

CENTRO UNIVERSITÁRIO TABOSA DE ALMEIDA - ASCES/UNITA
BACHARELADO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

JOAIS VICENTE DE SIQUEIRA FIRMINO

**POTENCIAL PRODUTIVO DE METANO POR REATORES ANAERÓBIOS DA
VINHAÇA PROVENIENTE DA INDÚSTRIA SUCROALCOLEIRA - AGROCAN**

CARUARU-PE

2017

JOAIS VICENTE DE SIQUEIRA FIRMINO

**POTENCIAL PRODUTIVO DE METANO POR REATORES ANAERÓBIOS DA
VINHAÇA PROVENIENTE DA INDÚSTRIA SUCROALCOLEIRA - AGROCAN**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro Universitário Tabosa de Almeida – ASCES/UNITA, como requisito parcial para obtenção de grau do curso de Engenharia Ambiental.

Orientadora: Profa. Dra. Angela Maria Coelho de Andrade.

Coorientadora: Profa. Dra. Luiza Feitosa Cordeiro

CARUARU - PE

2017

CENTRO UNIVERSITÁRIO TABOSA DE ALMEIDA - ASCES/UNITA
BACHARELADO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

JOAIS VICENTE DE SIQUEIRA FIRMINO

**POTENCIAL PRODUTIVO DE METANO POR REATORES ANAERÓBIOS DA
VINHAÇA PROVENIENTE DA INDÚSTRIA SUCROALCOLEIRA - AGROCAN**

Aprovada em: 09/06/2017.

Nota: 9

Deivid Sousa de Figueroa
Primeiro Examinador

Maria Monize de Moraes
Segundo Examinador

Prof. Dra. Ângela Maria Coelho de Andrade – ASCES-UNITA
Orientadora

Prof. Dra. Luiza Feitosa Cordeiro – ASCES-UNITA
Coorientadora

CARUARU-PE

2017

Dedico,

Aos meus pais Ginaldo José e Ivaneide Vicente, por serem exemplos. Obrigado por me conduzir no melhor caminho, carregarei os sentimentos de gratidão e amor por toda minha vida, por todos os sacrifícios que fizeram por mim, obrigado, amo vocês!

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, ao Grande Arquiteto do Universo, obrigado meu Deus, por determinar a mim esse destino, e em toda essa jornada estar sempre presente ao meu lado, e por ter me dado o prazer de ter conhecido pessoas maravilhosas durante toda essa jornada.

Agradeço a minha Orientadora, Profa. Dra. Angela Maria Coêlho de Andrade, pela orientação, paciência e todo carinho, tenho a mais profunda admiração e respeito por esta pessoa maravilhosa, grato por tudo.

A minha Coorientadora, Profa. Dra. Luiza Feitosa Cordeiro, pela atenção e dedicação, pela sua disponibilidade, mesmo em períodos onde não havia horário para orientação, pelo incentivo que foram fundamentais para realizar e prosseguir este estudo. Muito obrigado.

A minha amiga, Emanuele Diógenes Guerra, talvez não existam palavras suficientes e significativas que me permitam agradecer você com justiça, com o devido merecimento. Sua ajuda e seu apoio foram para mim de valor inestimável, mas é tudo o que me resta. Apenas posso me expressar através da limitação de meras palavras, e com elas lhe dizer muito obrigado, sou eternamente grato por tudo.

Aos meus pais, Ginaldo José e Ivaneide Vicente, e meus irmãos, Walter Vicente e Débora Taise, quero agradecer o apoio incondicional prestado, a sua compreensão e paciência demonstradas, que sempre e em qualquer momento me ofereceram, por todos os sacrifícios, obrigado.

A minha Noiva, Patrícia Gomes, por todo amor e apoio ao longo desta caminhada, pela coragem que sempre me transmitiu, pelo incentivo nas horas difíceis, que em suas ações mostrou estar sempre presente dando total apoio, obrigado meu amor.

A todos os meus mestres, que ao longo deste curso, doaram a maior de todas as heranças, o conhecimento. Muito obrigado por tudo.

Aos meus amigos, fruto da faculdade, por tornarem esses anos da minha vida únicos, que levarei comigo a certeza que não tive apenas amigos, mas que ganhei irmãos.

“O êxito da vida não se mede pelo caminho que você conquistou, mas sim pelas dificuldades que superou no caminho”.

Abraham Lincoln

RESUMO

A vinhaça é um resíduo líquido, rico em potássio e matéria orgânica. Devido a sua grande produção acaba criando uma problemática que envolve a sua disposição ou ainda sua destinação final, tendo em vista que, sua carga poluidora é muito alta e pode trazer sérios riscos ao meio ambiente. Visando o desenvolvimento sustentável, o presente trabalho objetivou fazer uma avaliação do potencial produtivo de metano em um sistema de reatores anaeróbios alimentados com vinhaça produzida por uma Indústria Canavieira. A execução do projeto passou por três etapas, caracterização da vinhaça e análise de viabilidade para uso como substrato em reatores anaeróbios, testes de biodegradabilidade da vinhaça, e uma análise de produtividade da destilaria. Com base nos dados obtidos, o sistema anaeróbio apresentou resultados satisfatórios, cerca de oitenta e três por cento da matéria orgânica foi degradada. O reator alimentado com a vinhaça corrigida, ou seja, dentro dos parâmetros físico-químicos, teve maior eficiência de produção de metano. A biodigestão anaeróbia é um processo viável para a redução da quantidade de matéria orgânica da vinhaça de cana-de-açúcar, porém, necessita de correções de parâmetros para aumentar a eficiência do projeto quanto à questão da produção de metano.

Palavras-chave: Vinhaça, metano, biodigestão.

ABSTRACT

Vinasse is liquid waste, rich in potassium and organic matter. Due to its great production, a problematic is created that involves its disposition or even its final destination, considering that its pollutant load is very high and can pose serious risks to the environment. Aiming at sustainable development, the present work aimed to evaluate the potential of methane in a system of anaerobic reactors fed with vinasse produced by a sugarcane industry. The execution of the project went through three stages, characterization of vinasse and feasibility analysis for use as substrate in anaerobic reactors, tests of vinasse biodegradability, and a distillery productivity analysis. Based on the data obtained, the anaerobic system presented satisfactory results, in relation to the degradation of organic matter, values up to eighty three percent were obtained, in the item, methane, the production was more efficient in the reactor where the physical-chemical parameters were corrected. It was observed from all results that anaerobic biodigestion is a viable process for the reduction of the amount of organic matter of the sugar cane vinasse, however, it is necessary to correct the parameters to increase the efficiency of the project On the issue of methane production.

Key Words: Vinasse, methane, biodigestion.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

AGROCAN	Cooperativa do Agronegócio da Cana de Açúcar
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
Ca	Cálcio
CO ₂	Dióxido de Carbono
CTC	Capacidade de Troca Catiônica
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
DBO	Demanda biológica de oxigênio
DQO	Demanda química de oxigênio
ETE	Estação de Tratamento de Efluente
K	Potássio
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
N	Nitrogênio
P	Fósforo
P.A.	Para Análise
pH	Potencia hidrogeniônica
PROALCOOL	Programa Nacional do Alcool
UFPE	Universidade Federal de Recife Pernambuco
T1	Controle
T2	Vinhaça Bruta
T3	Endogenia

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fluxograma simplificado da produção de açúcar e etanol na indústria sucroenergética.	15
Figura 2. Processo de lavagem do biogás e medição do volume do metano produzido.	25
Figura 3. Gráfico da concentração de matéria orgânica medida pela DQO, biogás produzido em ml de metano e valor de biogás teórico do Reator 1 com Vinhaça Bruta.	28
Figura 4. Gráfico da concentração de matéria orgânica medida pela DQO, biogás produzido em ml de metano e valor de biogás teórico do Reator 2 com Vinhaça corrigida.	28
Figura 5. Reatores 1, 2 e 3, após período de processo anaeróbio.	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Padrões para o lançamento de efluentes.	20
Tabela 2. Métodos e referências dos parâmetros Físico-químicos.	22
Tabela 3. Concentração dos reagentes para preparação das soluções nutrientes.	23
Tabela 4. Resultados da Amostra para Caracterização da Vinhaça.	26

