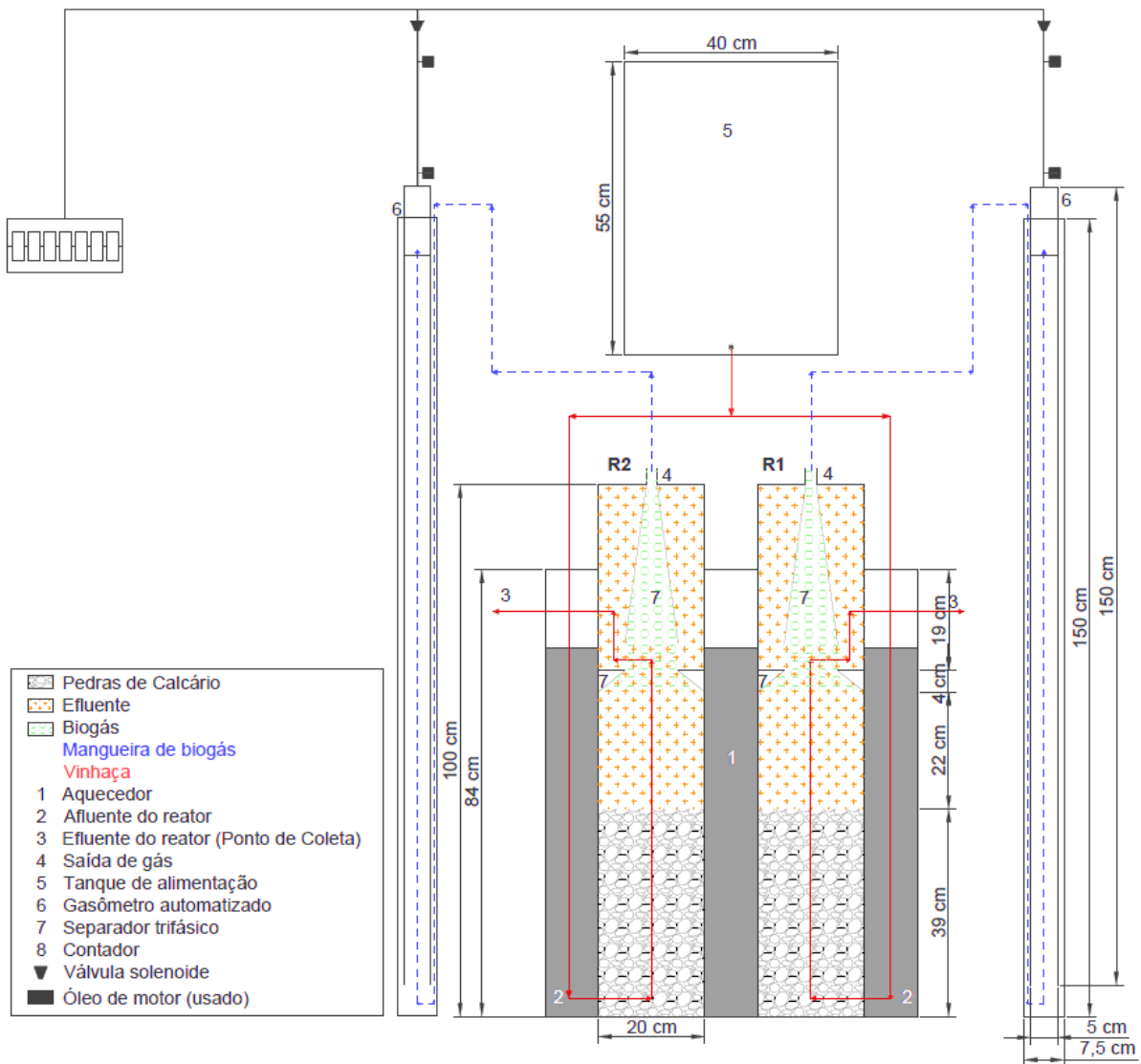


Figura 1. Esquema dos reatores utilizados com suas respectivas estruturas.

Cada reator possuía um gasômetro do tipo cúpula flutuante (Figura 1), também de tubos de PVC. Cada cúpula foi conectada a um contrapeso, impedindo a compressão do biogás produzido. O tubo mais longo, tampado na base permaneceu cheio de solução salina acidulada e 3% de ácido sulfúrico (H_2SO_4) (Fernandes-Junior, 1995). O volume de gás produzido

proporciona o deslocamento do tubo interno, resultando no registro automático do contador, de forma que a coleta e mensuração do volume do gás gerado foi em processo contínuo e automatizado.

Partida dos reatores

Colocação das pedras de calcário: Neste sistema, cerca de 16 kg de pedras de calcário foram condicionadas em sacos de rafia de plástico, correspondendo a aproximadamente 50% do volume do reator, foi utilizada uma proporção de 1,33kg de calcário para cada litro de afluente, adaptando a metodologia citada por Oliveira-Junior et al., (2012) que estabelece a proporção de 1,88 kg/L.

Estabilização do inoculo (esterco bovino fresco): Cada reator foi completamente preenchido com um volume de 15 L de inoculo. A carga orgânica desta batelada de inoculação foi de 0,58 gDQO.L⁻¹.d⁻¹ que permaneceu em temperatura ambiente, em torno de 26°C, e por 72 dias. A estabilização do inoculo foi confirmada pelo esgotamento na produção de biogás e estabilização da DQO em 8,4 gDQO.L⁻¹.d⁻¹. Esse limite passou a ser considerado para cálculo da DQO consumida e expressar a produção de gás em litros por grama de DQO consumido. Após o esgotamento da carga orgânica da suspensão de esterco em água, os 15 litros de inoculo foram considerados prontos para a aclimação ao substrato (vinhaça), diante do aumento de carga orgânica (Tabela 2), temperatura e redução do Tempo de Detenção Hidráulico (TDH).

Processo de aclimação: Após a estabilização do inoculo nos reatores em temperatura ambiente (26 +/- 2°C), iniciou-se a alimentação visando aclimatar os microrganismos com o substrato e sua carga orgânica, com acréscimo da vinhaça programada por previa diluição em água destilada, variando carga orgânica volumétrica (COV), tempo de detenção hidráulica (TDH), volume de alimentação (L) e temperatura (°C). A carga orgânica volumétrica para sistemas em batelada, foi estabelecida através da Equação 1 (FORESTI, 1999):

$$COV = \frac{V_{ALI} \cdot CA}{T_C \cdot V} \quad (\text{Equação 1})$$

onde:

COV = Carga Orgânica Volumétrica (gDQO.L⁻¹.dia⁻¹);

V_{ALI} = Volume água residuária por ciclo (L);

V = Volume útil do reator (L);

CA = Concentração de substrato no afluente (g DQO.L⁻¹);

tc = tempo de duração do ciclo (dia)

O experimento seguiu as diluições e variações estabelecidas na Tabela 3 até chegar a 80% do volume útil do reator (12L), temperatura de 52°C, tempo de detenção hidráulico de 4 dias e COV de 1,7 gDQO.L⁻¹.d⁻¹.

