http://journal.unoeste.br/index.php/ce/index
DOI: 10.5747/ce.2021.v13.n2.e362
ISSN on-line 2178-8332

Colloquium Exactarum

Submetido: 08/08/2021 Revisado: 23/08/2021 Aceito: 27/08/2021

PROJETO DE REATOR ANAERÓBIO DE FLUXO ASCENDENTE (RAFA) PARA TRATAMENTO DE VINHAÇA

Upflow Anaerobic Sludge Blanket Project for Vinasse Treatment

Bruce Wellington Amorin da Silva[1], Márcio Roberto Duran Filho[2], Luana Inada Souza Santos[3], Beatriz Leite[4], Douglas Liberace de Matos[2].

[1]Universidade Estadual Paulista – UNESP, Tupã, SP, [2]Centro Universitário Toledo – UNITOLEDO, Araçatuba, SP, [3]Universidade Virtual do Estado de São Paulo – UNIVESP, Araçatuba, SP, [4]Universidade Federal de São João Del Rei – UFSJ, Alto Paraopeba, MG.
E-mail: bruce.wellington@unesp.br

RESUMO – O Brasil é o maior produtor de açúcar e álcool do mundo, consequentemente, é também um grande produtor de vinhaça, o que é um problema, já que possui elevado potencial de poluição, impactando gravemente o solo e a água, apesar de ser usada na fertirrigação do canavial. Ao ser tratada em anaerobiose, contudo, pode produzir energia e ser usada como biofertilizante para o solo. Esse tratamento pode ser executado por um Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente (RAFA), considerado eficiente pela literatura. A partir disso, esse artigo tenta reunir equações e coletar dados, revisando a literatura científica com o objetivo de projetar um RAFA para tratamento de vinhaça, expondo uma alternativa de disposição final adequada a esse subproduto. Os resultados mostram boas oportunidades, com um grande potencial de redução de DBO e DQO e produção de biogás, eletricidade e biofertilizante, além de fornecer um compilado de equações e dados importantes para futuros cálculos.
Palavras-chave: RAFA; biogás; vinhaça; DBO; DQO.

ABSTRACT – Brazil is the largest sugar and alcohol producer in the world, consequently, it is also a major vinasse producer, which is a problem, as it has a high potential for pollution, severely impacting the soil and water, despite being used in fertigation of cane fields. When treated in anaerobic conditions, however, it can produce energy and be used as a biofertilizer for the soil. This treatment can be performed by an Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB), considered efficient by the literature. Based on this, this article tries to gather equations and collect data, reviewing the scientific literature with the objective of designing an UASB for the treatment of vinasse, exposing an alternative of suitable final disposal for this by-product. The results show good opportunities, with a great potential for reducing BOD and COD and producing biogas, electricity and biofertilizer, in addition to providing a compilation of equations and important data for future calculations.
Keywords: UASB; biogas; vinasse; BOD; COD.

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, muito importante para o agronegócio brasileiro. O aumento da demanda mundial por etanol, oriundo de fontes renováveis, aliado às grandes áreas cultiváveis e condições edafoclimáticas favoráveis à cana-de-açúcar, tornaram o Brasil um país importante para a exportação dessa *commodity* (CONAB, 2018). Conforme a Companhia Nacional de Abastecimento (2021), a principal região produtora de cana-de-açúcar do país é o Sudeste, especialmente São Paulo e Minas Gerais, apresentando um crescimento na safra de 2020 de 5,2%, cerca de 436,4 milhões de toneladas. Além disso, a estimativa da safra de 2020/2021, foi 41,8 milhões de toneladas de açúcar, 10,5 bilhões de litros de etanol anidro e 22,4 bilhões de etanol hidratado. Relacionado a isso, segundo o Ministério de Minas e Energia (MME, 2021), a Oferta Interna de Energia Elétrica proveniente de fontes renováveis em 2020 foi de 84%, sendo que 9,1% vieram de biomassa.

Conforme Bonassa e colaboradores (2015), a alta produção de etanol leva à geração de resíduos e subprodutos vindos da cadeia de processamento da cana-de-açúcar, como palha/palhiço, bagaço, vinhaça, águas residuárias e torta de filtro.

A vinhaça, por sua vez, é o efluente oriundo da destilaria e que possui alto poder poluente, podendo ser cem vezes maior que o de esgoto (LEBRON *et al*., 2020). Por esse motivo, a sustentabilidade da produção do etanol é prejudicada. A geração da vinhaça tem atingido uma média de 10 a 13 litros por litro de etanol produzido (BNDES; CGEE, 2008). Como alternativa, Marafon e colaboradores (2020) consideram o uso da vinhaça concentrada e sua digestão anaeróbia como formas excelentes de manejo do subproduto para amenizar os impactos ambientais e problemas logísticos, além de geração de novas oportunidades econômicas às usinas.

Nesse sentido, Rego e Hernández (2006) confirmaram a viabilidade tecnológica da conversão de vinhaça em biogás para produção de energia elétrica, mas ressaltaram que a questão econômico-financeira não pode ser confirmada como viável. Salomon e Lora (2009), em sua avaliação, contudo, apontaram custo inferior a outros autores. Nesse mesmo sentido, Pompermayer e Paula Júnior (2003) apontaram potencial competitividade no aproveitamento anaeróbio da vinhaça. Outras pesquisas similares foram realizadas por Silva e Abud (2016) e Ribas (2006), que estudaram as condições de operação na biodigestão da vinhaça e Szymanski, Balbinot e Schirmer (2010), que avaliaram o aproveitamento energético e comercialização de créditos de carbono.