LISTA DE QUADRO

Quadro 1. Características da vinhaça resultante de mostos de melão, de caldo de cana e de mostos mistos.	16
--	----

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	11
2. OBJETIVOS.....	13
2.1 OBJETIVO GERAL	13
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
3. REVISÃO DA LITERATURA	14
3.1 PRODUÇÃO DE ETANOL E CULTIVO DA CANA DE AÇÚCAR NO BRASIL.....	14
3.2 VINHAÇA SUB-PRODUTO DA CANA DE AÇÚCAR.....	15
3.3 IMPACTOS DO SETOR SUCROALCOOLEIRO NO BRASIL.....	17
3.4 REGULAMENTAÇÕES DA VINHAÇA E ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS	18
3.5 BIODIGESTÃO	20
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	22
4.1 CARACTERIZAÇÕES DA VINHAÇA.....	22
4.2 ETAPAS DE MONTAGEM.....	23
4.3 PRODUTIVIDADE DA COOPERATIVA	25
5. RESULTADOS.....	26
5.1 RESULTADOS DAS ANÁLISES.....	26
5.2 TESTES DE BIODEGRADABILIDADE	28
5.3 VIABILIDADES QUALITATIVAS DO USO DA VINHAÇA PARA PRODUÇÃO DE METANO.....	30
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	31
REFERÊNCIAS	32

1. INTRODUÇÃO

A produção de etanol de cana de açúcar em 2015, no Brasil bateu recorde ao atingir 30 bilhões de litros (BRASIL, 2015). Os principais fatores que levaram à safra recorde foram à boa safra de cana de açúcar e as medidas governamentais que aumentaram a atratividade do etanol. Porém, em todo esse processo de produção acabasse gerando de 10 a 15 litros de vinhaça para cada litro de etanol produzido (BRASIL, 2016).

A vinhaça é resíduo líquido, rico em potássio e matéria orgânica. Devido a sua grande produção acaba criando uma problemática que envolve a sua disposição ou ainda sua destinação final, tendo em vista que, sua carga poluidora é muito alta e pode trazer sérios riscos ao meio ambiente (LUZ et al., 2010).

No Brasil, é comum que a vinhaça seja utilizada principalmente na fertirrigação da cana-de-açúcar, sendo uma das principais atividades executadas como destinação final do resíduo, em virtude da presença de matéria orgânica e nutrientes, porém, a aplicação de vinhaça de forma indiscriminada no solo pode acarretar em uma série de problemas ambientais. Essa prática denominada fertirrigação, de acordo com Barros (2013) oferece em curto prazo uma solução para o problema da disposição desse resíduo.

Mesmo que a fertirrigação não venha apresentar riscos ecológicos de maiores proporções, por ser uma técnica controlada, é visível que o objetivo principal das indústrias produtoras é se livrar de um resíduo incômodo e perigoso de forma mais rápida e econômica possível, sem causar danos paralelos nem complicações com os órgãos fiscalizadores do meio ambiente (GRANATO, 2003). Um dos nutrientes presentes na vinhaça está o potássio que representa cerca de vinte por cento, sendo o mineral limitante para a definição da dose a ser aplicada nos solos.

Segundo Moraes et al. (2014), a legislação Brasileira regulamenta a aplicação da vinhaça no solo com base na quantidade de potássio, mas negligência o material orgânico e as emissões de gases causadores do efeito estufa.

A vinhaça pode ser considerada um resíduo multiuso para a produção de energia renovável, após seu tratamento, ela tem parte dos resíduos orgânicos eliminados e neste processo produz metano, sendo o biogás uma fonte de energia promissora, após o processo de biodigestão o resíduo ainda poder ser utilizado na agricultura, desta vez com uma diminuição em seu potencial poluidor quando comparado com suas características *in natura*, diminuindo o risco de contaminação ao solo ou a outras culturas e água subterrânea (SANTANA JUNIOR, 2013).

Preocupados com o meio ambiente, atualmente, muitas usinas estão na busca de alternativas eficientes, aliadas aos custos reduzidos, a busca por soluções para não degradar o solo (SILVA, 2009). O solo pode ser contaminado porque a vinhaça nas usinas é disposta em áreas de sacrifício, locais onde grandes volumes deste resíduo são jogados ao solo sem nenhum tratamento, também é mantida em lagoas de acumulação e tanques de rejeitos sem impermeabilização (PEREIRA apud HAMADA, 2003).

Visando o desenvolvimento sustentável, o presente trabalho objetiva fazer uma avaliação do potencial produtivo de metano em um sistema de reatores anaeróbios alimentados com vinhaça produzida por uma Indústria Sucroalcooleira – AGROCAN.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o potencial de produção de metano de um sistema de reatores anaeróbios alimentado com vinhaça produzida na Cooperativa do Agronegócio da Cana de Açúcar – AGROCAN.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Avaliar a viabilidade qualitativa do uso da vinhaça produzida pela Cooperativa do Agronegócio da Cana de Açúcar - AGROCAN, na safra de 2016/2017, para geração de metano em reatores biológicos anaeróbios.
2. Avaliar o desempenho de reatores anaeróbios em batelada na produção de metano utilizando a vinhaça produzida pela Cooperativa do Agronegócio da Cana de Açúcar - AGROCAN, na safra de 2016/2017 como único substrato.

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1 PRODUÇÃO DE ETANOL E CULTIVO DA CANA DE AÇÚCAR NO BRASIL

O histórico e a cultura de plantio da cana-de-açúcar no Brasil tiveram início em 1532, sendo introduzida no país por Martin Afonso, tornando-se posteriormente parte integrante da economia brasileira. Com a crise mundial do petróleo, no início da década de setenta, abriram-se portas para a produção do álcool combustível (RODRIGUES, 2010).

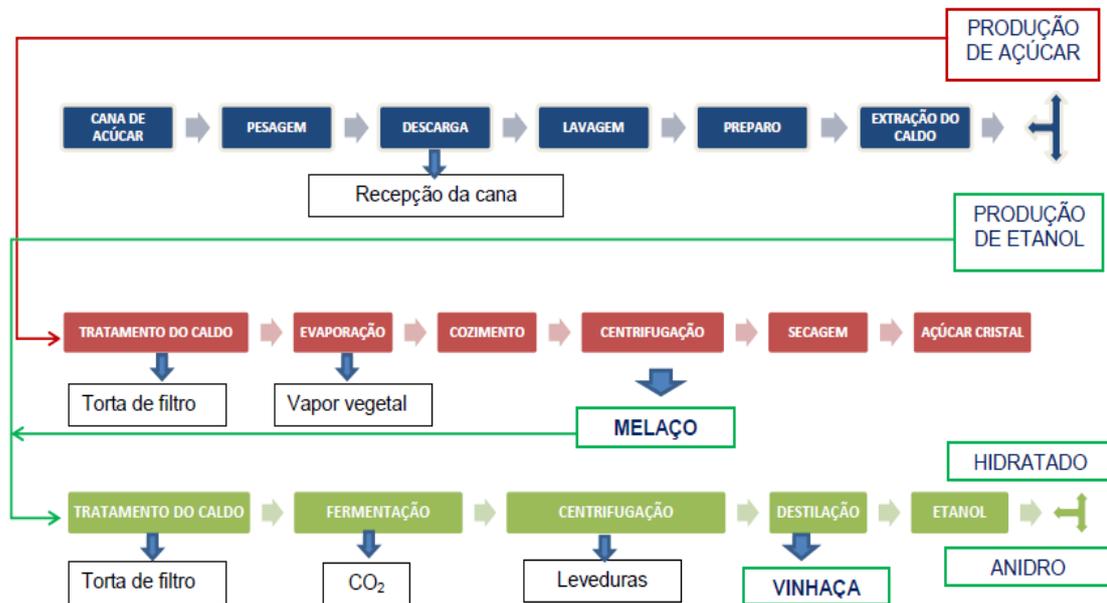
O governo brasileiro, no início do ano de 1975 lançou o Programa Nacional do Álcool, o PROALCOOL, com a finalidade de impulsionar a frota de veículos do país, fazendo a substituição de veículos movidos a gasolina, pelos movidos a etanol, e fugir da crise de mercado na época, uma vez que os preços do barril de petróleo chegaram a preços muito altos (CARVALHO et al., 2013).

