

Universidade de São Paulo

Escola Politécnica

Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética

Alexandre Souza da Rosa

Considerações sobre o uso veicular do biogás obtido da fermentação da vinhaça em usinas de açúcar e etanol.

São Paulo
Julho – 2013

Alexandre Souza da Rosa

Considerações sobre o uso veicular do biogás obtido da fermentação da vinhaça em usinas de açúcar e etanol.

Monografia apresentada como forma de avaliação final do Curso de Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética

Orientadora: Profa. Dra. Suanie Teixeira Coelho
Co-orientadora: Profa Msc. Vanessa Pecora Garcilasso

São Paulo
Julho – 2013

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

FICHA CATALOGRÁFICA

Rosa, Alexandre Souza da

Considerações sobre o uso veicular do biogás obtido da fermentação da vinhaça em usinas de açúcar e etanol / A.S. da Rosa. – São Paulo, 2013.

54 p.

Monografia (Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Programa de Educação Continuada em Engenharia.

1.Energias renováveis 2.Biogás 3.Vinhaça 3.Açúcar
4.Etanol

I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Programa de Educação Continuada em Engenharia II.t.

Nome: ROSA, Alexandre Souza da

Título: Considerações sobre o uso veicular do biogás obtido da fermentação da vinhaça em usinas de açúcar e etanol.

Monografia apresentada como forma de avaliação final do Curso de Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética.

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof.:_____

Instituição:_____

Julgamento:_____

Assinatura:_____

Prof.:_____

Instituição:_____

Julgamento:_____

Assinatura:_____

Prof.:_____

Instituição:_____

Julgamento:_____

Assinatura:_____

Agradecimentos

Agradeço ao meu filho João Gabriel, pela alegria e energia, que me motiva diariamente.

Um especial agradecimento e gratidão a minha parceira, companheira e colega Érika Líbero Bueno que acompanhou todas as dificuldades deste trabalho.

A todos os colegas que compartilharam as noites de sexta-feira e as manhãs de sábado durante os últimos dois anos.

A minha orientadora Professora Dra. Suani Teixeira Coelho e em especial a minha co-orientadora Professora Msc. Vanessa Pecora Garcilasso pela paciência, atenção e disponibilidade.

A toda a equipe do programa, em especial ao coordenador Professor José R. Simões-Moreira.

Resumo

ROSA, A. S. **Considerações sobre o uso veicular do biogás obtido da fermentação da vinhaça em usinas de açúcar e etanol.** 2013. Monografia – PECE – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

A perspectiva de aumento no volume da produção de etanol acrescida às possibilidades do etanol de segunda geração causará um aumento significativo da disponibilidade de vinhaça. A necessidade de utilizar a vinhaça como fertilizante se opõem a sua composição físico-química que a caracteriza como um resíduo e restringem seu uso direto no solo. A biodigestão anaeróbica se apresenta como uma alternativa de tratamento da vinhaça com a possibilidade de produzir biogás viável economicamente.

O estudo feito em tecnologias que estão em fase final de testes industriais e atendem as escalar de produção das usinas sucroalcooleiras. O tratamento realizado por fermentadores anaeróbicos UASB, bem como os processos de purificação e de compressão completam o processo até a obtenção do gás combustível capaz de ser aplicado em kits capazes de fazer com que os motores diesel possam também utilizar o biogás produzido pela própria usina, reduzindo o consumo do combustível fóssil..

Os resultados alcançados indicam um grande potencial para produção de biogás a partir da biodigestão da vinhaça e principalmente sua utilização como substituto de parte do óleo diesel consumido na usina sem prejudicar os rendimentos agronômicos da vinhaça *in natura*.

Palavras-chave:

Biogás, Vinhaça, Digestão Anaeróbica, Substituição de Diesel.