Portanto, esse trabalho tem o objetivo de estudar a utilização do reator anaeróbio de fluxo ascendente (RAFA) no tratamento da vinhaça por meio do projeto desse reator, comparando-o com resultados descritos na literatura e manuais de normas técnicas. A metodologia adotada se baseia em Silva e colaboradores (2016), Silva e Santos (2016), Santos (2009), Camargo e colaboradores (2009), Abreu e Avelino (2012), Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, 2019) e Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2008). Mais detalhes podem ser encontrados na seção três, que expõe todo o equacionamento necessário, tanto para o projeto, quanto para a avaliação dos resultados.

2. FUNDAMENTOS

2.1. Vinhaça

A Vinhaça é considerada o principal subproduto ou coproduto do setor sucroenergético, proveniente do processo de destilação do etanol (CASTRO, 2019). É constituída de resíduos da destilação alcoólica oriunda do “vinho”, obtido por meio da fermentação alcoólica (ELIA NETO, 2016).

Sua composição, conforme Pinto (1999), depende de vários fatores, como: de que forma a matéria-prima é composta e qual é a natureza da mesma; composição e natureza dos vinhos; sistema de fermentação; aditivos usados na fermentação, ácidos, antibióticos, produtos químicos, nutrientes e nutrientes à base de nitrogênio e fósforo; qualidade de água usada; levedura; sistema de trabalho e influência dos trabalhadores. Relacionado a isso, Godoi e colaboradores (2019) concluíram que a composição química da vinhaça é principalmente influenciada pelo processo produtivo, não pelo clima. A chuva obviamente atua na diluição da vinhaça, mas ainda assim, não é o principal fator na determinação desse subproduto. Sendo mais específico, Elia Neto (2019) explica que sua classificação da composição ocorre conforme os componentes no preparo do mosto, ou seja, caldo, melaço ou mistura de ambos. A Tabela 1 ilustra o que foi dito.

Tabela 1. Composição química da vinhaça de acordo com o mosto utilizado

Parâmetros	Melaço	Caldo	Misto
pH	4,2 - 5,0	3,7 - 4,6	4,4 - 4,6
Temperatura (°C)	80 - 100	80 - 100	80 - 100
DBO (mg/L O_2)	25.000	6.00 - 16.500	19.800
DQO (mg/L O_2)	65.000	15.000 - 33.000	45.000
Sólidos totais (mg/L)	81.500	23.700	52.700
Sólidos voláteis (mg/L)	60.000	20.000	40.000
Sólidos fixos (mg/L)	21.500	3.700	12.700
Nitrogênio (mg/L N)	450 - 1.610	150 - 700	480 - 710
Fósforo (mg/L P_2O_5)	100 - 290	10 - 210	9 - 200
Potássio (mg/L K_2O)	3.740 - 7.830	1.200 - 2.100	3.340 - 4.600
Cálcio (mg/L CaO)	450 - 5,180	130 - 1.540	1.330 - 4.570
Magnésio (mg/L MgO)	420 - 1.520	200 - 490	580 - 700
Sulfato (mg/L SO_4)	6.400	600 - 760	3.700 - 3.730
Carbono (mg/L C)	11.200 - 22.900	5.700 - 13.400	8.700 - 12.100
Relação C/N	16 - 16,27	19,7 - 21,07	16,4 - 16,43
Matéria Orgânica (mg/L)	63.400	19.500	3.800
Subst. Redutoras (mg/L)	9.500	7.900	8.300

Fonte: Marques, 2006.

Com base em Braile e Cavalcanti (1979), Salomon e Lora (2009) assumem que a cada litro de etanol, aproximadamente 13 L de vinhaça é produzida, então, na safra 2003/2004 isso significou um total de 192.513.165 m³.

A partir disso, pode-se estimar a produção de 386,1 bilhões de litros de vinhaça na safra de cana-de-açúcar de 2020/2021, com base em dados da CONAB (2021), uma vez que nesse período foram produzidos 29,7 bilhões de litros de etanol total (anidro e hidratado).

Era lançada diretamente nos rios no início do Proálcool, o que resultou em diversos problemas ambientais, até que a fertirrigação se tornou uma opção em 1978 (BNDES; CGEE, 2008). Nesse sentido, conforme explicam Salomon e Lora (2009), as principais dificuldades relacionadas ao descarte da vinhaça é o fato dela possuir DBO alta e pH baixo.

Silva, Griebeler e Borges (2007) explicam que os impactos da vinhaça em águas subterrâneas e no solo é variável conforme a diversidade, tanto dos solos, quanto da composição da própria vinhaça. Assim, afirmam que a dosagem com menor risco de contaminação deve ser adequada às condições locais, ou seja, deve-se considerar parâmetros como classe textural, vinhaça residual de aplicações prévias e matéria orgânica, que afetam a capacidade de armazenamento, de infiltração e de troca catiônica, entre outras questões. Dessa forma, conforme Godoi e colaboradores (2019), os impactos com potencial poluidor podem ser minimizados com alternativas de baixo custo, como a digestão anaeróbia.

2.2. Biogás e Biodigestão

O biogás é um gás bruto produzido a partir da decomposição biológica de resíduos orgânicos. O metano (CH_4) é o principal de seus componentes, mas também há importante participação do dióxido de carbono (CO_2) e do gás/ácido sulfídrico (H_2S), além de outros compostos (ZANETTE, 2009; KARLSSON et al., 2014). De 50 a 80% de sua composição é formada por metano, de 20 a 50% é formada por dióxido de carbono e menos de 1% corresponde a nitrogênio (N_2), hidrogênio (H_2), amônia (NH_3) e gás/ácido sulfídrico (ALTENER, 2004; LINS; MITO; FERNANDES, 2015; CETESB, 2020).