Alimentação: A vinhaça de alimentação foi descongelada em temperatura de geladeira, diluída para ajuste da carga orgânica estabelecida e aquecida de acordo com a temperatura de cada etapa (Tabela 3). O sistema de saída do efluente tratado como um sifão invertido, garantiu as condições anaeróbias dos reatores.

Foram utilizados os dois reatores de fluxo ascendente, alimentados por batelada, como duplicata (A e B).

Tabela 3 - Etapas da partida dos reatores A e B, com aumento gradual da temperatura, carga orgânica e redução do Tempo de Detenção Hidráulico (TDH).

Etapa	Volume de alimentação (L)	Concentração de vinhaça (%)	COV (gDQO.L ⁻¹ .d ⁻¹)	Temperatura (°C)	TDH (dias)
I	3,0	10	0,02	36	22
II	4,5	10	0,11	36	6
III	4,5	20	0,32	36	4
IV	6	20	0,42	36	4
V	7,5	20	0,53	52	4
VI	10,5	20	0,74	52	4
VII	12	20	0,85	52	4
VIII	12	30	1,27	52	4
IX	12	40	1,70	52	4

Monitoramento

As análises de caracterização físico-química do inoculo, da vinhaça e do efluente dos reatores foram realizadas seguindo o procedimento descrito pela APHA (2012) para determinação de potencial hidrogeniônico (pH), Demanda Química de Oxigênio (DQO), Acidez volátil (AV), Alcalinidade Total (AT), Sólidos Totais (ST), Sólidos Totais Voláteis (STV) e Sólidos Totais Fixos (STF).

Cálculo do rendimento de biogás: O rendimento de gás foi estabelecido pela razão entre a quantidade de gás gerado e a quantidade de matéria orgânica consumida calculada a partir da amostra coletada durante o TDH de cada etapa realizada, por meio da Equação 2:

$$\text{Rendimento gás} = \frac{Prd_{ac.}}{C_{consumida}} \quad (\text{Equação 2})$$

onde:

$Prd_{ac.}$ = Produção acumulada de biogás (Lgás);

Consumida= carga orgânica consumida entre as alimentações (gDQO consumida)

Análise dos dados: Foi realizada estatística básica estabelecendo média e desvio padrão por Excel. As medias obtidas foram comparadas por teste Tukey com 5% de probabilidade (Statistica 7,0). Quando necessário, foram elaborados gráficos com linhas de tendências onde o ajuste das curvas é qualificado através dos valores de regressão R^2 que mostra a adesão dos resultados experimentais ao modelo selecionado.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Estabilização do inoculo

A fase de estabilização do inoculo, se considera encerrada quando cessa a produção de gás, durou 72 dias ainda em temperatura ambiente, e foi maior que o relatado por Palma (2012), que em tratamento por DA de águas residuárias de fecularia, usando como inoculo lodo anaeróbio proveniente de biodigestor que já vinha sendo alimentado com o mesmo substrato, conseguiu a mesma estabilização em apenas 34 dias. Por outro lado, Magalhães Filho et al. (2017) relatam um período maior, de 140 dias quando usaram também esterco bovino para partida de substrato de vinhaça, em reator UASB.

O perfil da produção de gás registradas nos reatores A e B está representada na Figura 2.

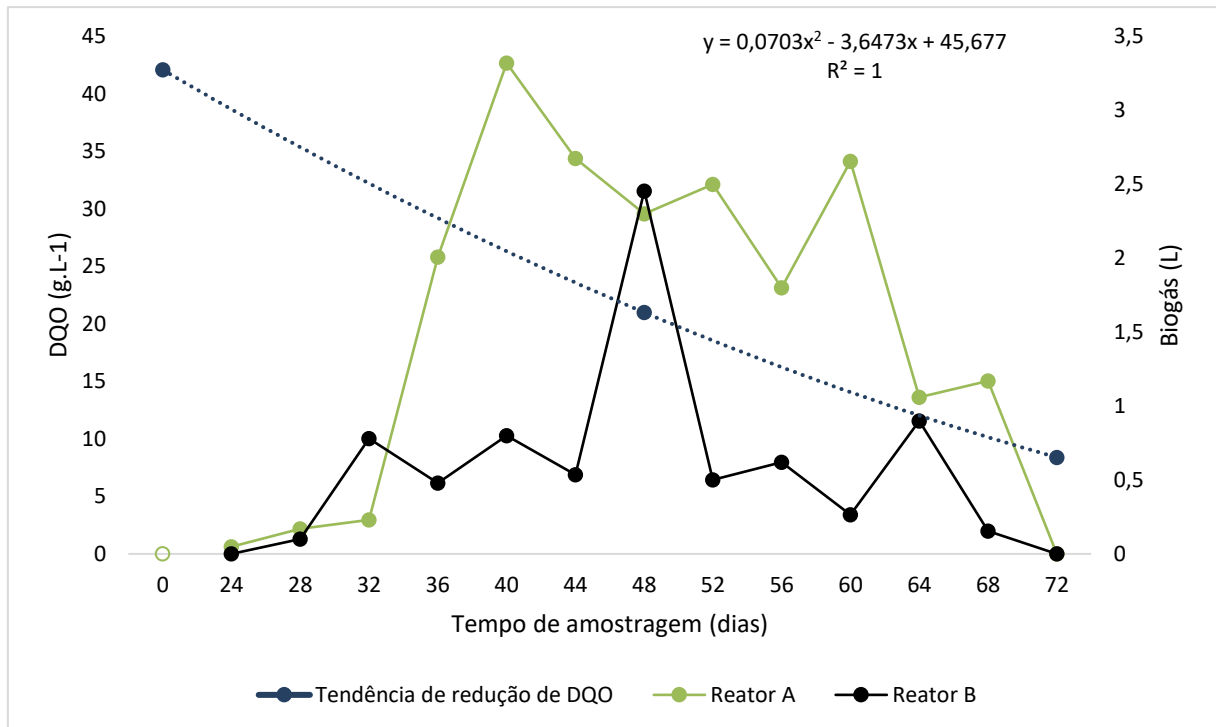


Figura 2. Perfil da produção de gás durante a estabilização do inoculo de esterco bovino em reatores UASB e decaimento de DQO.

Aos 48 dias, ainda na fase de estabilização, o rendimento de gás no reator A foi de 0,11 Lgás.DQOconsumido-1, enquanto no reator B foi de 0,12 Lgás.DQOconsumido-1.