Abstract

The prospect of an increase in the volume of ethanol added to the possibilities of second generation ethanol will cause a significant increase in the availability of vinasse. The necessity of using vinasse as fertilizer oppose their physicochemical composition which characterizes it as a waste and restrict their direct use in the soil. Anaerobic digestion is presented as an alternative treatment of vinasse with the possibility of producing biogas economically viable.

The study on technologies that are in the final stages of testing and meet the industrial scale production of sugarcane mills. The treatment by anaerobic UASB fermenter, purification processes and the compression process until obtaining the fuel gas can be applied in kits able to make diesel engines can also use the biogas produced by the plant itself, reducing fossil fuel consumption ..

The results indicate a great potential for production of biogas from the digestion of vinasse and especially its use as a substitute for part of the diesel fuel consumed in the plant without harming yields agronomic natural vinasse.

Keywords:

Biogas, Vinasse, Anaerobic Digestion, Replacement Diesel.

Índice de Tabelas

Tabela 1. Parâmetros físico-químicos da vinhaça <i>in natura</i> resultante de três tipos de mostos diferentes.....	16
Tabela 3: Potencial de produção de biogás a partir de efluentes industriais no Brasil.	20
Tabela 4: Comparativo básico entre tecnologias de fermentadores anaeróbios.....	21
Tabela 5: Indicadores de conversão em metano para diferentes funções orgânicas.	22
Tabela 6: Indicadores de conversão em metano para diferentes resíduos orgânicos.	23
Tabela 7. Composição média do biogás proveniente de diferentes resíduos orgânicos.....	29
Tabela 9: Equivalência energética entre 1 Nm ³ de biogás e outras fontes energéticas.....	30
Tabela 10: Necessidade de remoção de compostos gasosos de acordo com a utilização do biogás.....	32
Tabela 11: Técnicas para remoção de impurezas do biogás.....	32
Tabela 1: Sistemas de armazenamento de biogás.....	36
Tabela 13: Consumo de diesel durante o plantio agrícola em usinas de açúcar e etanol.	41
Tabela 14: Consumo de diesel final durante o plantio agrícola em usinas de açúcar e etanol.	43
Tabela 15. Características físico-químicas da vinhaça – Usina São Martinho.	44
Tabela 16. Quantidades mássicas diárias produzidas de subprodutos.....	45
Tabela 17. Economia de diesel estimado.....	50

Índice de Figuras

Figura 1: Reator UASB Biopaq.....	26
Figura 2: Reator de Membrana Veólia	28
Figura 3: Esquema de purificação de biogás por Absorção.....	34
Figura 4: Sistema de injeção de motores Diesel-Gás.	36
Figura 5: Funcionamento da tecnologia GNV+Diesel.....	37
Figura 6: Balanço de massa do processo de produção de etanol.....	42
Figura 7: Operação da Usina	44
Figura 8: Operação para obtenção de GNV	46
Figura 1: Balanço de massa produção de vinhaça.....	47
Figura 10: Balanço de massa produção de vinhaça tratada	48
Figura 11: Balanço de massa geral do processo de obtenção de GNV e vinhaça tratada	49

SUMÁRIO

Abstract	7
1. Objetivo.....	14
2. Revisão Bibliográfica	15
2.1 Perspectivas da Produção de Etanol e Vinhaça no Brasil.....	15
2.2 Valorização Energética da Vinhaça	18
2.3 Biogás.....	18
2.3.1 Produção do Biogás.....	19
2.3.1.2 Biodigestores Anaeróbios	23
2.3.2 Usos do Biogás	28
2.3.3 Limpeza do Biogás.....	31
2.3.4 Compressão e Armazenamento de Biogás.....	35
2.4 Tecnologia dos motores	35
2.4.1 Kits de transformação	36
2.4.2 Novos motores.....	38
3. Metodologia	39
4. Estudo de Caso - Usina Hipotética	41
4.1 Cálculo do Diesel consumido:	41
4.2 Cenário de aplicação das tecnologias apresentadas	44
4.3 Balanço de massa para a usina de 500 m ³ /dia de etanol.....	46
4.4 Substituição do diesel pelo GNV	49
4.5 Dificuldades de implantação.....	50
5. Conclusão.....	51
6. Bibliografia.....	53

Introdução

A importância da bioindústria de açúcar, etanol e energia é ampliada frequentemente. Essa indústria vem se profissionalizando e oferecendo novas soluções ambientais e econômicas. O grande desafio do momento é o seu principal subproduto em volume, a vinhaça.