Demirel e Scherer (2008), dividem em hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. Já Karlsson e colaboradores (2014) dividem o processo microbiológico em quatro fases: hidrólise; fermentação; oxidação anaeróbia e formação de metano. Os termos diferem, mas são equivalentes. Sobre isso, Sosa, Chao e Del Río (1999), preferem dividir em grupos de microrganismos, sendo o primeiro relativo às bactérias fermentativas, o segundo às bactérias acidogênicas, o terceiro às bactérias

acetogênicas e o quarto, por fim, às bactérias metanogênicas.

No primeiro grupo ou processo, a matéria orgânica particulada, no caso, carboidratos, proteínas e lipídios, sofre hidrólise, sendo convertida em aminoácidos, açúcares, álcoois e ácidos graxos (SOSA; CHAO; DEL RÍO, 1999; DEMIREL; SCHERER, 2008; KARLSSON *et al*., 2014).

Ocorre, então, a acidogênese, referente ao segundo grupo, que leva à formação de produtos intermediários, como acetato, propionato, etanol e lactato (SOSA; CHAO; DEL RÍO, 1999; DEMIREL; SCHERER, 2008; KARLSSON *et al*., 2014).

Então, por meio da acetogênese, há duas rotas, onde há formação de acetato, hidrogênio e dióxido de carbono (SOSA; CHAO; DEL RÍO, 1999; DEMIREL; SCHERER, 2008; KARLSSON *et al*., 2014).

O acetato pode ser convertido em hidrogênio e em dióxido de carbono e vice-versa, por meio da homoacetogênese oxidativa ou homoacetogênese redutiva, respectivamente (DEMIREL; SCHERER, 2008).

Por fim, a metanogênese, com a formação de gás metano e dióxido de carbono (SOSA; CHAO; DEL RÍO, 1999; DEMIREL; SCHERER, 2008; KARLSSON *et al*., 2014).

Vale ressaltar que para Hirasawa (2007), o sulfeto de hidrogênio tem uma relação com a inibição de microrganismos durante a digestão anaeróbia, ocasionando a origem da sulfetogênese, sendo a redução do sulfeto de hidrogênio um dos maiores problemas deste método de biodigestão, já que a quarta rota bioquímica a metanogênese é inibida. Assim, pode-se afirmar que o enxofre causa um desvio nas rotas metabólicas, o que promove a sulfetogênese e inibe a metanogênese.

2.3. Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente (RAFA)

Reator anaeróbio é um biodigestor ou biorreator configurado por uma câmara hermeticamente fechada, impedindo a troca gasosa com o meio externo, permitindo assim que a biomassa sofra biodigestão (BARREIRA, 2011). O produto final é uma mistura gasosa (biogás) e um fluido rico em nitrogênio (biofertilizante) (MATTOS; FARIAS JUNIOR, 2011).

O Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente e Manta de Lodo (RAFA) ou Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) foi desenvolvido na década de 1970 visando o tratamento de efluentes industriais de forma eficiente a um custo significativamente baixo, o que ajudou a sua popularização e difusão em escala real pelos países europeus (SOUZA; VIEIRA, 1986). Outros nomes possíveis são Reator Anaeróbio de Manta de Lodo ou Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente (ICLEI, 2010). Conforme Hamerski (2012), com base em Chernicharo (1997), o RAFA é constituído de três fases: 1) o separador trifásico, responsável por separar o biogás, o efluente líquido não convertido e manter as partículas sólidas na área de sedimentação; 2) a manta de lodo (área de sedimentação), é onde contém a biomassa ativa do sistema, que por contato com o afluente devido ao fluxo constante de alimentação, pode promover a conversão parcial em biogás; 3) leito de lodo, local de ocorrência da biodigestão do afluente que está neste fluxo ascendente constante.

Para Granato (2003), o princípio do funcionamento deste modelo não é muito complexo, o efluente é inserido pela base do reator, onde está em um fluxo ascendente com uma velocidade determinada de 0,5 a 1,5 m/h, que atravessará a manta de lodo (biomassa ativa) e se o reator estiver em plenas condições de anaerobiose, ocorrerá a transformação de parte da DQO (demanda química por oxigênio), em bolhas de biogás.

O separador trifásico tem uma grande importância, uma vez que ele é constituído de placas defletoras e de um decantador, que estão posicionados na região superior do reator, logo acima do defletor de gases. As placas defletoras condicionam o biogás a tomar um caminho diferente, assim são coletadas no topo do reator. Contudo, o efluente que possui suspensão de sólidos é dirigido a um decantador, que por meio da gravidade, gera a separação dos sólidos ali presentes para a base do reator e a retirada do efluente líquido é feito por um compartimento contido na superfície deste decantador (GRANATO, 2003).

De forma simplificada, opera com elevada concentração de biomassa e em fluxo ascendente, de forma que o lodo seja elevado à região superior do reator, onde ocorre a separação do efluente e do sólido (ICLEI, 2010).

O diferencial do RAFA é a eficiência de conversão em função de possuírem uma grande concentração de bactérias anaeróbias em plena atividade, conjuntamente ao fluxo ascendente constante e principalmente ao separador

trifásico, que permite a decantação destes sólidos, garantindo maior permanência do lodo no reator (LIMA, 2008). Em acréscimo, Pecora (2006) menciona que desde que o efluente seja distribuído de forma adequada na base do reator, não será necessária a utilização da recirculação desse efluente, levando em conta que o contato entre o afluente e o lodo biológico é eficiente.

03. EQUACIONAMENTO

Esta seção expõe o equacionamento necessário para o projeto do reator e avaliação dos resultados, nas subseções 3.1. e 3.2., respectivamente.

3.1. Projeto

O equacionamento apresentado pode ser encontrado em Capassi e colaboradores (2013), Chernicharo (1997), Szymanski, Balbinot e Schirmer (2010), Lyra e colaboradores (2003), Marques (2006) e ABNT (1986).