Atualmente, a busca por fontes renováveis de energia tem crescido pelo interesse mundial na diminuição da emissão de gás carbônico, que é proveniente da utilização combustível fóssil (URQUIAGA; ALVES; BOODEY, 2005). O Brasil possui características propícias para a produção do etanol, tendo o clima e uma variedade de solo que facilitam e impulsionam investimentos tecnológicos para a cultura canavieira. O Brasil detém o título de maior produtor de cana-de-açúcar, chegando a 45% da produção mundial de etanol, sendo superior aos países como Índia, Tailândia e Austrália (RODRIGUES; ORTIZ, 2006).

No processamento da cana de açúcar, os produtos principais são o açúcar e o etanol e os produtos secundários a vinhaça, o bagaço, os xaropes, a torta de filtro e o melaço. A qualidade da matéria prima que chega até as unidades processadoras influencia diretamente na qualidade do produto a ser gerado, qualidade do solo, irrigação, adubação, tudo acaba impactando diretamente na qualidade do produto (BARROS, 2013).

O fluxograma simplificado da produção de açúcar e etanol na indústria sucroenergética se encontra na **Figura 1**.

Figura 1. Fluxograma simplificado da produção de açúcar e etanol na indústria sucroenergética.



Fonte: Barros (2013).

O etanol gerado através do processamento da cana-de-açúcar, também chamado de etanol de primeira geração é enquadrado como fonte de energia renovável, destacando-se em suas características o seu baixo custo e por ser um combustível não fóssil, que quando comparado a gasolina chega a ter uma carga poluidora 60% menor, e o processo de maturação da cana absorve esse CO₂ emitido (SANTOS et al., 2012).

3.2 VINHAÇA SUB-PRODUTO DA CANA DE AÇÚCAR

O processo de destilação de uma solução hidroalcoólica chamada vinhoto resulta em um subproduto conhecido como vinhaça, durante o processo de fermentação do caldo de cana para obtenção de etanol, estima-se que para cada litro de etanol seja gerado de 10 a 15 litros de vinhaça. Diversos fatores influenciam diretamente na composição da vinhaça, por exemplo, origem da cana-de-açúcar, unidade de processamento, variedade da cana processada, aparelho e metodologia de destilação, entre outros fatores (FRANCISCO, 2008).

Quando comparada com os outros subprodutos resultados do processo de fabricação do etanol, como o bagaço e a torta de filtro, a vinhaça destaca-se por ser o resíduo com o maior teor de nutrientes, principalmente potássio, além de cálcio, magnésio, fósforo, manganês e nitrogênio orgânico (SILVA, 2009). Suas principais características estão apresentadas na **Quadro 1**.

Quadro 1. Características da vinhaça resultante de mostos de melação, de caldo de cana e de mostos mistos.

Parâmetro	Matéria - Prima para o álcool		
	Melão	Caldo	Mistura
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	6.000 – 16.500	19.80
DQO (mg/l O ₂)	65.000	15.000 – 33.000	45.000
Sólidos totais (mg/l)	81.500	23.700	52.700
Material volátil (mg/l)	60.000	20.000	40.000
Material fixo (mg/l)	21.500	3.700	12.700
Nitrogênio (mg/l N)	450 – 1.600	150 – 700	480 – 710
Fósforo (mg/l P ₂ O ₅)	100 – 290	10 – 210	9 – 200
Potássio (mg/l K ₂ O)	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 – 3730
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
Material orgânico (mg/l)	63.400	19.500	38.000
Outras Substâncias (mg/l)	9.500	7.900	8.300

Fonte: Marques apud Segato et al. (2006).

A partir do ano de 1950 a vinhaça passou a ser utilizada como fertilizante na prática canavieira fertirrigação, anteriormente a isso o resíduo era simplesmente acumulado em lagoas ou descartado em rios ou diretamente no solo, o que culminava em sérios problemas ambientais. Quando aplicada de forma direta sem nenhum tratamento ou dosagem adequada, a vinhaça provoca uma série de alterações físico-químicas no solo, alterando seu pH, CTC, carbono orgânico, retenção de água, condutividade elétrica, porosidade e principalmente modificando a atividade microbiana do solo (XAVIER, 2012).

No ano de 1975, a vinhaça, resíduo caracteristicamente conhecido como poluidor devido suas elevadas taxas de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) variando de 20.000 a 35.000mg/L, passou a ser vista como um condicionador químico e físico do solo, o que agregou valores econômicos, podendo substituir adubos minerais, inicialmente a vinhaça era usada no solo apenas como uma forma da usina se livrar do resíduo gerado (BARROS et al., 2010).

3.3 IMPACTOS DO SETOR SUCROALCOOLEIRO NO BRASIL

O Brasil é o principal produtor sucroalcooleiro, mundialmente falando, está à frente de países como Índia, Tailândia e Austrália, e apresenta o menor custo de produção além do clima e solo favorece o cultivo da cana (SOUZA; SILVA; PRADO, 2012).

Com o Protocolo de Quioto e o preço do petróleo chegando a mais de US\$ 70 o barril, e a iminente possibilidade do fim dos combustíveis fósseis, houve a necessidade da população em reduzir os gases que prejudicassem o meio ambiente, desta forma, tornou-se mais atrativo e ecologicamente correto a busca de fonte de combustível limpo e renovável (VIEIRA; LIMA; BRAGA, 2007), e o álcool produzido de cana de açúcar tornou-se viável.

Os incentivos fiscais e os investimentos na biotecnologia, o ramo canavieiro tornou-se promissor, buscando maneiras de aperfeiçoar o potencial energético o mercado passou a ver a cana-de-açúcar não apenas como geradora de álcool e açúcar, mas também como fonte geradora de energia limpa (GOES; MARRA; SILVA, 2008). A bioeletricidade passa a ter papel fundamental e de caráter sustentável, haja vista a geração de eletricidade, tanto pode manter o processo de produção industrial como também ser uma fonte geradora de energia e não poluidora (SOARES; ROSSELL, 2007).

Segundo o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), a safra 2016/2017 de cana-de-açúcar do Brasil deverá chegar ao recorde de 691 milhões de toneladas, com um aumento de 3,8% em relação à temporada anterior, quando foram colhidas 665,6 milhões de toneladas. Este é o levantamento realizado pela Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB). A área colhida deverá ser de cerca de 9 milhões de hectares, com um aumento de 468,2 mil hectares em relação à safra passada, quando os produtores plantaram 8,6 milhões de hectares. Se confirmada, esta será a maior área de cana-de-açúcar já colhida no Brasil (BRASIL, 2016).

Quanto à produção de açúcar, o aumento deve ser de 12% em relação à safra anterior (33,4 milhões de toneladas), baseada na expectativa de evolução da área colhida, podendo chegar a 37,5 milhões de toneladas. Já a produção de etanol total, segundo Brasil (2016), será de 30,3 bilhões de litros, com uma redução de 0,4% ou 121 milhões de litros a menos que no ciclo passado, quando foram produzidos 30,4 bilhões de litros.

3.4 REGULAMENTAÇÕES DA VINHAÇA E ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS

Em 23 de Janeiro de 1934 passou a ser regulamentado pelo decreto nº 23.777 o lançamento do resíduo industrial das usinas açucareiras nas águas fluviais. Já em 21 de maio de 1961, Jânio da Silva Quadros, então presidente do Brasil baixou o Decreto Federal nº 50.877 que autorizava o lançamento de resíduos sólidos às águas com a condição de não poluir as mesmas. Seis anos depois com o Decreto-Lei nº 303, ficou sancionado a permanente proibição do lançamento da vinhaça *in natura* nos corpos hídricos, fazendo com que as indústrias sucroalcooleiras buscassem outros meios para a disposição da vinhaça (SILVA, 2012).