O etanol é recuperado inicialmente na forma hidratada, com aproximadamente 96° GL (porcentagem em volume), correspondentes a cerca de 6% de água em peso, deixando a vinhaça ou vinhoto como resíduo, normalmente numa proporção de 10 a 13 litros por litro de etanol hidratado produzido. (Bioetanol BNDES - 2008).

A composição da vinhaça, líquido rico em sais com elevada carga orgânica, permite que ela retorne ao campo. Esse processo é conhecido como fertirrigação. Isso permite que a demanda de fertilizantes para o cultivo da cana seja reduzida. O uso de nitrogênio sintético é baixo, e nas áreas onde a vinhaça é aplicada, todo o potássio necessário é provido pela fertirrigação (Bioetanol BNDES, 2008). Porém, em altas concentrações a vinhaça pode ser considerada um poluente que deve ser tratado antes de ser lançado ao meio ambiente. Esse processo de tratamento ganha grande importância devido ao grande volume de produção deste subproduto e a necessidade agronômica e ambiental.

A falta de critério de dosagem da vinhaça fez com que as agências ambientais estaduais aumentassem a vigilância sobre a aplicação no solo. O Estado de São Paulo, por meio da divulgação da portaria, estabeleceu a norma P4.231 publicada pela CETESB (2005) que inclui uma metodologia para determinação do volume máximo de vinhaça que pode ser aplicado ao solo de acordo com as características físico-químicas desse subproduto. Este é o indicativo do aumento da preocupação crescente com a vinhaça.

A composição da vinhaça assim como a dosagem no solo são diretamente relacionadas com a variedade da cana-de-açúcar, com a composição do solo e com procedimentos fermentativos. As restrições de dosagem de aplicação trazem um grande problema para as usinas que vem um aumento dos custos de fertirrigação. O

aumento dos custos e a pressão ambiental impulsionaram a busca por alternativas para tratamento e aproveitamento da vinhaça.

Muitos trabalhos estão sendo feitos buscando uma alternativa viável tecnicamente e economicamente para o aproveitamento da vinhaça. O potencial de biodigestão da vinhaça e geração de biogás é uma delas. O biogás pode ser utilizado na geração de energia elétrica, energia térmica ou na substituição do óleo diesel na frota de veículos e tratores nas usinas.

Justificativa

Os dados divulgados pela ÚNICA (2012), a região Centro-Sul do Brasil deverá moer algo em torno de 700 milhões de toneladas de cana na safra 2012/2013. A expectativa é de que o setor sucroalcooleiro esteja produzindo aproximadamente 36 bilhões de litros de etanol. Considerando a produção de 12 litros de vinhaça por litro de etanol produzido, tem-se 432 bilhões de litros de vinhaça. Este panorama pode ser alterado consideravelmente quando incluído o horizonte da produção de etanol de segunda geração.

Com este volume de vinhaça, o potencial de geração de biogás é de quase 60 milhões de Nm³ (ZANETTI, 2009). Esse potencial, quando utilizado para substituir o diesel, mostra-se muito promissor.

As preocupações ambientais com o descarte da vinhaça faz com que sejam realizados muitos esforços na busca por uma tecnologia que viabilize o tratamento e um descarte responsável. Essas tecnologias devem atender a redução dos impactos ambientais e também a um baixo custo. A possibilidade de obtenção de biogás com processo eficiente de fermentação anaeróbia da vinhaça é uma alternativa interessante, levando-se em consideração que as propriedades químicas importantes para a fertirrigação não se alteram neste processo.