Com base em dados fornecidos por uma usina local, adota-se a vazão média $Q_{méd}$ = 200 $m^3.h^{-1}$ ou $Q_{méd}$ = 4800 $m^3.dia^{-1}$. Já as constantes K_1 = 1,2 e K_2 = 1,5 e a equação (1), conforme Capassi e colaboradores (2013) e ABNT (1986).

$$Q_{máx} = K_1 \times K_2 \times Q_{méd} \quad (1)$$

Onde:

$Q_{máx}$ – Vazão máxima [$m^3.dia^{-1}$];

K_1 – Constante;

K_2 – Constante;

$Q_{méd}$ – Vazão média afluente [$m^3.dia^{-1}$] ou [$m^3.h^{-1}$].

Já nas equações (2) e (3), temos a concentração diária de DBO e DQO, respectivamente. Os valores para C_{DBO} e C_{DQO} foram adotados com base em Marques (2006) na Tabela 2, Lyra e colaboradores (2003) e Szymanski, Balbinot e Schirmer (2010).

$$C_{diária} = C_{DBO} \times Q_{méd} \quad (2)$$

$$C_{diária} = C_{DQO} \times Q_{méd} \quad (3)$$

Onde:

$C_{diária}$ – Concentração diária de DBO ou DQO no afluente [$kg.dia^{-1}$];

C_{DBO} – Concentração de DBO [$kg.m^{-3}$];

C_{DQO} – Concentração de DQO [$kg.m^{-3}$];

Pode-se, então, conforme a equação (4), estimar o volume do reator.

$$V = Q_{méd} \times TDH \quad (4)$$

Onde:

V – Volume do reator [m^3];

TDH – Tempo de detenção hidráulica [h].

Segue-se com a determinação da carga hidráulica volumétrica, conforme equação (5).

$$CHV = \frac{Q_{méd}}{V} \quad (5)$$

Onde:

CHV: carga hidráulica volumétrica [$m^3.m^{-3}.dia^{-1}$].

Assumindo a carga orgânica volumétrica como 15 $kgDQO.m^{-3}.dia^{-1}$ conforme Chernicharo (1997), tem-se

$$S_0 = \frac{COV \times V}{Q_{méd}} \quad (6)$$

Onde:

S_0: concentração de substrato no afluente [$kgDQO.m^{-3}$];

COV: carga orgânica volumétrica [$kgDQO.m^{-3}.d^{-1}$].

Já a eficiência do reator é calculada com base nas equações (7) e (8), para a remoção de DQO e DBO, respectivamente, com base em Capassi e colaboradores (2013).

$$E_{DQO} = 100 \times (1 - 0{,}68 \times TDH^{-0{,}35}) \quad (7)$$

Onde:

E_{DQO} – Eficiência de remoção de DQO [%];

0,68 – Constante empírica;

0,35 – Constante empírica.

$$E_{DBO} = 100 \times (1 - 0{,}70 \times TDH^{-0{,}50}) \quad (8)$$

Onde:

E_{DBO} – Eficiência de remoção de DBO [%];

$0{,}70$ – Constante empírica;

$0{,}50$ – Constante empírica.

Então, calcula-se a altura do reator conforme a equação (9), assumindo a velocidade v = 0,6 m/h, conforme Chernicharo (1997).

$$H = v \times TDH \quad (9)$$

Onde:

H – Altura [m];

v – Velocidade superficial do fluxo (m/h).

Já com a equação (10), temos a área da seção transversal.

$$A_t = \frac{Q_{méd}}{v} \quad (10)$$

Onde:

A_t – Área da seção transversal [m^2].

Pode-se, então, obter o diâmetro do reator, conforme a equação (11).

$$d = \sqrt{\frac{4 \times A_t}{\pi}} \quad (11)$$

Onde:

d – Diâmetro do reator [m];

4 – Constante (equação da área de uma circunferência);

π – Constante (equação da área de uma circunferência).

Assumindo a área de influência de cada distribuidor, conforme Chernicharo (1997) e Capassi e colaboradores (2013) como A_d = 2 m^2

$$N_d = \frac{A_t}{A_d} \quad (12)$$

Onde:

N_d – Número de dutos;

A_d – Área de influência do distribuidor.

Com base na eficiência de remoção de DQO do reator, calcula-se a DQO no efluente conforme a equação (13).

$$S = \frac{E_{DQO} \times S_0}{100} \quad (13)$$

Onde:

S – Concentração de DQO no efluente (kgDQO.m^{-3}).

Baseada na equação (13), as equações (14) e (15) permitem calcular os valores de DQO e DBO no efluente final.

$$DQO_f = C_{DQO} - \frac{C_{DQO} \times E_{DQO}}{100} \quad (14)$$

$$DBO_f = C_{DBO} - \frac{C_{DBO} \times E_{DBO}}{100} \quad (15)$$

Onde:

DQO_f – DQO no efluente final (kg/m³).

DBO_f – DBO no efluente final (kg/m³).

Já a concentração de sólidos suspensos totais pode ser estimada conforme a equação (16).

$$C_{SST} = 102 \times TDH^{-0,24} \quad (16)$$

Onde:

C_{SST} – Concentração de Sólidos Suspensos Totais [mg/L];

102 – Constante empírica;

0,24 – Constante empírica.

A equação (17) nos fornece a carga de DQO de metano afluente, adotando a média $y = 0{,}17\ kgDQO_{lodo}.kgDQO_{lodo}{}^{-1}$.

$$DQO_{CH_4} = Q_{méd} \times (S_0 - S) - y \times Q \times S_0 \quad (17)$$

Onde:

DQO_{CH_4} – Carga de DQO convertida em metano (kgDQO_{CH_4}.d^{-1});

y - Coeficiente de produção de sólidos no sistema a partir da DQO (0,11 a 0,23 kgDQO$_{lodo}$.kgDQO$_{apl}^{-1}$).