A dose de vinhaça a ser aplicada no canavial é definida com base no seu teor de potássio e na análise química do solo segundo Rossetto e Santiago (2007). Para Paoliello (2006), algumas alternativas podem ser tomadas para o tratamento deste resíduo: reciclagem fertirrigação, tratamento físico-químico, produção de proteína celular, concentração e combustão, produção de metano e produção de energia elétrica.

A reciclagem da vinhaça tem por objetivo remover parte da matéria orgânica através de decantação ou aplicada em outras técnicas como a diluição do melaço, porém é uma técnica que apresenta falhas e que precisa de aperfeiçoamento (CARVALHO, 2010).

A fertirrigação é uma prática comum em muitas indústrias canavieiras por ser rica em matéria orgânica e em nutrientes, principalmente o potássio, no entanto essa atividade é limitada para as regiões próximas das destilarias, por serem gerados em grande quantidade, entre 12 e 15 litros para cada litro de etanol produzido, e o transporte para longas distâncias acaba sendo inviável economicamente (SILVA, 2012).

De acordo com Roberto et al. (2011), existem estudos para a utilização da vinhaça como substrato na produção de forragem hidropônica, basicamente seria o emprego da vinhaça em uma tecnologia de suplementação alimentar, visando suprir as dificuldades de produção pecuaristas que muitas vezes não dispõe de alimento suficiente para fornecer aos animais.

Alguns estudos apontam a osmose inversa como opção de tratamento, quando comparada ao processo de evaporação, a osmose apresenta um baixo consumo energético chegando a ser ter um consumo 25 vezes menor do que a energia utilizada no processo de evaporação (SIMÕES; SENA; CAMPOS, 2004). Conforme Lóio (2013), em experimento utilizando método de tratamento físico-químico pode-se dizer que os resultados obtidos não

foram satisfatórios, mesmo com adição de coagulantes, fatores como o pH da vinhaça provocava incremento nos níveis de cor do efluente.

A resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) n. 357, de 17 de março de 2005, dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, e estabelece, ainda, as condições e padrões de lançamento de efluentes e dá outras providências. E, conforme seu § 4º, estabelece as condições de lançamento de efluentes e, no § 5º, que regulamenta os padrões de lançamento de efluentes, que são (COMANA, 2005):

I – pH entre 5 a 9;

II – Temperatura: inferior a 40°C, sendo que a variação de temperatura do corpo receptor não deverá exceder a 3 °C na zona de mistura;

III – Materiais sedimentáveis: até 1mLL⁻¹ em teste de 1h em cone Imhoff. Para o lançamento em lagos e lagoas, cuja velocidade de circulação seja praticamente nula, os materiais sedimentáveis deverão estar virtualmente ausentes;

IV – Regime de lançamento com vazão máxima de até meia vez a vazão média do período de atividade diária do agente poluidor, exceto nos casos permitidos pela autoridade competente;

V – Óleos e graxas;

1 – Óleos minerais: até 20mgL⁻¹;

2 – Óleos vegetais e gorduras animais: até 50mgL⁻¹;

VI – Ausência de materiais flutuantes.

O CONAMA estabelece parâmetros para lançamento de efluentes, alguns podem ser observados na **Tabela 1**, logo abaixo.

Tabela 1. Padrões para o lançamento de efluentes.

Parâmetros	Valor máximo (mg L⁻¹)
Inorgânicos	
Arsênio total	0,50 As
Bário total	5,00 Ba
Boro total	5,00 B
Cádmio total	0,20 Cd
Chumbo total	0,50 Pb
Cianeto total	0,20 CN
Cobre dissolvido	1,00 Cu
Cromo total	0,50 Cr
Estanho total	4,00 Sn
Ferro dissolvido	15,00 Fe
Fluoreto total	10,00 F
Manganês dissolvido	1,00 Mn
Mercurio total	0,01 Hg
Níquel total	2,00 Ni
Nitrogênio amoniacal total	20,00 N
Prata total	0,10 Ag
Selênio total	0,30 Se
Sulfeto	1,00 S
Zinco total	5,00 Zn
Orgânicos	
Clorofórmio	1,00
Dicloroetano	1,00
Fenóis totais (substâncias que reagem com 4 aminoantipirina)	0,50 C ₆ H ₅ OH
Tetracloroeto de Carbono	1,00
Tricloroetano	1,00

Fonte: Conama (2005).

3.5 BIODIGESTÃO

Há registros datados de 1776, onde já se relata a descoberta do metano segundo o químico italiano Alessandro Volta, a descoberta se deu ao observar a formação de gases resultantes da decomposição de vegetais nos pântanos, já no ano de 1806 o inglês Humphrey Davy identificou um gás rico em carbono e dióxido de carbono, devido a decomposição de dejetos animais em lugares úmidos, onde logo associou sua pesquisa com a descoberta de Volta. Em 1844 Ulisse Gayo define que o gás metano pode ser produzido a partir da fermentação de misturas de excrementos como palha de estábulo, água, dejetos, e discute sobre suas propriedades (PINTO, 1999).

Técnicas de digestão anaeróbica vêm ganhando cada vez mais força e visão no meio industrial. Trata-se de um processo biológico que ocorre na ausência de oxigênio livre, onde bactérias convertem o composto orgânico em metano, dióxido de carbono e em escalas menores o hidrogênio, nitrogênio e sulfato de hidrogênio, formando o biogás, que pode ser convertido em combustível, pois possui um percentual de 55% a 70% de metano (LEITE et al. Apud CASSINI, 2003).

Segundo Salomon e Lora (2005), a biodigestão anaeróbica possui alguns benefícios como:

- a) melhor manejo do lodo;
- b) quando comparado a sistemas aeróbicos, os anaeróbicos demonstram maior eficiência devido o consumo menor de energia;
- c) redução dos custos de tratamento; quantidade de biomassa gerada menor;
- d) pode operar com elevadas concentrações de Demanda Biológica de Oxigênio (DBO);
- e) reduz a carga orgânica da vinhaça para sua aplicação no solo, e a diminuição do odor que garante qualidade ambiental;
- f) gera neutralização do pH na vinhaça sendo ideal para aplicação no solo;
- g) o efluente pode ser manejado para aplicação na fertirrigação.

A linha de funcionamento dos biodigestores consiste basicamente de uma câmara de fermentação, onde o processo de biodigestão ocorre, com um espaço para armazenamento do biogás gerado, ou apenas uma saída para esse gás. São muitos os modelos de biodigestores, alguns com importantes detalhes construtivos, que dependem do tipo de aplicação a que são destinados.

Tipicamente utilizado para operações de pequeno porte, ou para teste de novos processos que estão em desenvolvimento, o reator batelada apresenta-se como algo simples, e de fácil adaptação em escalas laboratoriais. O processo de biodigestão anaeróbia consiste na biodegradação da carga orgânica presente na vinhaça. Este processo gera biogás e biofertilizante com reduzida carga orgânica sem, no entanto, alterar suas propriedades fertilizantes (PINTO, 1999).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A execução do projeto decorreu no período de janeiro a maio de 2017 sendo realizado em três etapas:

- 1- Caracterização da vinhaça e análise de viabilidade para uso como substrato em reatores anaeróbios;
- 2- Testes de biodegradabilidade da vinhaça em reatores anaeróbios em batelada;
- 3- Análise de produtividade da cooperativa.

4.1 CARACTERIZAÇÕES DA VINHAÇA

Uma amostra contendo 5 litros da vinhaça produzida na cooperativa foi coletada através de amostragem simples em loco e encaminhada para a caracterização no laboratório da Universidade Federal de Recife Pernambuco (UFPE), onde foram analisados alguns parâmetros.