1. Objetivo

Objetivo deste trabalho será analisar a substituição do óleo diesel utilizado em veículos de usina sucroalcooleira por biogás proveniente da fermentação anaeróbia da vinhaça. Para isto, será analisado o ciclo produtivo do etanol para verificar o consumo de combustível fóssil (diesel), bem como os principais consumidores.

O GNV (Gás Natural Veicular) a ser utilizado na frota da usina é proveniente da purificação e compressão do biogás obtido no tratamento anaeróbio da vinhaça. Serão comparadas três tecnologias de tratamento disponíveis no mercado e verificada qual se adapta melhor aos parâmetros brasileiros. O biogás obtido não pode ser consumido diretamente pelos motores veiculares. Há necessidade de operações unitárias para atingir o grau de purificação e compressão para atender as especificações indicadas pelo fabricante de motores e ANP (Agência Nacional do Petróleo). Foram comparadas e analisadas as operações mais adequadas para a obtenção do GNV a partir da composição do biogás obtido da vinhaça.

Com o GNV obtido, é importante que ele seja consumido em motores eficientes e flex. Caracterizados os grandes consumidores, é possível direcionar a tecnologia de combustão e assim, reduzir consideravelmente o consumo de combustível fóssil.

No balanço de massa realizado para obtenção dos números finais do consumo e substituição do diesel, foram utilizadas tecnologias existentes e em aplicação comercial.

Todos os dados foram estimados e tratados para análise da produção de biogás proveniente da fermentação da vinhaça e utilização na frota de caminhões em uma usina hipotética (dados reais) capaz de produzir 500 m³ de etanol por dia.

2. Revisão Bibliográfica

2.1 Perspectivas da Produção de Etanol e Vinhaça no Brasil

A perspectiva do aumento da produção de etanol nos trás um aumento do fornecimento de vinhaça a ser tratada, consequentemente, o volume de metano a ser produzido.

Essa perspectiva está fundamentada do aumento de carros flex-fuel no mercado Brasil, a instabilidade do preço do petróleo no mercado internacional e o preço competitivo do etanol. Além dos fatores econômicos junta-se a crescente preocupação mundial em relação ao consumo de combustíveis fósseis e o aquecimento global.

O Relatório da UNICAMP (2005), aponta as políticas de apoio aos biocombustíveis na Austrália, China, Colômbia, Estados Unidos, Índia, Japão, Peru, Tailândia, além dos países membros da União Europeia como fatores favoráveis à expansão da produção de etanol no Brasil. Basicamente, estas políticas consistem em leis que permitem o uso do etanol misturado à gasolina em até 10%, isenção de impostos no etanol dos combustíveis oxigenados e de imposto de importação de máquinas necessárias para montagem de destilarias.

Diante deste cenário, o Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE), de 2008 a 2017, realizado pela EPE (2008), prevê que o total de exportações brasileiras de etanol carburante salte de 4,2 para 8,3 bilhões de litros, no período, e que o consumo de etanol no mercado interno chegue a 54,5 bilhões de litros em 2017, sendo 53,2 bilhões de litros de etanol carburante (anidro e hidratado).

As projeções da produção de etanol do PDE (2008 a 2017) calculadas com base no modelo de demanda de etanol elaborado pelo estudo da EPE (2008), incluindo aos volumes projetados para exportação de etanol carburante e outros usos, apontam para 63,9 bilhões de litros de etanol, como sendo o total requerido do setor produtivo em 2017.

A vinhaça é dos principais subprodutos da agroindústria canavieira. É resultante da destilação do vinho, que é o produto da fermentação do caldo da cana-de-açúcar ou do melaço no processo de fabricação do álcool. A vinhaça é constituída principalmente de água, sais, sólidos em suspensão e solúveis, sendo utilizada na lavoura como fertilizante. Entretanto, quando em grandes concentrações, pode se considerado um poluente de alto teor de orgânicos que precisa ser tratado antes de seu lançamento ao meio ambiente. Dessa forma, os impactos produzidos pela vinhaça adquirem enorme importância devido à magnitude de sua produção (POVEDA, 2012).