A Figura mostra ainda que houve diferença na produção de gás entre os reatores, assim como um deslocamento entre os picos do Reator A em relação ao B, mas ao final de estabilização os valores convergiram. Essa divergência pode ser causada pela falta de uniformidade do esterco, mesmo que peneirado. Após o pico, houve redução gradual na produção de gás para ambos os reatores, até a parada no registro no gasômetro. Pramod et al. (2011) cita que o esterco bovino leva 18 dias para iniciar a produção de biogás decorrente da digestão anaeróbia.

Após identificar a interrupção, foi estabelecido um período de 3 TDH (12 dias) para garantir que não havia mais produção de biogás. Devido às baixas quantidades de produção de

gás aferidas diariamente durante a fase de estabilização de inoculo, nesta fase optou-se por agrupar as produções a cada 4 dias.

Silva (2014) relata que em experimento realizado com lodo anaeróbio em faixa mesófila, a adaptação ao resíduo orgânico alimentar, composta de restos de alimentos de um restaurante universitário, foi muito rápida, verificada pela produção crescente de metano já nos primeiros dias de testes. No mesmo experimento, o esterco bovino avaliado nas mesmas condições, produziu metano após aproximadamente 20 dias.

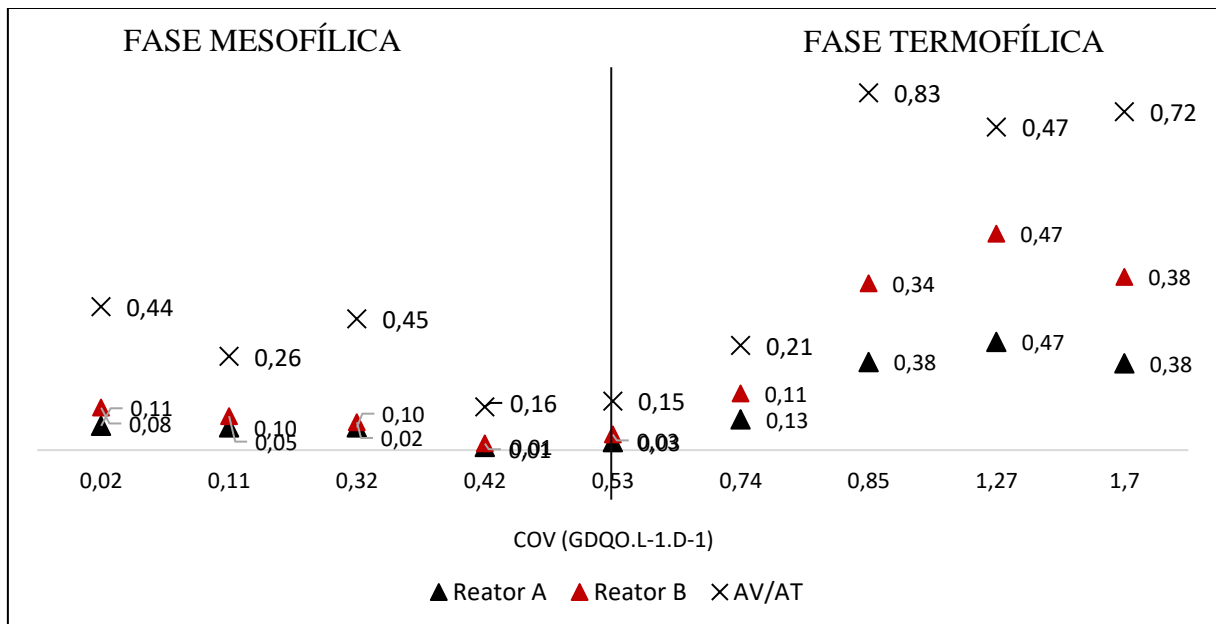
A mesma Figura (2) permite perceber que no reator A houve, de uma forma geral, maior produção de gás em relação ao reator B que teve seu ponto máximo de produção em 2,45 Lgás, embora essa diferença possa não ser significativa, no reator A apresentou um pico de produção de 3,32 Lgás 8 dias mais cedo que o reator B. A matéria orgânica, expressa como DQO, consumida durante o processo de estabilização apresentou um comportamento polinomial compatível com equação: $Y=0,0703x^2-3,6473x+45,677$ ($R^2=1,0$). No final da estabilização o DQO manteve-se em 8,4 g.L⁻¹.

Souza et al. (1992) observou 50 dias para alcançar adaptação do inoculo que era constituído de esterco bovino em conjunto com lodo de estação de tratamento de esgoto em condição operacional regular com COV de 0,2 a 1,0 g DQO/L.d em reator UASB termofílico. Os autores também lembram que o tempo de adaptação de reatores mesofílicos também é grande. Desta forma, é possível afirmar que o tempo de estabilização é muito variável.

Fase de aclimação

Kispergher (2013) afirma que quando um reator semi-contínuo é operado com tempos de detenção maiores (15 a 20 dias), a matéria orgânica é convertida essencialmente em nova biomassa. A redução do TDH aumenta a turbulência no leito e conseqüentemente a disponibilidade de substrato. Desta forma, a biomassa aderida ao recheio produz biogás com maior eficiência.

O rendimento de litros de biogás produzido na fase neste estudo, ficou entre 0,01 e 0,47 L biogás.g DQO consumida (Figura 3), valor esse próximo aos resultados apresentados por Kunzler et al. (2013) ao operar dois reatores com suporte de bambu, no tratamento de efluente de fécula de mandioca com COV de 0,52 a 5,60 gDQO.L⁻¹.d⁻¹ e obtendo 0,42 e 0,60 Lbiogás.gDQO consumido⁻¹.



Legenda: (▲) Rendimento de litros de biogás por grama de DQO consumida; (X) Relação AV/AT.

Figura 3: Comportamento do rendimento de biogás diante do aumento da carga orgânica e mudança de temperatura, na fase de aclimação.

Os resultados obtidos mostraram que, assim que o sistema atingiu a faixa termofílica, a produção de biogás no reator A aumentou exponencialmente, da mesma forma o reator B. E também é possível perceber que a estabilidade monitorada pela relação AV/AT influencia diretamente o rendimento de gás, tendo em vista que a neutralização do pH garante melhor desempenho na produção de gás pelos microrganismos, como pode ser observado na Figura 3. Deublein & Steinhauser (2011) afirmam que a partir do momento que o inoculo está adaptado

ao ambiente e ao substrato, a produção de biogás acumulada no tempo segue um modelo exponencial

A Tabela 4 resume os resultados dos parâmetros analisados para os reatores A e B durante o período de aclimação demonstrando que não diferiram estatisticamente entre si, mas houve diferença entre as etapas, principalmente para a relação AV/AT, que por sua vez influenciou o pH. E também possível observar a influência do calcário usado como material de suporte e agente neutralizante na manutenção do pH e relação AV/AT.

Tabela 4 – Monitoramento da partida dos reatores A e B com aumento gradual da temperatura e carga orgânica e redução do Tempo de Residência Hidráulico (TDH) (média de 3 repetições).