As análises para obter a caracterização da vinhaça coletada na Cooperativa do Agronegócio da Cana de Açúcar – AGROCAN foram realizadas em triplicatas de cada análise físico-químicas descritas na **Tabela 3**, juntamente com os métodos e seguindo o Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA) (APHA, 2012) e o Manual de laboratório (KATO et al., 2014).

Tabela 2. Métodos e referências dos parâmetros Físico-químicos.

Parâmetro	Método
pH	Potenciométrico
Alcalinidade total e parcial	Potenciométrica
Cloretos	Mohr
Sulfato	Turbidimétrico
Nitrogênio total	NTK
DBO	Manométrico
DQO	Colorimétrico
Nitrito	Titulométrico
Nitrato	Titulométrico

Fonte. Próprio Autor.

4.2 ETAPAS DE MONTAGEM

Nesta etapa foram montados reatores anaeróbios do tipo batelada, em escala de bancada, com um volume total de 100mL, o volume útil de 80mL e com *headspace* de 20%. Foram realizados três tratamentos: T1 – Vinhaça Bruta, T2 - Vinhaça Corrigida e T3- Controle. No tratamento T1, o comportamento do reator em contato com as condições *in natura* da vinhaça foi avaliado. No tratamento T2, foi verificada a possibilidade de melhorar o desempenho do sistema, ajustando os parâmetros que recomenda a literatura. Para isso utilizou-se os resultados obtidos da amostra, que foi realizado na primeira etapa deste trabalho (METCALF; EDDY, 1991; CHERNICHARO, 2005 ou 1997; AQUINO; SILVA; CHERNICHARO, 2007). Cada tratamento foi analisado em triplicata.

Nos três tratamentos foram utilizados lodo industrial granular proveniente de uma estação de tratamento de efluentes (ETE) de cervejaria como inóculo, em concentração de 3gSSV/L. O substrato foi formado pela solução de vinhaça, com a concentração de 2gDQO/L. Foi adicionada uma solução de nutrientes numa concentração de 20% em relação ao volume útil do reator, composta por macro e micronutrientes, como mostra a **Tabela 4**.

Tabela 3. Concentração dos reagentes para preparação das soluções nutrientes.

Solução	Reagente	Concentração (g/L)
Macronutrientes	NH ₄ Cl	0,280
	K ₂ HPO ₄	0,252
	MgSO ₄ .7 H ₂ O	0,100
	CaCl ₂	0,007
	NaHCO ₃	3,316
	Extrato de levedura	0,100
Micronutrientes	FeCl ₂ .4H ₂ O	2,000
	ZnCl ₂	0,050
	MnCl ₂ .4H ₂ O	0,500
	NiCl ₂ .6H ₂ O	0,142
	NaSeO ₃ .5H ₂ O	0,164
	H ₃ BO ₃	0,050
	CuCl ₂ .2H ₂ O	0,038
	CoCl ₂ .6H ₂ O	2,000
	AlCl ₃ .6H ₂ O	0,090
	(NH ₄) ₆ .Mo ₇ O ₂₄ .4H ₂ O	0,050
	EDTA	1,000
	Resazurina	0,200
HCl	1,000 (mL/L)	

Fonte: Florêncio (1994).

O trabalho foi realizado na área do Laboratório de Engenharia Ambiental, do Centro Universitário Tabosa de Almeida ASCES/UNITA, Campus II. Inicialmente o experimento foi executado em fase teste, sendo alimentados apenas com substratos, com a finalidade de analisar sua funcionalidade, vazamentos ou outras quaisquer eventualidades.

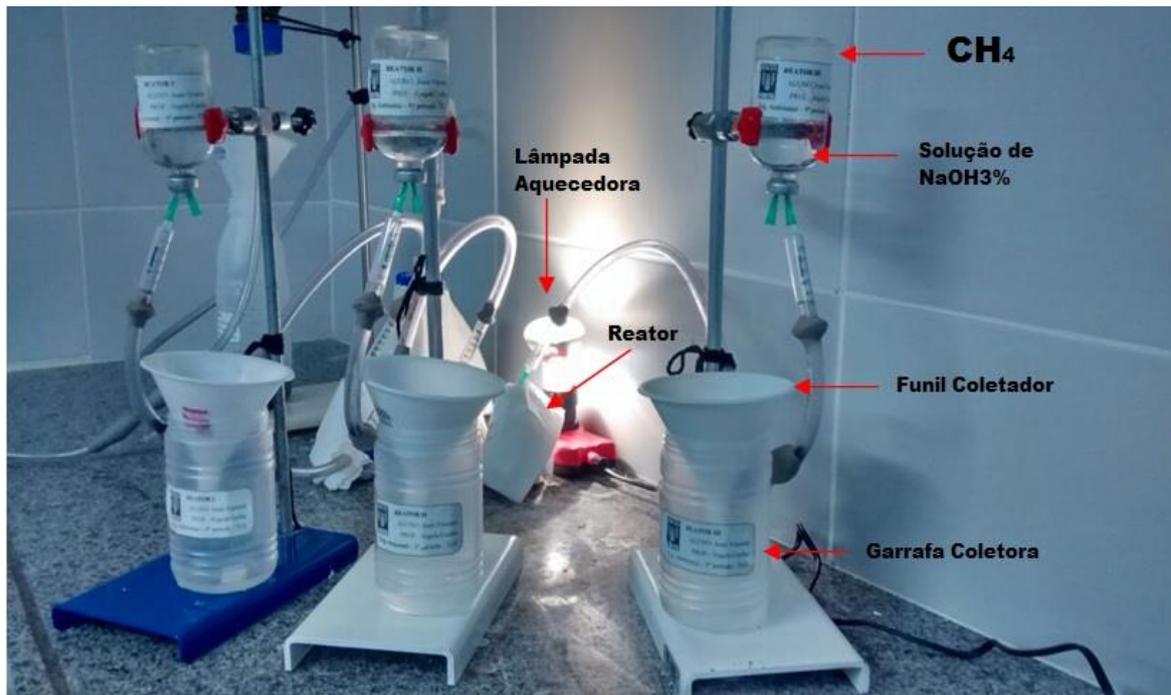
O sistema por onde o gás percorre é constituído de mangueiras tipo cristal, conexões em “T” e seringas de 3mL, conectadas em agulhas (0,7x25mm). Foi utilizado *durepox* para auxiliar na vedação das conexões, e lacre metálico para vedação dos reatores (Frasco Penicilina 100mL).

Após a realização da caracterização, verificou-se o valor do pH, alcalinidade e relação de DQO:N:P. Ao detectar as principais deficiências, soluções foram preparadas utilizando reagentes químicos para fazer as devidas correções. Estas serão apresentadas e discutidas adiante.

A demanda química de oxigênio (DQO) foi analisada no início e no final do experimento. O metano foi medido através da pesagem do líquido (NaOH) deslocado. A DQO foi analisada pelo método colorimétrico. Em cubetas com tampas rosqueadas transferia-se 2,5mL da amostra, o mesmo procedimento foi feito com água deionizada, representando o branco. Adicionou-se 1,5mL de dicromato de potássio 0,25 N e 3,5 mL de ácido sulfúrico concentrado P.A. Os tubos foram para um bloco digestor, da marca HANNA instruments, modelo HI 839800, a 150°C por 2 horas. Após esfriar os tubos, foram limpos com papel higiênico macio embebido em álcool etílico comercial para realizar a leitura em espectrofotômetro da marca biospectro, no modelo SP-22, em cubetas de quartzo, no comprimento de onda de 620nm.

Em execução, o biogás produzido passa por um lavador de gás, solução de hidróxido de sódio 3%, removendo água, gás sulfídrico e gás carbônico. O esquema pode ser observado na **Figura 2**. A medida do deslocamento do metano foi feita através da pesagem em uma balança semi-analítica, onde 1g de hidróxido de sódio pesado corresponde a 1mL de metano deslocado.

Figura 2. Processo de lavagem do biogás e medição do volume do metano produzido.



Fonte: Próprio autor.