A Tabela 1 apresenta os parâmetros físico-químicos da vinhaça “in natura” resultante de três tipos de mostos diferentes.

Tabela 2. Parâmetros físico-químicos da vinhaça *in natura* resultante de três tipos de mostos diferentes.

Parâmetros Físico-químicos da Vinhaça			
Parâmetro	Melaço	Caldo	Misto
pH	4,2 – 5,0	3,7 – 4,6	4,4 – 4,6
DBO mg/l	25.000	6.000 – 16.500	19.100
DQO mg/l	65.000	15.000 – 33.000	45.000
Sólidos Totais mg/l	81.500	23.700	52.700
Sólidos Fixos mg/l	21.500	3.700	12.700
Nitrogênio mg/l	450 – 1.600	150 – 700	480 – 710
Fósforo mg/l P2O5	100 – 290	10 – 210	9 – 200
Potássio mg/l K2O	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 SO4 ²⁻	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	19,70 – 21,07	16,40 – 16,43
Matéria Orgânica mg/l	63.400	19.500	38.000
Substâncias redutoras mg/l	9.500	7.900	8.300

Fonte: Poveda, 2012.

O interesse em buscar fontes alternativas de energia e a instabilidade dos preços dos derivados de petróleos faz com que o Brasil tenha uma oportunidade de ampliar, gerar novas tecnologias e aplicá-las no setor sucroalcooleiro.

A produção de cana-de-açúcar cresceu em média 11% ao ano entre 2000 e 2010 e a produção de etanol teve um incremento considerável, motivada pelas vendas de carros flex-fuel, frota que representa 90% dos veículos novos fabricados no país desde em 2012 (ANFAVEA, 2013).

A expansão do setor fez com que a geração de resíduos da produção de etanol também aumentasse. O grande problema continua sendo em relação à vinhaça.

Os técnicos e produtores do setor são unâimes em dizer que a vinhaça traz benefícios à cultura da cana-de-açúcar e a tratam como um “subproduto fertilizante”. Com isso, a disposição de vinhaça passou a ser efetuada diretamente no solo, em muitos casos, sem critérios técnicos definidos, chamando a atenção dos órgãos ambientais fazendo com que fossem criadas normas e resoluções para o correto descarte.

A falta de critério na aplicação da vinhaça fez com que ela seja classificada atualmente como resíduo líquido Classe II A – “*Não inertes podem ter propriedades, tais como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água*” (ABNT, 2004).

A tecnologia do etanol de segunda geração, hidrólise (ácida ou enzimática) dos resíduos sólidos agrícolas, promete aumentar a produção de etanol sem aumentar os custos de transporte da matéria-prima (bagaço e palha). Este incremento de produção sem aumento da área plantada é promissor e tende a aumentar o volume e modificar as características físico-químicas da vinhaça.

Isso tudo, impulsiona o desenvolvimento de tecnologias para o aproveitamento da vinhaça. A tecnologia surge como uma boa alternativa é produção de biogás por biodigestão anaeróbica.

Segundo Zanetti (2009) o potencial de produção de biogás de vinhaça é 4,4 milhões de m³ de CH₄/dia. Estudos de uma grande empresa fornecedora de máquinas e equipamentos para a indústria sucroalcooleira indicam que o biogás representa cerca de 7% do potencial energético da cultura da cana-de-açúcar (DEDINI, 2004), o que reforça a importância do aproveitamento integrado dos resíduos para a produção de energia nesse setor industrial. Finalmente, ressalta-se que a digestão anaeróbica da vinhaça para o aproveitamento do biogás não prejudica a sua utilização como fertilizante (processo conhecido como fertirrigação), principal aplicação da vinhaça.