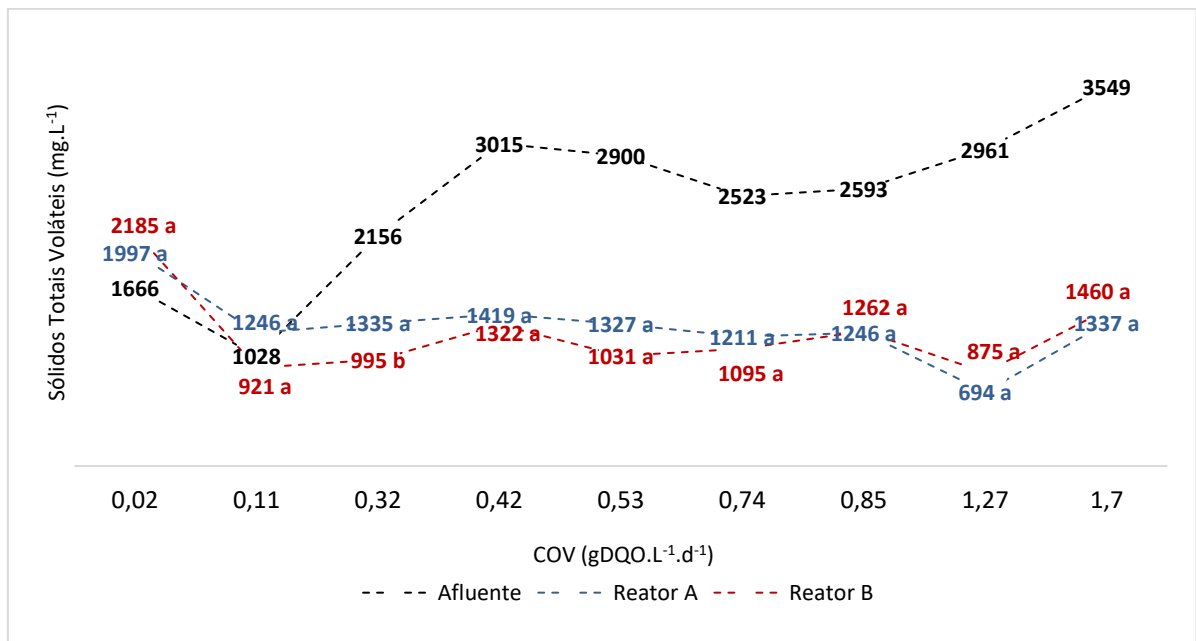
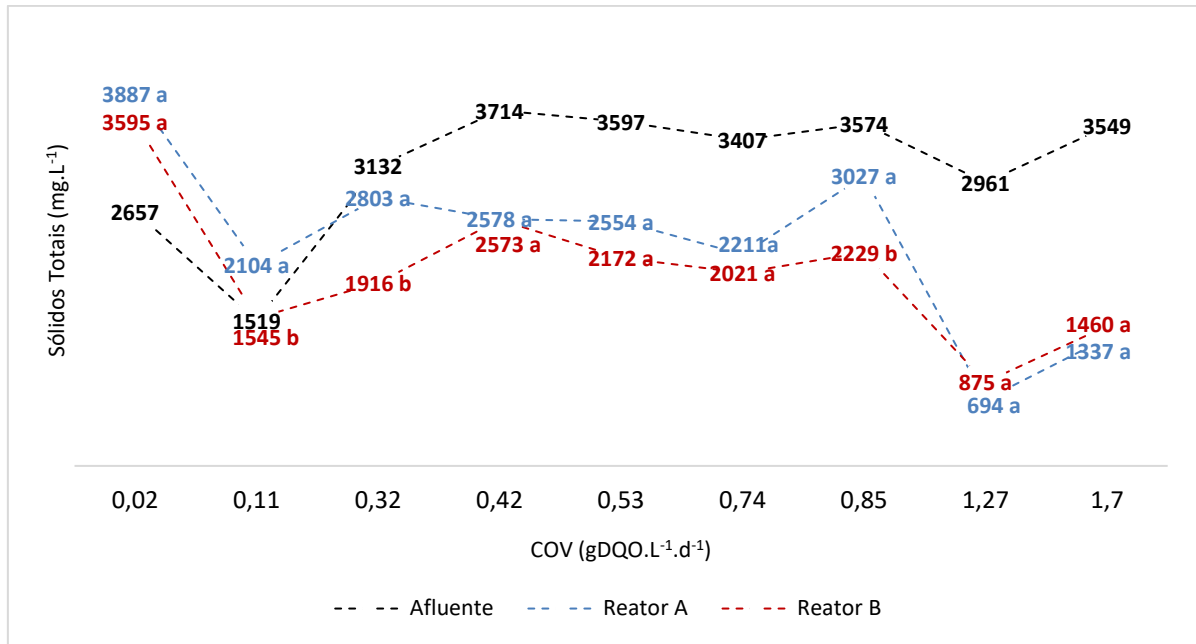
Etapas	Parâmetros	Afluente	Efluente	
			Reator A	Reator B
I	pH	4,8 ± 0,3	7,0 ± 0,2 aB	7,2 ± 0,1 aB
	AV/AT	-	0,43 ± 0,03 aC	0,45 ± 0,04 aC
II	pH	4,2 ± 0,2	7,2 ± 0,1 aB	7,5 ± 0,1 aB
	AV/AT	-	0,29 ± 0,03 aD	0,26 ± 0,03 aD
III	pH	4,5 ± 0,2	7,8 ± 0,2 aB	8,0 ± 0,2 aA
	AV/AT	-	0,45 ± 0,04 aC	0,45 ± 0,05 aC
IV	pH	4,7 ± 0,3	8,3 ± 0,1 aA	7,3 ± 0,1 aB
	AV/AT	-	0,15 ± 0,02 aE	0,17 ± 0,02 aE
V	pH	4,3 ± 0,2	7,3 ± 0,1 aB	7,1 ± 0,3 aC
	AV/AT	-	0,15 ± 0,02 aE	0,14 ± 0,03 aE
VI	pH	4,6 ± 0,1	7,0 ± 0,01 aB	7,1 ± 0,01 aC
	AV/AT	-	0,16 ± 0,04 aE	0,26 ± 0,03 aD
VII	pH	4,6 ± 0,1	6,6 ± 0,3 aC	7,2 ± 0,4 aC
	AV/AT	-	0,86 ± 0,03 aA	0,80 ± 0,05 aA
VIII	pH	4,58 ± 0,02	7,65 ± 0,04 aB	7,74 ± 0,01 aA
	AV/AT	-	0,46 ± 0,01 aC	0,47 ± 0,02 aC
IX	pH	4,61 ± 0,01	7,52 ± 0,02 aB	7,34 ± 0,02 aB
	AV/AT	-	0,72 ± 0,02 aB	0,76 ± 0,03 aB

Legenda: (-) não foi possível quantificar devido ao baixo pH; (pH) Potencial hidrogeniônico; (AV/AT) relação ácidos voláteis e alcalinidade total. Letras minúsculas iguais na linha e letras maiúsculas iguais na coluna, não apresentam diferença significativa entre si pelo teste de Tukey a 5% ($p < 0,05$).