4.3 PRODUTIVIDADE DA COOPERATIVA

A Usina AGROCAN, produziu na safra 2016/2017, 33 Milhões de litros de álcool, com uma produção diária variando entre 300 a 380m³ de álcool dia, levando em consideração que em todo esse processo de produção acabasse gerando de 10 a 15 litros de vinhaça para cada litro de etanol produzido (BRASIL, 2016), a avaliação é que no mínimo de 330 a 495 milhões de litros de vinhaça foram gerados.

5. RESULTADOS

5.1 RESULTADOS DAS ANÁLISES

Após a realização das principais análises, pode-se avaliar a composição da vinhaça estudada. Na **Tabela 4** podem ser observados os resultados obtidos da caracterização.

Tabela 4. Resultados da Amostra para Caracterização da Vinhaça.

Parâmetro	Total
pH	3,42
Alcalinidade total	0 mg CaCO ₃ /L
Alcalinidade parcial	0 mg CaCO ₃ /L
Cloretos	445,6 mg/L
Sulfato	402,2 mg/L
Nitrogênio total	24,16 mg/L
Nitrogênio Amoniacal	< 1 mg/L
Nitrito	4,33 mg/L
Nitrato	Não detectado na amostra
DBO	5000 mgO ₂ /L
DQO	28075,4 mgO ₂ /L

Fonte. Próprio Autor.

É de vital importância que alguns parâmetros sejam corrigidos, fatores como o pH por exemplo, precisa estar em uma faixa de concentração hidrogeniônica adequada, pois grande parte dos microrganismos necessitam de um meio propício ao seu desenvolvimento, por isso, a acidez e alcalinidade são fatores importantes no processo de digestão anaeróbia. É necessário que o pH durante o processo seja mantido em uma escala de 6 a 8, onde o ideal é manter entre 7 a 7,2.

Os despejos com concentração inadequada de íons de hidrogênio são mais difíceis de tratar por métodos biológicos (VITALI, 1995). A vinhaça de cana-de-açúcar analisada neste trabalho apresentou pH ácido, igual a 3,42. Quando comparada a vinhaça de outras literaturas, do mesmo tipo (Caldo), a faixa de concentração hidrogeniônica foi similar.

Segundo Pinto (1999), os parâmetros do resíduo que é tratado têm influência direta na produção de biogás. Nitrato e o Nitrito são considerados contaminantes ambientais de larga expansão nos recursos hídricos, tanto subterrâneos como superficiais, devido ao desenvolvimento e expansão das atividades agrícolas, associadas ao uso de fertilizantes químicos.

De acordo com o CONAMA, resolução nº 357, de 17 de março de 2005, considerando que o controle da poluição está diretamente relacionado com a proteção da saúde, garantindo meio ambiente ecologicamente equilibrado e a melhoria da qualidade de vida, o CONAMA estabelece como parâmetro para águas doces Nitrato 10,0mg/L N, Nitrito 1,0mg/L N, e com relação a vinhaça, é de conhecimento que uma prática muito utilizada é a fertirrigação, onde a vinhaça *in natura* é aplicada direto ao solo, volumes elevados podem saturar o solo e atingir o lençol freático (CONAMA, 2005).

A vinhaça é caracterizada como efluente de destilarias com alto poder poluente e alto valor fertilizante, seu poder poluente, cerca de cem vezes maior que o do esgoto doméstico, é proveniente da sua riqueza em matéria orgânica, baixo pH, elevada corrosividade e altos índices de demanda bioquímica de oxigênio (DBO) (FREIRE; CORTEZ, 2000).

Segundo Freire e Cortez (2000), referindo-se a vinhaça de elevada DQO, baixos teores de sólidos e produção em grandes escalas, recomenda-se a biodigestão anaeróbia, por tratar-se de um método eficiente no tratamento de efluentes líquidos com baixo teor de sólidos, é importante ressaltar que o tratamento não é um método que elimina totalmente o caráter poluidor deste efluente, pós biodigestão o efluente ainda possui uma DBO considerável, no entanto com valores significativamente inferiores quando comparado com a vinhaça *in natura*.

Para um efluente, se a relação $DQO/DBO < 2,5$ o mesmo é facilmente biodegradável. Se a relação for $5,0 < DQO/DBO > 2,5$ o efluente irá exigir cuidados na escolha do processo biológico para que se tenha uma remoção desejável de carga orgânica, e se $DQO/DBO > 5$, então o processo terá pouca chance de sucesso, segundo a Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH). A vinhaça sem correção apresentou uma DBO de 5000mgO₂/L, para uma DQO 28.075mgO₂/L, em sua relação DQO/DBO foi de 5,6, isto é, maior que 5. Logo, este resíduo é caracterizado como pouco biodegradável, pois apenas 17% representavam matéria orgânica degradável.

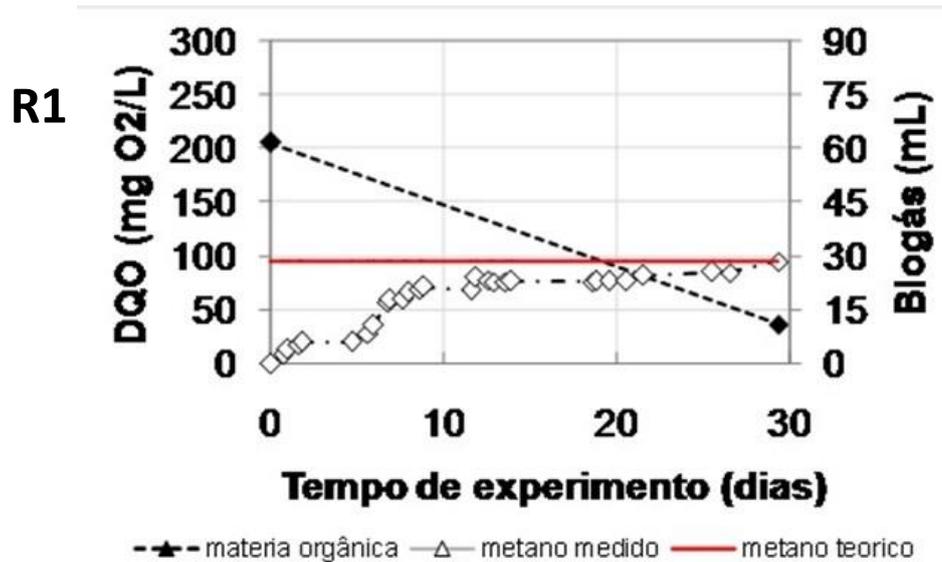
Para corrigir os parâmetros dos componentes presentes na vinhaça *in natura*, foram utilizadas soluções de NaHCO₃ (para a alcalinidade), K₂HPO₄ (para o fósforo) e NaOH (para o pH). Separados todos reagentes, realizou-se a mistura, foi feita a correção do pH para 7, adicionando NaOH.

Em relação ao nitrogênio e fósforo, os mesmos são conhecidos como nutrientes essenciais para o crescimento microbológico, incluindo os metanogênicos (CHERNICHARO, 1997).

5.2 TESTES DE BIODEGRADABILIDADE

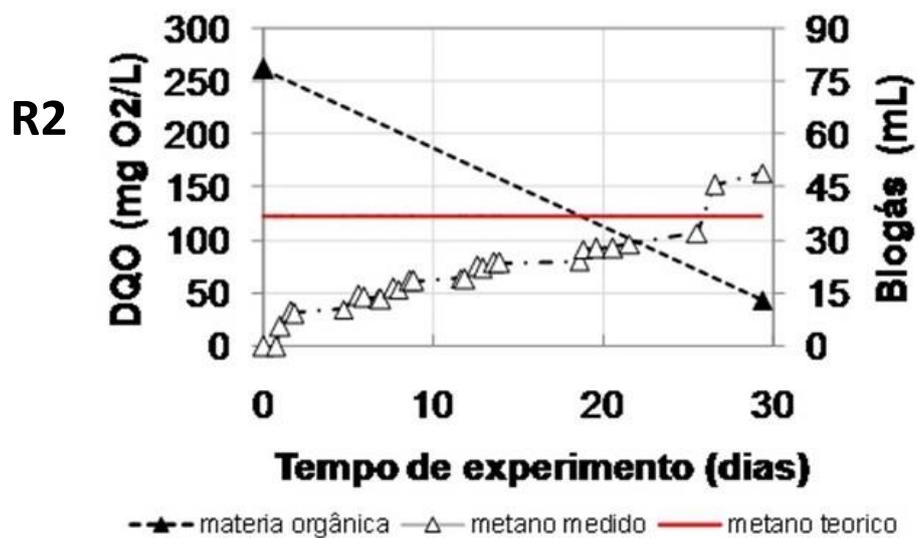
A eficiência de remoção da matéria orgânica, presente na vinhaça, nos dois reatores foi similar chegando a 83%, conforme é possível observar nas **Figuras 3 e 4**.