Já na equação (18), tem-se o cálculo do fator de correção da temperatura do reator, com base em Capassi e colaboradores (2013), adotando: pressão $p = 1\ atm$; massa $m_{DQO} = 64\ gDQO.mol^{-1}$; constante universal $R = 0{,}08206\ L.atm.mol^{-1}.K^{-1}$ e temperatura $T = 25ºC$.

$$f_T = \frac{p \times m_{DQO}}{R \times (273 + T)} \quad (18)$$

Onde:

p – Pressão atmosférica [atm];

$mDQO$ – DQO correspondente a 1 mol de CH_4 [gDQO.mol^{-1}];

R – Constante universal dos gases [L.atm.mol^{-1}.K^{-1}];

T – Temperatura operacional do reator [ºC].

Então, na equação (19) temos o volume de metano produzido.

$$Q_{CH_4} = \frac{DQO_{CH_4}}{f_T} \quad (19)$$

Onde:

Q_{CH_4} – Volume de gás metano produzido [m^3.dia^{-1}].

Por fim, conforme a equação (20), pode-se estimar o volume de biogás produzido, adotando o percentual de metano em 80%, conforme Altener (2004).

$$Q_{biogás} = \frac{Q_{CH_4}}{C_{CH_4}} \quad (20)$$

Onde:

$Q_{biogás}$ – Volume de biogás produzido [m^3.dia^{-1}], [m^3.mês^{-1}] ou [m^3.ano^{-1}];

C_{CH_4} – Concentração de metano no biogás [%].

3.2. Avaliação dos resultados

O equacionamento e dados apresentados a seguir podem ser encontrados em Silva e colaboradores (2016), Silva e Santos (2016), Santos (2009), Camargo e colaboradores (2009), Abreu e Avelino (2012), ANP (2019) e ABNT (2008).

Para o cálculo do poder calorífico, assumindo $q = 6.000\ kcal.m^{-3}$, conforme calculado por Silva e colaboradores (2016), tem-se a equação (21).

$$q_t = Q_{biogás} \times q \quad (21)$$

Onde:

q – Poder calorífico médio do biogás [kcal.m^{-3}];

q_t – Poder calorífico total [kcal.dia^{-1}], [kcal.mês^{-1}] ou [kcal.ano^{-1}].

Com base no poder calorífico do biogás gerado, pode-se estimar, conforme as equações (22) e (23), o potencial de substituição de GLP, considerando os botijões P13 ($m_{P13} = 13\ kg$), conforme ABNT (2008), com poder calorífico inferior (PCI) $q_{GLP} = 11100\ kcal.kg^{-1}$, conforme ANP (2019).

$$q_{GLPt} = m_{P13} \times q_{GLP} \quad (22)$$

$$B_{biogás} = \frac{q_t}{q_{GLPt}} \quad (23)$$

Onde:

q_{GLPt} – PCI total de um botijão de P13 [kcal.unidade^{-1}];

m_{P13} – Massa de um botijão P13 [kg];

q_{GLP} – PCI do GLP [kcal.kg^{-1}];

$B_{biogás}$ – Botijões de biogás [unidades.dia^{-1}], [unidades.mês^{-1}] ou [unidades.ano^{-1}].

Para estimar o potencial de geração de biofertilizante, usa-se as equações (24) e (25), considerando $F_{mbf} = 0{,}85$ conforme Santos (2009) e $\rho = 1{,}143\ kg.m^{-3}$, conforme Camargo e colaboradores (2009).

$$F_m = Q_{méd} \times \rho \quad (24)$$

$$m_{bf} = F_m \times F_{mbf} \quad (25)$$

Onde:

F_m – Fluxo de massa afluente [kg.dia^{-1}];

ρ – Densidade da vinhaça [kg.m^{-3}];

m_{bf} – Massa de biofertilizante gerada [kg.dia^{-1}], [kg.mês^{-1}] ou [kg.ano^{-1}];

F_{mbf} – Fator de conversão em biofertilizante [%].

Por fim, pode-se estimar com a equação (26) o potencial de geração de energia elétrica a partir do biogás, considerando 30% de rendimento $(\eta = 0{,}3)$ conforme Abreu e Avelino (2012) e com fator de conversão $F_E = 6{,}98\ kWh.m^{-3}$, conforme Silva e colaboradores (2016).

$$E = F_E \times Q_{biogás} \times \eta \quad (26)$$

Onde:

E – Energia gerada [kWh.dia^{-1}], [kWh.mês^{-1}] ou [kWh.ano^{-1}];

F_E – Fator de conversão de biogás em energia elétrica [kWh.m^{-3}];

η – Rendimento da combustão [%].

4. RESULTADOS

A Tabela 2 expõe os valores utilizados para o cálculo. Basicamente, tem-se a vazão média, máxima e a concentração de DQO horária, diária, mensal e anual. São valor fundamentais para cálculos posteriores.

Tabela 2. Valores básicos de cálculo

	m^3		kg
	$Q_{máx}$ - Vazão máxima	$Q_{méd}$ - Vazão média	C_{DQO} - Concentração de DQO
Hora	360,00	200,00	5.000,00
Dia	8.640,00	4.800,00	120.000,00
Mês	259.200,00	144.000,00	3.600.000,00
Ano	3.153.600,00	1.752.000,00	43.800.000,00

Fonte: Os autores.

A Tabela apresenta resultados intermediários, que são calculados com base nos valores apresentados na Tabela 2 e na Tabela 4.

Tabela 3. Resultados intermediários

Carga Hidráulica Volumétrica	CHV (m^3.m^3.d^{-1})	3,00
Concentração de substrato afluente	S_0 (kgDQO.m^{-3})	5,00
Eficiência do reator (DQO)	E_{DQO} (%)	67,16
Eficiência do reator (DBO)	E_{DBO} (%)	75,25
DQO no efluente	S (kgDQO.m^{-3})	3,36
Concentração de Sólidos Suspensos Totais	C_{SST} (mg.L^{-1})	61,92
Fator de correção de temperatura	f_T	2,62

Fonte: Os autores.