A alcalinidade é a capacidade de neutralizar os ácidos formados durante a digestão e assim, evitar mudanças bruscas de pH e é também conhecida como capacidade de tamponamento do meio. A alcalinidade total proporciona capacidade tampão ao meio para valores entre 2500 e 5000 mgCaCO₃.L⁻¹ (CHERNICHARO, 2007; RAPOSO et al., 2012).

Como o pH da vinhaça de afluente dos reatores A e B foi aferida a cada alimentação, mantendo-se entre 4,3 e 4,8 no decorrer do experimento, as variações observadas são resultado do metabolismo microbiano e do poder tamponante. Já as médias de pH de efluente nos reatores variaram entre 7 e 8. Esses valores foram superiores aos relatados por Palma (2012) que encontrou pH entre 6,52 a 6,87 no tratamento de água residuária de fecularia usando leito fixo de pedras de calcário dolomítico. Por outro lado, a relação entre Ácidos Voláteis / Alcalinidade Total (AV / AT) variou de 0,2 a 0,8, pouco mais que o relatado por Tomielis (2017) que apresentou resultados entre 0,2 e 0,4 para vinhaça de caldo. Os mesmos autores explicam que no caso de uso de pedras de calcário, os ácidos formados durante a digestão são prontamente neutralizados e, portanto, não chegam a influenciar fortemente o pH, além de ser uma resposta às dificuldades relatadas por Fuess et al. (2017) como fator limitante para a ampliação da digestão anaeróbica nas usinas de cana-de-açúcar.

Nos dados obtidos, pode-se perceber que a concentração de sólidos totais aumenta no efluente até a carga orgânica de 0,11 gDQO.L⁻¹.d⁻¹, comportamento esse que se inverte com o aumento o volume de vinhaça no sistema, por conter grande concentração de sólidos. Essa inversão pode ser observada a partir da COV de 0,32 gDQO.L⁻¹.d⁻¹ (Figura 3).



Legenda: Letras minúsculas iguais na linha, não apresentam diferença significativa entre si pelo teste de Tukey a 5% ($p < 0,05$).

Figura 4: Influência da aclimação sobre os sólidos totais e sólidos totais voláteis durante a partida dos reatores.

De acordo com Tomielis et al. (2017), a neutralização dos ácidos formados na fase acidogênica da digestão anaeróbica da vinhaça ocorrem devido ao desgaste do calcário, portanto é esperado o aumento dos sólidos fixados no efluente, principalmente pela insolubilização de carbonato de cálcio.

Hartmann e Ahring (2005) utilizaram como inoculo esterco bovino, temperatura de 55°C, 25% de ST e tempo de detenção entre 14 e 18 dias no tratamento de fração orgânica de resíduos sólidos urbanos. Os reatores inoculados com esterco bovino obtiveram taxa de degradação de Sólidos Totais Voláteis entre 69 e 74%.

Mesmo expondo o sistema a um gradiente de aumento de temperatura (26, 36 e 52°C), redução do tempo de detenção hidráulico (22, 6 e 4 dias) e aumento de carga orgânica, pode-se observar ainda uma rápida resposta em relação à produção de biogás, remoção de ST e STV e, ainda, a eficiência da pedra de calcário na manutenção da estabilidade.

Os resultados acenam como boa probabilidade de que seja tecnicamente possível operar a DA de vinhaça na fase termófila até a temperatura de 52°C avaliada, conforme as condições adotadas, mas isso deverá ser comprovado experimentalmente por um tempo suficientemente longo.

CONCLUSÃO

A inoculação de reator UASB com esterco bovino proporcionou uma resposta satisfatória na fase de estabilização, produzindo 0,12 Lgás.DQOconsumida⁻¹ nos 72 dias em que durou, estacionando em uma carga orgânica de 8,4 gDQO.L⁻¹.

Durante a fase de aclimatação, as pedras de calcário auxiliaram na estabilidade dos sistemas e mostraram eficiência na neutralização da vinhaça, elevando o pH do efluente de 4,3 a até 8,0, ao mesmo tempo que manteve a relação AV/AT dentro do intervalo considerado ideal para a digestão anaeróbia. Quanto ao rendimento de biogás neste período, aumentou de 0,03 a 0,47 Lgás.DQOconsumida⁻¹, confirmando a maior produtividade em temperatura de 52°C, faixa termófila.

REFERÊNCIAS

APHA; AWWA; WPCF. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. Washington: American Public Health Association, 2012. 1496 p.

BONCZ, M. A.; FORMAGINI, E. L.; SANTOS, L. DA S.; MARQUES, R. D.; PAULO, P. L. Application of urea dosing for alkalinity supply during anaerobic digestion of vinasse. *Water Science Technology*, v.66, n.11, p.2453, 2012.

BURKE, Dennis A. P. E. Dairy Waste Anaerobic Digestion Handbook. **Environmental Energy Company**, Olympia, WA. (2001).

CAMPOS, C. M. M. et al. Partida de um sistema anaeróbio em escala piloto constando de um tanque de contato seguido de um reator UASB tratando efluente de laticínio. **Anais do seminário Latino-Americano de Digestão Anaeróbia**, Recife, 2000, v. 2, p. 61-64.

CABELLO P. E., SCOGNAMIGLIO F. P. E TERÁN F. J. Tratamento de vinhaça em reator anaeróbio de leito fluidizado. *Engenharia Ambiental – Espírito Santo do Pinhal*, 6(1), 321- 338, 2009.

DEUBLEIN, Dieter; STEINHAUSER, Angelika. **Biogas from Waste and Renewable Resources: an introduction**. 2º ed. Weinheim: Wiley-Vch, 2011.

FORESTI E., FLORÊNCIO L., VAN HAANDEL A. C., ZAIAT M. E CAVALCANTI P. F. (1999). Fundamentos do tratamento anaeróbio. In: Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo. Campos J. R. (ed.), PROSAB, ABES, Rio de Janeiro – RJ, Brasil.

HARTMANN, H.; MOLLER, H.B.; AHRING, B.K. (2004) “Efficiency of the anaerobic treatment of the organic fraction of municipal solid waste: collection and pre-treatment”. **Waste Management and Research**. 22: 35–41.

KISPERGHER, E. M. **Digestão anaeróbia de efluentes da indústria de alimentos**. Dissertação (meistrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Alimentos. Curitiba, 2013.

KUGELMAN, I.J.; MCCARTY, P.L. Cation toxicity and simulation in anaerobic waste treatment. **Journal Water Pollution Control Federation**, v.37, p.97-166, 1965.