Figura 3. Gráfico da concentração de matéria orgânica medida pela DQO, biogás produzido em ml de metano e valor de biogás teórico do Reator 1 com Vinhaça Bruta.



Fonte. Próprio Autor.

Figura 4. Gráfico da concentração de matéria orgânica medida pela DQO, biogás produzido em ml de metano e valor de biogás teórico do Reator 2 com Vinhaça corrigida.



Fonte. Próprio Autor.

Apesar de ambos os reatores terem valores de eficiências semelhantes, 82 e 83% para R1 e R2, respectivamente, a produção do metano é o parâmetro que confirma se este valor foi realmente satisfatório. Observou-se que em relação ao Reator 2, onde a vinhaça teve correção executada, a produção de metano foi mais eficiente, pois fatores vitais como a relação DQO, nitrogênio, fósforo e pH foram corrigidos para um padrão de vida microbológica em reatores anaeróbios (VON SPERLING, 1996).

Em contrapartida, no Reator 1, onde estes fatores não foram corrigidos, apesar de ter apresentado uma degradação eficiente chegando a 82%, nota-se que houve uma inibição na produção do metano.

No reator sem as correções na Vinhaça (R1) pode-se observar, ao final do experimento, que o efluente estava mais turvo e escuro, como pode ser observado na **Figura 5**. Neste reator, o pH prejudicou a formação dos flocos de microrganismos, com isso, os microrganismos ficaram dispersos no líquido, perderam sua capacidade de decantação e foram contabilizados na DQO. No R2, observa-se um líquido mais límpido e com muito material sedimentado.

Figura 5. Reatores 1, 2 e 3, após período de processo anaeróbio.



Fonte: Próprio autor.

Desta forma, considera-se que o uso da vinhaça na produção de metano seja mais satisfatória se forem realizadas correções principalmente de pH e na relação DQO:N:P. Outro

fator a ser considerado e estudado em maior detalhe é a adição de um processo de pré-tratamento. Este processo pode degradar os compostos orgânicos presentes na vinhaça, que geralmente são de difícil degradação biológica, formando compostos mais simples e mais biodegradáveis.

5.3 VIABILIDADES QUALITATIVAS DO USO DA VINHAÇA PARA PRODUÇÃO DE METANO

Este trabalho utilizou amostras de vinhaça de uma usina com o intuito de avaliar o potencial de utilização deste resíduo na geração de energia, (biogás). Logo, após a realização da caracterização e do teste de biodegradabilidade, foi possível fazer uma análise da estimativa de custos com reagentes e calcular o potencial de aproveitamento energético com a utilização do metano.

Considerando que 1m^3 de vinhaça tem potencial para gerar até 14m^3 de biogás, essa usina teria capacidade para gerar valores mínimos de $4.620.000\text{m}^3$ de metano, e máximo de $6.930.000\text{m}^3$, caso toda a vinhaça fosse tratada, esses valores correspondem respectivamente a uma capacidade anual de 10,7 mil até 16 mil megawatts hora (MWh) de eletricidade.

Mesmo constatando viabilidade técnica da digestão anaeróbia da vinhaça, os fatores econômicos ainda são uma questão de peso a se considerar, isto porque, outras fontes de cogeração atualmente são utilizadas, como por exemplo, a queima do bagaço e da palha da cana.

A técnica da digestão anaeróbia da vinhaça explora o campo do desenvolvimento sustentável porquê impactua diretamente no quesito fonte renovável de energia, o resíduo por sua vez, tem um melhor aproveitamento de seu potencial/rendimento energético, sem atentar contra o meio ambiente, e acaba contribuindo para a melhoria deste, além de poder ser fonte lucrativa, dependendo da utilização do biogás gerado em todo processo.

Mesmo ainda não sendo uma técnica totalmente dominada, principalmente, na sua teoria, pois há uma série de variáveis a se considerar quando falamos de decomposição anaeróbia da vinhaça, porém, é uma opção a ser utilizada, obviamente irá requerer investimento e mais estudos, mas esta possibilidade abre novas e melhores formas eficientes no quesito obtenção de energia. O tratamento da vinhaça e o uso do biogás contribuem para diminuir os custos de uma usina, pois o resíduo ainda poderá ser utilizado na técnica de fertirrigação e o gás aplicado como fonte geradora de energia.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A vinhaça proveniente da indústria sucroalcooleira apresentou características ácidas, seu pH estava abaixo do padrão para o bom desempenho dos microrganismos. Necessitou-se da correção da vinhaça bruta para que o processo de digestão anaeróbia fosse eficiente. A caracterização da vinhaça também mostra que a introdução desse substrato diretamente no solo, através da fertirrigação, pode causar sérios problemas ambientais.

De maneira geral, o sistema anaeróbio apresentou desempenho e comportamento satisfatórios em todos os reatores com a utilização da vinhaça como substrato, houve bons resultados para a redução de DQO e a produção de metano foi significativa.

O Reator 1 e o Reator 2, tiveram uma degradação da matéria orgânica satisfatória. Porém, a produção de metano não foi significativa no Reator 1, devido as condições físico-química da vinhaça bruta. Para obter uma melhor eficiência de produção de metano foi necessária a correção dos parâmetros físico-químicos da vinhaça.

O Reator 2, alimentado com vinhaça corrigida, apresentou uma produção de metano 28% maior que o valor esperado. No entanto fazem-se necessários estudos mais aprofundados para analisar melhor os compostos presentes na vinhaça, pois alguns fatores são determinantes para a eficiência deste tipo de tratamento.

REFERÊNCIAS

APHA. American Public Health Association Water Works Association & Water Environment Federation. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Estados Unidos da América: A.E. 2012.

AQUINO, S.F.; CHERNICHARO, C.A. L. Acúmulo de ácidos graxos voláteis (AGV) em reatores anaeróbios sob estresse: causas e estratégias de controle. *Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental*. 10:152-161, 2005.

AQUINO, S.F.; SILVA, S.Q.; CHERNICHARO, C.A.L. Considerações práticas sobre o teste de demanda química de oxigênio (DQO) aplicado a análise de efluentes anaeróbios. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 11, n. 4, p. 295-304, 2006.

BARROS, V.G. **Conversão anaeróbia de vinhaça e melão em reatores UASB inoculados com lodo granulado**. Dissertação. 69f. 2013. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP, Campus de Jaboticabal. São Paulo: UEP. 2013.

BARROS, R.P.; et al. Alterações em atributos químicos de solo cultivado com cana-de-açúcar e adição de vinhaça. *Pesq. Agropec. Trop.*, Goiânia, v. 40, n. 3, p. 341-346, jul./set. 2010.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Safra de cana 2016/2017 deve ser recorde**. 2016. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/comunicacao/noticias/2016/04/safra-de-cana-20162017-deve-ser-recorde>>. Acesso em: 02 out. 2016.

BRASIL. Portal Brasil. **Etanol atingiu produção recorde de 30 bilhões de litros em 2015**. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/economia-e-emprego/2016/05/etanol-atingiu-producao-recorde-de-30-bilhoes-de-litros-em-2015>>. Acesso em: 02 out. 2016.