A Tabela 4, por sua vez, expõe os dados auxiliares e suas referências. Esses são de fundamental importância para o projeto do reator, pois são utilizados em diversos trabalhos científicos e documentos oficiais.

Tabela 4. Dados auxiliares e suas referências

Dados	Entrada	Referência
$Q_{méd}$ ($m^3.dia^{-1}$)	4.800,00	Vazão média diária (Valor com base em usina local)
C_{DBO} ($kg.m^{-3}$)	10,00	Concentração de DBO (LYRA et al., 2003; MARQUES, 2006; SZYMANSKI; BALBINOT; SCHIRMER, 2010)
C_{DQO} ($kg.m^{-3}$)	25,00	Concentração de DQO (LYRA et al., 2003; MARQUES, 2006; SZYMANSKI; BALBINOT; SCHIRMER, 2010)
TDH (h)	8,00	Tempo de detenção hidráulica (CHERNICHARO, 1997)
COV ($kgDQO.m^{-3}.d^{-1}$)	15,00	Carga Orgânica Volumétrica (CHERNICHARO, 1997)
v ($m.h^{-1}$)	0,60	Velocidade de escoamento (CAPASSI et al., 2013; CHERNICHARO, 1997)
Ad (m^2)	2,00	Área dos distribuidores (CAPASSI et al., 2013; CHERNICHARO, 1997)
Y $\left(\frac{kgDQO_{lodo}}{kgDQO_{apl}}\right)$	0,17	Y varia de 0,11 a 0,23, adotamos a média (CHERNICHARO, 1997)
T (ºC)	25,00	Temperatura de operação (CAPASSI et al., 2013; CHERNICHARO, 1997)
C_{CH_4} (%)	0,80	Concentração de metano no biogás (ALTENER, 2004)
F_E ($kWh.m^{-3}$)	6,98	Fator de conversão em energia elétrica (SILVA et al., 2016)
F_{mbf} (%)	0,85	Fator de conversão de massa de biofertilizante (SANTOS, 2009)
ρ ($kg.m^{-3}$)	1.143,00	Densidade da vinhaça (CAMARGO et al., 2009)
q ($kcal.m^{-3}$)	6.000,00	Poder calorífico médio de 1 m³ de biogás (SILVA et al., 2016)
q_{GLP} ($kcal.kg^{-1}$)	11.100,00	poder calorífico de 1 kg de GLP (ANP, 2018)
m_{P13} (kg)	13,00	Massa de um botijão P13 (ABNT, 2008)
kgDQO ($gDQO.mol^{-1}$)	64,00	DQO correspondente a 1 mol de CH_4 (CAPASSI et al., 2013)
η	0,30	Rendimento de combustão (ABREU; AVELINO, 2012)

Fonte: Os autores.

A Tabela , então, apresenta as propriedades calculadas do reator.

Tabela 5. Propriedades do reator

Propriedade		Valor
Altura do reator	H (m)	4,80
Área da seção transversal	A_t (m²)	333,00
Diâmetro do reator	d (m)	21,00
Número de dutos	N_d (unidade)	167,00
Volume total do reator	V (m³)	1.600,00

Fonte: Os autores.

Tem-se na Tabela , então, os resultados dos cálculos efetuados com base nas tabelas anteriores. Esses valores permitem uma boa interpretação do cenário em questão, mas não são decisivos na tomada de decisão da implantação do projeto. Para isso, faz-se necessária a Tabela .

Tabela 6. Resultados

	m³	m³	kcal	$kgDQO_{CH_4}$
	Q_{CH_4} - Produção de metano em volume	$Q_{biogás}$ - Geração de biogás	q_t - PCI	DQO_{CH_4} - Carga de DQO convertida em metano
Hora	60,53	75,66	453.977,74	158,42
Dia	1.452,73	1.815,91	10.895.465,72	3.802,04
Mês	43.581,86	54.477,33	326.863.971,47	114.061,21
Ano	530.246,00	662.807,50	3.976.844.986,20	1.387.744,76

Fonte: Os autores.

A Tabela apresenta os valores de DQO e DBO no efluente final.

Tabela 7. Valores de DQO e DBO no efluente final

	Valor
DQOf (kg/m³)	8,21
DBOf (kg/m³)	2,47

Fonte: Autores

A Tabela , por fim, expõe os possíveis produtos a partir dos resultados da Tabela . Basicamente, tem-se o potencial de geração de energia elétrica (rendimento de 30%), de geração de biofertilizante e de botijões de biogás com PCI equivalente ao de botijões GLP P13. A tabela expõe a potencial produção por hora, dia, mês e ano.

Tabela 8. Possíveis produtos

	kWh	kg	Unidades
	E - Geração de energia elétrica	m_{bf} - Massa de biofertilizante gerada	$B_{biogás}$ - Botijões de biogás
Hora	158,44	194.310,00	3,15
Dia	3.802,52	4.663.440,00	75,51
Mês	114.075,53	139.903.200,00	2.265,17
Ano	1.387.918,90	1.702.155.600,00	27.559,56

Fonte: Os autores.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A vinhaça é um subproduto da usina sucroenergética, mas pode se tornar um problema, caso seja utilizada de forma inadequada. O estudo e consolidação de tecnologias que a aproveitam são importantes de forma a viabilizar alternativas ao setor. Quanto mais soluções disponíveis, melhor para o produtor e para o meio ambiente.

A geração de energia elétrica pode ser incipiente, mas pode ser uma forma de complementar a cogeração de energia elétrica a partir de outras fontes. É importante, portanto, que trabalhos futuros comparem a demanda energética das usinas com o potencial de produção a partir da vinhaça.