KUNZLER, K. R.; GOMES, S. D.; PIANA, P. A.; TORRES, D. G. B.; BOAS, M. A. V.; TAVARES, M. H. F. Anaerobic reactors with biofilter and different diameter-length ratios in cassava starch industry wastewater treatment. **Eng. Agríc. [online]**. 2013, vol.33, n.4, pp.612-624. ISSN 0100-6916. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162013000400003>

MAGALHÃES FILHO. F. J. C., GREGIO L. G. F., AZEVEDO J. B., PAIVA A. S. DE, GUILHERME, D. DE O., CEREDA M. P. Fertilizer effect of UASB (55°C) effluent with limestone as fixed bed treating vinasse on development of *Brachiaria brizantha* cv. Xaraés. **Desalination and Water Treatment**. V. 91, pg. 240–244, 2017.

PALMA D., **Tratamento de Água Ressudaria de Fecularia em Reator Anaeróbio Contendo Pedras de Calcário Dolomítico**. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Dissertação (Pós-Graduação), Cascavel – PR, 2012.

PRAMOD K. PANDEY, et al. Efficacies of inocula on the startup of anaerobic reactors treating dairy manure under stirred and unstirred conditions. **Biomass and Bioenergy**.V. 35, p. 2705-2720, 2011.

RIBAS, MMF; CEREDA, MP Estabilização da mandioca águas residuais durante a fase acidogênica em um reator anaeróbio com hidróxido de sódio e dois tamanhos de calcário dolomítico. **Diário de culturas de raízes**, v.29, n.2, p.1-6, 2003.

RIBAS, M. M. F.; CEREDA, M. P.; VILLAS BÔAS, R.L. Use of cassava wastewater treated anaerobically with alkaline agents as fertilizer for maize (*Zea mays* L.). **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 53, n. 1, p. 55-62, feb. 2010. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-89132010000100007.

SILVA, M.A.S.; GRIEBELER, N.P.; BORGES, L.C. Uso de vinhaça e impactos nas propriedades do solo e lençol freático. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e**

Ambiental, v. 11, n. 1, p. 108-114, 2007. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v11n1/v11n1a14>>. Acesso em: mai. 2015.

SILVA, M. C. P. Avaliação de lodo anaeróbio e dejetos bovinos como potenciais inóculos para partida de digestores anaeróbios de resíduos alimentares. 2014. Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

SIMABUCO, S.M., NASCIMENTO FILHO, V.F. Study on vinasse dynamics in soil using energy dispersive X-ray fluorescence with radioisotopic excitation. **Scientia agricola**, v. 51, n. 2, p. 207-215, mai. 1994. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/sa/v51n2/02.pdf>>. Acesso em: jun. 2015. doi: 10.1590/S0103-90161994000200002.

SUN, B. et al. Effect of particle size in a limestone–hydrochloric acid reaction system. **Journal of Hazardous Materials**, v.179, n.1-3, p.400-408, 2010. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com / science / article / pii / S0304389410003249>>. Acessado: 18 de outubro 2018. doi: 10.1016 / j.jhazmat.2010.03.018.

TOMIELIS, I. P.; BARCELOS, S. T. V.; CEREDA, M. P. Hydraulic retention time on vinasse stabilisation with limestone in the acidogenic phase of anaerobic digestion. **Ciência Rural**, v. 47, n. 9, 2017.

TORRES, D. G. B. **Meios-suporte no tratamento anaeróbio da manipueira**. 68f. 2009, Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, PR, 2009.

TORRES P., PÉREZ A., CAJIGAS A. A., OTERO A. M. E GONZÁLEZ M. Evaluación de diferentes alcalinizantes em el tratamiento anaeróbio de aguas fácilmente acidificables. Caso: agua residual del proceso de extracción de almidón de yuca. In: VIII Taller Y **Simposio Latinoamericano sobre Digestión Anaerobia**. Punta del Este, Uruguay, 571-575, 2005.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE - USDA. **Foreign Agricultural Service (FAS)**. Grain: world markets and trade. United States: USDA/FAS, nov. 2017.

VON SPERLING, M. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 3. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais, 2005.

WILKIE, A. C., RIEDESEL, K. J., OWENS, J.M., Stillage characterization and anaerobic treatment of ethanol stillage from conventional and cellulosic feedstocks. **Biomass and Bioenergy**, 19, p. 63-102. 2000.

YU, H.Q. et al. The roles of calcium in sludge granulation during UASB reactor start-up. **Water Research**, v.35, n.4, p.1052-1060, 2001. Available from: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135400003456>>. Accessed: Sept. 25, 2016. doi: 10.1016/S0043-1354(00)00345-6.

ZHANG, Y et al. Rapid startup of a hybrid UASB-AFF reactor using bi-circulation. **Chemical Engineering Journal**. V. 155, p. 266-271, 2009.

NORMAS DA REVISTA CIENTÍFICA

1. CIÊNCIA RURAL - Revista Científica do Centro de Ciências Rurais da Universidade Federal de Santa Maria publica artigos científicos, revisões bibliográficas e notas referentes à área de Ciências Agrárias, que deverão ser destinados com exclusividade.

2. Os artigos científicos, revisões e notas devem ser encaminhados via eletrônica e editados preferencialmente em idioma Inglês. Os encaminhados em Português poderão ser traduzidos após a 1º rodada de avaliação para que ainda sejam revisados pelos consultores ad hoc e editor associado em rodada subsequente. Entretanto, caso não traduzidos nesta etapa e se aprovados para publicação, terão que ser obrigatoriamente traduzidos para o Inglês por empresas credenciadas pela Ciência Rural e obrigatoriamente terão que apresentar o certificado de tradução pelas mesmas para seguir tramitação na CR.

Empresas credenciadas:

- Alexandre Paulino Loretto (aploretti@gmail.com)
- American Journal Experts (<http://www.journalexperts.com/>)
- Bioedit Scientific Editing (<http://www.bioedit.co.uk/>)
- BioMed Proofreading (<http://www.biomedproofreading.com>)
- Edanz (<http://www.edanzediting.com>)
- Editage (<http://www.editage.com.br/>) 10% discount for CR clients. Please inform Crural10 code.
- Enago (<http://www.enago.com.br/forjournal/>) Please inform CIRURAL for special rates.
- GlobalEdico (<http://www.globaledico.com/>)
- JournalPrep (<http://www.journalprep.com>)

- Liberty Medical Communications (<http://libertymedcom.com/>)
- Paulo Boschcov (paulo@bridgetextos.com.br, bridge.textecn@gmail.com)
- Proof-Reading-Service.com (<http://www.proof-reading-service.com/pt/>)
- Readytopub (<https://www.readytopub.com/home>)

O trabalho após tradução e o respectivo certificado devem ser enviados para:
rudiweiblen@gmail.com

As despesas de tradução serão por conta dos autores. Todas as linhas deverão ser numeradas e paginadas no lado inferior direito. O trabalho deverá ser digitado em tamanho A4 210 x 297mm com, no máximo, 25 linhas por página em espaço duplo, com margens superior, inferior, esquerda e direita em 2,5cm, fonte Times New Roman e tamanho 12. O máximo de páginas será 15 para artigo científico, 20 para revisão bibliográfica e 8 para nota, incluindo tabelas, gráficos e figuras. Figuras, gráficos e tabelas devem ser disponibilizados ao final do texto e individualmente por página, sendo que não poderão ultrapassar as margens e nem estar com apresentação paisagem.