CARVALHO, L.C.; et al. Cana-de-açúcar e álcool combustível: histórico, sustentabilidade e segurança energética. *Enciclopédia Biosfera*, Centro Científico Conhecer, Goiânia, v. 9, n. 16, p. 530-543, 2013.

CARVALHO, T.C. **Redução do volume de vinhaça através do processo de evaporação**. Dissertação. 107f. 2010. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia Mecânica, Bauru. São Paulo: UNESP. 2010.

CHERNICHARO, C.A.L. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: Reatores anaeróbios**. 1ed. Belo Horizonte: Brasil, 1997. 379 p.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 357, de 17 de março de 2005**: Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Brasil, 2005. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf>>. Acessado em: 02 out. 2016.

FLORENCIO, L. (1994). The fate of Methanol in anaerobic bioreactors. Ph.D. dissertation. Wageningen Agricultural University. Wageningen, The Netherlands

FRANCISCO, G.A. **Biodegradação da vinhaça resíduo da produção de etanol**. Monografia. 2008. 40f. Instituto de Biociências da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” Campus de Rio Claro. Rio Claro: UEP. 2008.

FREIRE, W.J.; CORTEZ, L.A.B. **Vinhaça de cana-de-açúcar**. Guaíba: Agropecuária, 2000. 203p.

GOES, T.; MARRA, R.; SILVA, G.S. Setor sucroalcooleiro no Brasil: situação atual e perspectivas. **Revista da Política Agrícola**, ano XVII, n. 2, abr./maio/jun., p. 39-51, 2008.

GRANATO, E.F. **Geração de energia através da biodigestão anaeróbica da vinhaça**. Dissertação. 113f. 2003. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia da UNESP - Campus de Bauru. São Paulo: UNP. 2003.

KATO, M.T.; et al. **Manual de procedimentos do laboratório de saneamento ambiental**. Olinda: Livro Rápido, p.156, 2014.

LEITE, V.D.; et al. **Bioestabilização de resíduos sólidos orgânicos**. In: CASSINI, S.T. (Coord.). Digestão de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento de biogás. Rio de Janeiro: PROSAB, p. 96-119, 2003.

LÓIO, D.A. **Tratamento físico-químico de vinhaça por coagulação, floculação e sedimentação e seu aproveitamento no cultivo da microalga *Chlorellavulgaris***. Dissertação. 103f. 2013. Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos. 2013.

LUZ, T.P.A.; et al. **Avaliação termodinâmica e termoeconômica do aproveitamento energético da vinhaça num sistema de cogeração de energia de uma usina sucroalcooleira**. In: 9th Brazilian Conference on Dynamics Control and their Applications. Serra Negra, SP. 2010, jun. p. 797-803. Disponível em: <<http://www.sbmac.org.br/dincon/trabalhos/PDF/energy/69206.pdf>>. Acesso em: 02 out. 2016.

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: C. 2, p. 369-375, 2006.

METCALF e EDDY. Wastewater engineering treatment disposal reuse. 3.ed. New York: McGraw-Hill, 1991. 1334 p.

MORAES, B.S. et al. Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane biorefineries in Brazil from energy, environmental, and economic perspectives: Profit or expense? **Applied Energy**, v. 113, p. 825-835, 2014.

PAOLIELLO, J.M.M. **Aspectos ambientais e potencial energético no aproveitamento de resíduos da indústria sucroalcooleira**. Dissertação. 180f. 2006. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru. São Paulo: UNESP, 2006.

PEREIRA, S.Y. **Impactos da aplicação da vinhaça na água subterrânea**. 2003. In: HAMADA, E. (Ed.). *Água, agricultura e meio ambiente no Estado de São Paulo: avanços e desafios*. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2003, C. II, 1 CDROM.

PINTO, C.P. **Tecnologia da digestão anaeróbia da vinhaça e desenvolvimento sustentável**. Dissertação. 162f. 1999. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. Campinas: UEC, 1999.

ROBERTO, C.H.V.; et al. **Utilização de diferentes substratos na produção de forragem hidropônica**. In: IV Semana de Ciência e Tecnologia IFMG - campus Bambuí. IV Jornada Científica, dez. 2011. 5p. Disponível em: <http://www.bambui.ifmg.edu.br/jornada_cientifica/2011/resumos/zootecnia/94.pdf>. Acesso em: 02 out. 2016.

RODRIGUES, L.D. **A cana-de-açúcar como matéria-prima para a produção de biocombustíveis: impactos ambientais e o zoneamento agroecológico como ferramenta para mitigação**. Monografia. 59f. 2010. Universidade Federal de Juiz de Fora. Faculdade de Engenharia. Curso de Especialização em Análise Ambiental. Juiz de Fora: UFJF. 2010.

RODRIGUES, D.; ORTIZ, L. **Em direção à sustentabilidade da produção de etanol de cana de açúcar no Brasil**. São Paulo: Vitae civilis, p. 1-37, 2006.

ROSSETTO, R.; SANTIAGO, A.D. **Adubação: resíduos alternativos**. Brasília: AGEITEC. 2007. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_39_711200516717.html>. Acesso em: 02 out. 2016.

SALOMON, K.R.; LORA, E.E.S. Estimativa do potencial de energia elétrica para diferentes fontes de biogás no Brasil. **Biomassa & Energia**, v. 2, n. 1, p. 57-67, 2005.

SANTANA JUNIOR, A.E. **Produção de metano a partir de vinhaça e melão em reatores UASB termofílicos, em dois estágios**. Dissertação. 70f. 2013. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias Campus de Jaboticabal. São Paulo: UEP. 2013.

SANTOS, F.A.; et al. Potencial da palha de cana-de-açúcar para produção de etanol. **Química Nova**, v. 35, n. 5, p. 1004-1010, 2012.

SILVA, V.L. **Estudo econômico das diferentes formas de transporte de vinhaça em fertirrigação na cana-de-açúcar.** Tese. 46f. 2009. Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”. Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias Campus de Jaboticabal. São Paulo: UEP. 2009.

SILVA, J.A.S. **Concentrado de vinhaça biodigerida como fertilizante:** efeito no substrato, no crescimento e nutrição da cana-de-açúcar. Dissertação. 67f. 2012. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias. São Paulo: UEP. 2012.

SIMÕES, C.L.N.; SENA, M.E.R.; CAMPOS, R. **Estudo da viabilidade econômica da concentração de vinhoto através de osmose inversa.** In: XXIV Encontro Nac. de Eng. de Produção, Florianópolis, SC, Brasil, nov. 2004. 8p.

SOARES, P.A.; ROSSELL, C.E.V. **O setor sucroalcooleiro e o domínio tecnológico.** São Paulo: NAIPPE/USP, v. 2, p. 1-29, 2007.

SOUZA, K.G.; SILVA, M.A.; PRADO, R.A.D.P. **Impactos do setor sucroalcooleiro na (re)organização do espaço urbano:** uma análise em contexto regional. In: IX Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia, p. 1-16, 2012.

URQUIAGA, S.; ALVES, B.J.R.; BOODEY, R.M. Produção de biocombustíveis: A questão do balanço energético. **Revista da Política Agrícola**, ano XIV, n. 1, jan./fev./mar., p. 43-46, 2005.

VIEIRA; M.C.A.; LIMA, J.F.; BRAGA, N.M. **Setor sucroalcooleiro Brasileiro:** evolução e perspectivas, p. 208-245, 2007.

VITALI, V. M. V. **Cultivo de fungos do gênero *Aspergillus* em vinhaça resultante da produção de etanol a partir de caldo de cana e de resíduos cítricos.** 1995. 100f. Dissertação (Ciências Biológicas, área de Biologia Vegetal) – Instituto de Biociências, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Rio Claro, 1995.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.** 3.ed. Belo Horizonte: UFMG, 2005. 243p.

XAVIER, T.F. **Vinhaça *in natura* e biodigerida concentrada:** efeitos nas características químicas e bioquímicas do solo e no crescimento inicial da cana-de-açúcar. Tese. 66f. 2012. Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - UNESP, Campus de Jaboticabal, São Paulo: UNESP, 2012.