O biofertilizante gerado pode ser uma possibilidade na substituição da vinhaça na fertirrigação da lavoura. Em estudos futuros, pode-se estudar essa necessidade.

A produção de botijões de biogás não é calculada em botijões de 13 kg, como os de GLP, mas com base em PCI equivalente aos botijões convencionais. O tamanho pode, portanto, variar. É preciso avaliar questões como pressurização e logística.

Esse trabalho expôs, portanto, uma metodologia de projeto de RAFA. Experimentos a partir de projetos como esse são importantes na validação da teoria.

REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto de redes coletoras de esgoto sanitário**. NBR 9649. Rio de Janeiro: ABNT, 1986.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Área de armazenamento de recipientes transportáveis de gás liquefeito de petróleo (GLP), destinados ou não à comercialização – Critérios de segurança**: NBR 15514. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

ABREU, F. V.; AVELINO, M. Análise da eficiência do motor de combustão interna utilizando como combustível o biogás. *In*: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 7., 2012, São Luís. **Anais [...].** São Luís: ABCM, 2012.

ALTENER. **Bioenergia**: manual sobre tecnologias, projecto e instalação. 2004. Disponível em: http://www.moretti.agrarias.ufpr.br/eletrificacao_rural/livro_bioenergia_manual_sobre%20tecnologias_projetos_e_instalacoes_2004.pdf. Acesso em: 18 abr. 2021.

ANP – AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Fatores de conversão, densidades e poderes caloríficos inferiores**: Valores médios para no ano de 2018. 2019. Disponível em: http://www.anp.gov.br/arquivos/central-conteudos/anuario-estatistico/2019/anuario-2019-fatores-de-conversao.pdf. Acesso em: 18 abr. 2021.

BARREIRA, P. **Biodigestores**: Energia, fertilidade e saneamento para a zona rural. 3. ed. São Paulo: Ícone, 2011. 106 p.

BNDES – BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL; CGEE – Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. **Bioetanol de cana-de-açúcar:** energia para o desenvolvimento sustentável. Rio de Janeiro:, 2008. 316 p.

BONASSA, G. *et al.* Subprodutos Gerados na Produção de Bioetanol: Bagaço, Torta de Filtro, água de Lavagem e Palhagem. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 4, n. 3, p. 144-166, 2015.

BRAILE, P. M.; Cavalcanti, J. E. W. A. **Manual de tratamento de águas residuárias industriais**. São Paulo: CETESB, 1979.

CAMARGO, J. A. *et al.* Viabilidade da aplicação do Método Respirométrico de Bartha para a análise da atividade microbiana de solos sob aplicação de vinhaça. **Engenharia Ambiental, Pesquisa e Tecnologia**, v. 6, n. 2, p. 264-271, 2009.

CAPASSI, C. M. *et al.* Dimensionamento de um reator UASB para o tratamento de águas residuárias de suinocultura. **Revista de Saúde, Meio Ambiente e Sustentabilidade**, v. 8, n. 2, p. 19-39, 2013.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Biogás**. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/biogas/. Acesso em: 25 out. 2021.

CHERNICHARO, C. A. L. Reatores Anaeróbios. *In*: VON SPERLING, M. (org.). **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - UFMG, 1997.

CASTRO, J. M. **Estudo do potencial de geração de bioeletricidade a partir de biogás proveniente de biodigestão de vinhaça no estado de Minas Gerais**. 2019. Dissertação (Mestrado em Ciências e Técnicas Nucleares) – Escola de Engenharia, Universidade de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. MONITORAMENTO AGRÍCOLA (Safra 2020/21): Cana-de-açúcar. **Acompanhamento da safra brasileira de cana**, v. 7, p. 1-57, 2021.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Monitoramento agrícola (Safra 2018/19): Cana-de-açúcar. **Acompanhamento da safra brasileira de cana**, v. 5, p. 1-62, 2018.

DEMIREL B.; SCHERER, P. The roles of acetotrophic and hydrogenotrophic methanogens during anaerobic conversion of biomass to methane: a review. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, v. 7, n. 2, p. 173-190, 2008. https://doi.org/10.1007/s11157-008-9131-1

ELIA NETO, A. **Estado da Arte da Vinhaça**. 2016. Disponível em:

https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwiy2Mj1maLyAhVhlZUCHXsGAmsQFnoECAMQAw&url=http%3A%2F%2Fold.unica.com.br%2Fdownload.php%3FidSecao%3D17%26id%3D35414851&usg=AOvVaw0kj5eLbZ-HxgwpFaO8mtwz. Acesso em: 20 jul. 2021.

GODOI, L. A. G. **Interferência da sulfetogênese na produção de metano a partir de águas residuárias ricas em carboidratos**. 2014. Dissertação (Mestrado em Ciências: Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

GODOI, L. A. G. *et al*. Seasonal variation of the organic and inorganic composition of sugarcane vinasse: main implications for its environmental uses. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, p. 29267-29282, 2019. https://doi.org/10.1007/s11356-019-06019-8

GRANATO, E. F. **Geração de energia através da biodigestão anaeróbica da vinhaça**. 2003. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – Universidade Estadual Paulista, Bauru, SP, 2003.

HAMERSKI, F. **Partida de um reator anaeróbio de fluxo ascendente com manta de lodo (UASB) no tratamento de efluentes provenientes de uma indústria de laticínios**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

HIRASAWA, J. S. **Avaliação da metanogênese e sulfetogênese na presença de oxigênio, sob diferentes relações etanol/sulfato, utilizando técnicas de Biologia molecular**. 2007. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007

ICLEI – Local Governments for Sustainability. **Manual para aproveitamento de biogás**: volume dois, efluentes urbanos. 2010. Disponível em: https://e-lib.iclei.org/wp-content/uploads/2018/10/Manual_para_aproveitamento_de_biog%C3%A1s.pdf. Acesso em: 25 out. 2021.