Tendo em vista o formato de publicação eletrônica estaremos considerando manuscritos com páginas adicionais além dos limites acima. No entanto, os trabalhos aprovados que possuírem páginas além do estipulado terão um custo adicional para a publicação (vide taxa).

3. O artigo científico (Modelo .doc, .pdf) deverá conter os seguintes tópicos: Título (Português e Inglês); Resumo; Palavras-chave; Abstract; Key words; Introdução com Revisão de Literatura; Material e Métodos; Resultados e Discussão; Conclusão; Referências e Declaração de conflito de interesses. Agradecimento(s) e Apresentação; Contribuição dos autores; Fontes de Aquisição; Informe Verbal; Comitê de Ética e Biossegurança devem aparecer antes das referências. Pesquisa envolvendo seres humanos e animais obrigatoriamente devem apresentar parecer de aprovação de um comitê de ética institucional já na submissão. Alternativamente pode ser enviado um dos modelos ao lado (Declaração Modelo Humano, Declaração Modelo Animal).

4. A revisão bibliográfica (Modelo .doc, .pdf) deverá conter os seguintes tópicos: Título (Português e Inglês); Resumo; Palavras-chave; Abstract; Key words; Introdução; Desenvolvimento; Conclusão; Referências e Declaração de conflito de interesses. Agradecimento(s) e Apresentação; Contribuição dos autores; Fontes de Aquisição e Informe Verbal; Comitê de Ética e Biossegurança devem aparecer antes das referências. Pesquisa envolvendo seres humanos e animais obrigatoriamente devem apresentar parecer de aprovação de um comitê de ética institucional já na submissão. Alternativamente pode ser enviado um dos modelos ao lado (Declaração Modelo Humano, Declaração Modelo Animal).

5. A nota (Modelo .doc, .pdf) deverá conter os seguintes tópicos: Título (Português e Inglês); Resumo; Palavras-chave; Abstract; Key words; Texto (sem subdivisão, porém com introdução; metodologia; resultados e discussão e conclusão; podendo conter tabelas ou figuras); Referências e Declaração de conflito de interesses. Agradecimento(s) e Apresentação; Contribuição dos autores; Fontes de Aquisição e Informe Verbal; Comitê de Ética e Biossegurança devem aparecer antes das referências. Pesquisa envolvendo seres humanos e animais obrigatoriamente devem apresentar parecer de aprovação de um comitê de ética institucional já na submissão. Alternativamente pode ser enviado um dos modelos ao lado (Declaração Modelo Humano, Declaração Modelo Animal).

6. O preenchimento do campo "cover letter" deve apresentar, obrigatoriamente, as seguintes informações em inglês, exceto para artigos submetidos em português (lembrando que preferencialmente os artigos devem ser submetidos em inglês).

- a) What is the major scientific accomplishment of your study?
- b) The question your research answers?
- c) Your major experimental results and overall findings?
- d) The most important conclusions that can be drawn from your research?
- e) Any other details that will encourage the editor to send your manuscript for review?

Para maiores informações acesse o seguinte tutorial.

7. Não serão fornecidas separatas. Os artigos encontram-se disponíveis no formato pdf no endereço eletrônico da revista www.scielo.br/cr.

8. Descrever o título em português e inglês (caso o artigo seja em português) - inglês e português (caso o artigo seja em inglês). Somente a primeira letra do título do artigo deve ser maiúscula exceto no caso de nomes próprios. Evitar abreviaturas e nomes científicos no título. O nome científico só deve ser empregado quando estritamente necessário. Esses devem aparecer nas palavras-chave, resumo e demais seções quando necessários.

9. As citações dos autores, no texto, deverão ser feitas com letras maiúsculas seguidas do ano de publicação, conforme exemplos: Esses resultados estão de acordo com os reportados por MILLER & KIPLINGER (1966) e LEE et al. (1996), como uma má formação congênita (MOULTON, 1978).

10. Nesse link é disponibilizado o arquivo de estilo para uso com o software EndNote (o EndNote é um software de gerenciamento de referências, usado para gerenciar bibliografias ao escrever ensaios e artigos). Também é disponibilizado nesse link o arquivo de estilo para uso com o software Mendeley.

11. As Referências deverão ser efetuadas no estilo ABNT (NBR 6023/2000) conforme normas próprias da revista.

11.1. Citação de livro:

JENNINGS, P.B. The practice of large animal surgery. Philadelphia : Saunders, 1985. 2v.

TOKARNIA, C.H. et al. (Mais de dois autores) Plantas tóxicas da Amazônia a bovinos e outros herbívoros. Manaus : INPA, 1979. 95p.

11.2. Capítulo de livro com autoria:

GORBAMAN, A. A comparative pathology of thyroid. In: HAZARD, J.B.; SMITH, D.E. The thyroid. Baltimore : Williams & Wilkins, 1964. Cap.2, p.32-48.

11.3. Capítulo de livro sem autoria:

COCHRAN, W.C. The estimation of sample size. In: _____. Sampling techniques. 3.ed. New York : John Willey, 1977. Cap.4, p.72-90.

TURNER, A.S.; McILWRAITH, C.W. Fluidoterapia. In: _____. Técnicas cirúrgicas em animais de grande porte. São Paulo : Roca, 1985. p.29-40.

11.4. Artigo completo:

O autor deverá acrescentar a url para o artigo referenciado e o número de identificação DOI (Digital Object Identifiers), conforme exemplos abaixo:

MEWIS, I.; ULRICHS, CH. Action of amorphous diatomaceous earth against different stages of the stored product pests *Tribolium confusum* (Coleoptera: Tenebrionidae), *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae), *Sitophilus granarius* (Coleoptera: Curculionidae) and *Plodia interpunctella* (Lepidoptera: Pyralidae). *Journal of Stored Product Research*, Amsterdam (Cidade opcional), v.37, p.153-164, 2001. Available from: <[http://dx.doi.org/10.1016/S0022-474X\(00\)00016-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-474X(00)00016-3)>. Accessed: Mar. 18, 2002. doi: 10.1016/S0022-474X(00)00016-3.