KARLSSON, T. *et al.* **Manual básico de biogás**. Lajeado: Ed. Univates, 2014.

LEBRON, Y. *et al.* Vinasse treatment using hybrid tannin-based Coagulation-Microfiltration-Nanofiltration processes: Potential energy recovery, technical and economic feasibility assessment. **Separation and Purification Technology**, v. 248, n. 1, 2020. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117152

LIMA, H. Q. **Sustentabilidade energética e ambiental do sítio ecológico Falkoski**. 2008. Disponível em: https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/chines6_000g7gprczz02wx5ok0wtedt3pi5m2l4.pdf. Acesso em: 4 abr. 2021.

LINS, L. P.; MITO, J. Y. L.; FERNANDS, D. M. Composição média do biogás de diferentes tipos de biomassa. *In*: SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS AGROPECUÁRIOS E AGROINDUSTRIAIS, 4., 2015, Rio de Janeiro, **Anais [...].** Rio de Janeiro: SIGERA, 2015.

LYRA, M. R. C. C. *et al.* Toposseqüência de solos fertigados com vinhaça: contribuição para a qualidade das águas do lençol freático. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, n. 3, p. 525-532, 2003. https://doi.org/10.1590/S1415-43662003000300020

MARAFON, A. C. *et al.* Use of sugarcane vinasse to biogas, bioenergy and biofertilizer production. *In*: SANTOS, F. *et al.* (ed.). **Sugarcane Biorefinery, Technology and Perspectives**. Cambridge: Academic Press, 2020, p. 179-194. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814236-3.00010-X

MARQUES, M. O. Aspectos técnicos e legais da produção, transporte e aplicação de vinhaça. *In*: SEGATO, S. V. *et al.* (org.). **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: CP 2, 2006. p. 369-375.

MATTOS, L. C.; FARIAS JUNIOR., M. **Manual do Biodigestor Sertanejo**. Recife: Projeto Dom Helder Camara, 2011, 55 p.

MME - Ministério de Minas e Energia. **Boletim Mensal de Energia**. 2021. Disponível em: https://www.udop.com.br/boletins-arquivos/81/2021/mme_boletim_mensal_energi

a_mar21_publicado_31mai21.pdf. Acesso em: 31 jul. 2021.

PECORA, V**. Implantação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento do esgoto residencial da USP**: um estudo de caso. 2006. Dissertação (Mestrado em Energia) – Instituto de Eletrotécnica e Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2006.

PINTO, C. P. **Tecnologia da digestão anaeróbia da vinhaça e desenvolvimento sustentável**. 1999. Dissertação (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.

POMPERMAYER, R. S.; PAULA JUNIOR, D. R. Estimativa do potencial brasileiro de produção de biogás através da biodigestão da vinhaça e comparação com outros energéticos. *In*: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 3., 2003, Campinas. **Anais [...**]. Campinas, AGRENER, 2003.

REGO, E. E.; HERNÁNDEZ, F. M. Eletricidade por digestão anaeróbia da vinhaça de cana-de-açúcar: contornos técnicos, econômicos e ambientais de uma opção. *In*: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 6., 2006, Campinas. **Anais [...].** Campinas, AGRENER, 2006, p. 1-10.

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

SALOMON, K. R.; LORA, E. E. S. Estimate of the electric energy generating potential for different sources of biogas in Brazil. **Biomass and Bioenergy**, v. 33, n. 9, p. 1101–1107, 2009. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.03.001

SANTOS, A. F. S. **Estudo de viabilidade de aplicação do biogás no ambiente urbano**. 2009. Disponível em: http://areascontaminadas.cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/27/2014/01/santos_afs.pdf. Acesso em: 18 abr. 2021.

SILVA, B. W. A.; SANTOS, L. C. **Biogás**: da matéria-prima ao produto final. 2016.. Monografia (Graduação em Tecnologia em Biocombustíveis) – Faculdade de Tecnologia do Estado de São Paulo, Araçatuba, 2016.

SILVA, B. W. A. *et al*. Estimativa da Produção de Biogás e Biofertilizante Utilizando Resíduos de Alimentos de Escolas Públicas Estaduais. *In*: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNIFAI, 10., 2016, Adamantina. **Anais [...]** Adamantina, Exatas, 2016. v. 19.

SILVA, C. E. F.; ABUD, A. K. S. Anaerobic biodigestion of sugarcane vinasse under mesophilic conditions using manure as inoculum. **Ambiente & Água**, v. 11, n. 4, p. 763-777, 2016. https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1897

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. https://doi.org/10.1590/S1415-43662007000100014

SOSA, R.; CHAO, R.; DEL RÍO, J. Aspectos bioquimicos y tecnológicos del tratamiento de residuales agrícolas con producción de biogás. **Revista Computadorizada de Producción Porcina**, Cuba, v. 6, n. 2, p. 05 - 19, 1999.

SOUZA, M. E.; VIEIRA, S. M. M**.** Uso de reator Uasb para tratamento de esgoto sanitário. **Revista DAE**, São Paulo, v. 46, n. 145, p. 165-168, jun. 1986.

SZYMANSKI, M. S. E.; BALBINOT, R.; SCHIRMER, W. N. Biodigestão anaeróbia da vinhaça: aproveitamento energético do biogás e obtenção de créditos de carbono – estudo de caso. **Ciências Agrárias,** Londrina, v. 31, n. 4, p. 901-912, 2010. https://doi.org/10.5433/1679-0359.2010v31n4p901

ZANETTE, A. L. **Potencial de aproveitamento energético do biogás no Brasil**. 2009. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.