PINTO JUNIOR, A.R. et al (Mais de 2 autores). Response of *Sitophilus oryzae* (L.), *Cryptolestes ferrugineus* (Stephens) and *Oryzaephilus surinamensis* (L.) to different concentrations of diatomaceous earth in bulk stored wheat. *Ciência Rural*, Santa Maria (Cidade opcional), v. 38, n. 8, p.2103-2108, nov. 2008. Available from: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-84782008000800002&lng=pt&nrm=iso>. Accessed: Mar. 18, 2009. doi: 10.1590/S0103-84782008000800002.

SENA, D. A. et al. Vigor tests to evaluate the physiological quality of corn seeds cv. 'Sertanejo'. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 47, n. 3, e20150705, 2017. Available from: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-84782017000300151&lng=pt&nrm=iso>. Accessed: Mar. 18, 2017. Epub 15-Dez-2016. doi: 10.1590/0103-8478cr20150705 (Artigo publicado eletronicamente).

11.5. Resumos:

RIZZARDI, M.A.; MILGIORANÇA, M.E. Avaliação de cultivares do ensaio nacional de girassol, Passo Fundo, RS, 1991/92. In: JORNADA DE PESQUISA DA UFSM, 1., 1992, Santa Maria, RS. Anais... Santa Maria : Pró-reitoria de Pós-graduação e Pesquisa, 1992. V.1. 420p. p.236. (OBS.: tentar evitar esse tipo de citação).

11.6. Tese, dissertação:

COSTA, J.M.B. Estudo comparativo de algumas características digestivas entre bovinos (Charolês) e bubalinos (Jafarabad). 1986. 132f. Monografia/Dissertação/Tese (Especialização/ Mestrado/Doutorado em Zootecnia) - Curso de Pós-graduação em Zootecnia, Universidade Federal de Santa Maria. (OBS.: tentar evitar esse tipo de citação).

11.7. Boletim:

ROGIK, F.A. Indústria da lactose. São Paulo : Departamento de Produção Animal, 1942. 20p. (Boletim Técnico, 20). (OBS.: tentar evitar esse tipo de citação).

11.8. Informação verbal:

Identificada no próprio texto logo após a informação, através da expressão entre parênteses. Exemplo: ... são achados descritos por Vieira (1991 - Informe verbal). Ao final do texto, antes das Referências Bibliográficas, citar o endereço completo do autor (incluir E-mail), e/ou local, evento, data e tipo de apresentação na qual foi emitida a informação.

11.9. Documentos eletrônicos:

MATERA, J.M. Afecções cirúrgicas da coluna vertebral: análise sobre as possibilidades do tratamento cirúrgico. São Paulo : Departamento de Cirurgia, FMVZ-USP, 1997. 1 CD. (OBS.: tentar evitar esse tipo de citação).

GRIFON, D.M. Arthroscopic diagnosis of elbow displasia. In: WORLD SMALL ANIMAL VETERINARY CONGRESS, 31., 2006, Prague, Czech Republic. Proceedings... Prague: WSAVA, 2006. p.630-636. Online. Available from: <<http://www.ivis.org/proceedings/wsava/2006/lecture22/Griffon1.pdf?LA=1>>. Accessed: Mar. 18, 2005 (OBS.: tentar evitar esse tipo de citação).

UFRGS. Transgênicos. Zero Hora Digital, Porto Alegre, 23 mar. 2000. Especiais. Online. Available from: <<http://www.zh.com.br/especial/index.htm>>. Accessed: Mar. 18, 2001(OBS.: tentar evitar esse tipo de citação).

ONGPHIPHADHANAKUL, B. Prevention of postmenopausal bone loss by low and conventional doses of calcitriol or conjugated equine estrogen. Maturitas, (Ireland), v.34, n.2, p.179-184, Feb 15, 2000. Obtido via base de dados MEDLINE. 1994-2000. Online. Available from: <[http://www. Medscape.com/server-java/MedlineSearchForm](http://www.Medscape.com/server-java/MedlineSearchForm)>. Accessed: Mar. 18, 2007.

MARCHIONATTI, A.; PIPPI, N.L. Análise comparativa entre duas técnicas de recuperação de úlcera de córnea não infectada em nível de estroma médio. In: SEMINARIO LATINOAMERICANO DE CIRURGIA VETERINÁRIA, 3., 1997, Corrientes, Argentina. Anais... Corrientes : Facultad de Ciencias Veterinarias - UNNE, 1997. Disquete. 1 disquete de 31/2. Para uso em PC. (OBS.: tentar evitar esse tipo de citação).

12. Desenhos, gráficos e fotografias serão denominados figuras e terão o número de ordem em algarismos arábicos. A revista não usa a denominação quadro. As figuras devem ser disponibilizadas individualmente por página. Os desenhos figuras e gráficos (com largura de no máximo 16cm) devem ser feitos em editor gráfico sempre em qualidade máxima com pelo menos 300 dpi em extensão .tiff. As tabelas devem conter a palavra tabela, seguida do número de ordem em algarismo arábico e não devem exceder uma lauda.

13. Os conceitos e afirmações contidos nos artigos serão de inteira responsabilidade do(s) autor(es).

14. Será obrigatório o cadastro de todos autores nos metadados de submissão. O artigo não tramitará enquanto o referido item não for atendido. Excepcionalmente, mediante consulta prévia para a Comissão Editorial outro expediente poderá ser utilizado.

15. Lista de verificação (Checklist .doc, .pdf).

16. Os artigos serão publicados em ordem de aprovação.

17. Os artigos não aprovados serão arquivados havendo, no entanto, o encaminhamento de uma justificativa pelo indeferimento.

18. Em caso de dúvida, consultar artigos de fascículos já publicados antes de dirigir-se à Comissão Editorial.

19. Todos os artigos encaminhados devem pagar a taxa de tramitação. Artigos reencaminhados (com decisão de Reject and Resubmit) deverão pagar a taxa de tramitação novamente. Artigos arquivados por decurso de prazo não terão a taxa de tramitação reembolsada.

20. Todos os artigos submetidos passarão por um processo de verificação de plágio usando o programa “Cross Check”.

21. Contribuição dos autores

Para se qualificar para a autoria do manuscrito submetido, todos os autores listados deveriam ter contribuições intelectuais substanciais tanto para a pesquisa quanto para sua preparação. Por favor, use um dos exemplos abaixo ou faça o seu.

Exemplo um

RW, RA e RCNO conceberam e projetaram experimentos. WC, LM e AA realizaram os experimentos, BB realizou as análises laboratoriais. BB supervisionou e coordenou os experimentos com animais e forneceu dados clínicos. BB realizou análises estatísticas de dados experimentais. WC, MB e NO prepararam o rascunho do manuscrito. Todos os autores revisaram criticamente o manuscrito e aprovaram a versão final.

Exemplo dois

Todos os autores contribuíram igualmente para a concepção e redação do manuscrito. Todos os autores revisaram criticamente o manuscrito e aprovaram a versão final.

Exemplo três

Os autores contribuíram igualmente para o manuscrito.