2.2 Valorização Energética da Vinhaça

A tecnologia de uso agrícola da vinhaça no cultivo da cana-de-açúcar como fonte fertilizante foi praticamente desenvolvida no Brasil, pelo grande presença da indústria sucroalcooleira no país. Segundo Coelho et al.(2004), a disposição da vinhaça através da fertirrigação é uma tecnologia que visa sua utilização de forma racional, por impedir que ela seja descartada diretamente nos corpos aquáticos, possibilita a fertilização dos solos agricultáveis, além da redução nos custos de plantio em relação aos fertilizantes utilizados.

Porém, a vinhaça está classificada como um resíduo e os órgãos ambientais pressionam por uma correta destinação. A busca por tecnologias sustentáveis vem se apresentando. Uma das tecnologias que apresentam boas perspectivas é a biodigestão da vinhaça, com a obtenção do biogás.

Por sua vez, o biogás é um combustível que vem se valorizando pelo grande leque de aplicações, podendo ser purificado e comprimido, conforme necessidade e aplicação.

2.3 Biogás

O biogás é uma mistura gasosa produzida a partir da decomposição anaeróbica de materiais orgânicos, composta primariamente de metano e dióxido de

carbono, com pequenas quantidades de ácido sulfídrico e amônia (Tabela 2). Traços de hidrogênio, nitrogênio, monóxido de carbono, carboidratos saturados ou halogenados e oxigênio estão ocasionalmente presentes no biogás. Geralmente, a mistura gasosa é saturada com vapor d'água e pode conter material particulado e compostos orgânicos com silício (siloxanas) (ZANETTI,2009) . Conforme apresentado na Tabela 2, a composição e o conteúdo energético do biogás podem variar de acordo com o material orgânico e o processo através do qual o mesmo é produzido.

Tabela 3: Característica e composição típica do Biogás

Parâmetro	Gás de aterro	Biogás - digestão anaeróbica da vinhaça
Poder calorífico inferior (MJ/Nm ³)	16	23
Metano (%vol)	35-65	53-70
Dióxido de carbono (%vol)	15-50	30-47
Nitrogênio (%vol)	5-40	
Ácido sulfúrico (ppm)	<100	<1000
Amônia (ppm)	5	<100

FONTE: ZANETTI, 2009.

2.3.1 Produção do Biogás

Os processos de digestão anaeróbica têm sido utilizados em muitas aplicações que demonstraram a sua capacidade de tratar resíduos sólidos e efluentes líquidos constituídos, principalmente de matéria orgânica, permitindo também a reciclagem dos nutrientes. A digestão anaeróbica tem sido aplicada com sucesso no tratamento de efluentes industriais e domésticos, estabilização de lodo de efluentes, manejo de aterros e reciclagem de resíduos biológicos e agrícolas como fertilizantes orgânicos. Além disso, cada vez mais os processos de digestão anaeróbica estão sendo usados para degradação de poluentes orgânicos pesados como os organoclorados ou materiais resistentes ao tratamento aeróbico (METCALF & EDDY, 2003).

O tratamento dos resíduos da indústria de transformação de produtos agrícolas possui um potencial de geração de biogás interessante. O volume diário de

metano dos resíduos da indústria sucroalcooleira perde somente para a indústria de Papel e Celulose (Tabela 3).

Tabela 4: Potencial de produção de biogás a partir de efluentes industriais no Brasil.

Industria	Produção de efluentes (m ³ /t ou m ³ /m ³)	DQO (kg/m ³)	Metano (106 m ³ /d)
Papel e celulose	162	9,0	7,83
Etanol	24	11,0	3,49
Açúcar	8	3,2	0,56
Sucos de frutas	20	5,0	0,24
Laticínios	7	2,7	0,22
Cervejarias	6,3	2,9	0,13
Abate de aves	13	2,1	0,12
Abate de bovinos	13	2,1	0,09
Abate de suínos	13	2,1	0,03
Óleos vegetais	3,1	0,8	0,02
Vinho e vinagre	23	1,5	0,01
Total			12,74

FONTE: Zanetti (2009)

O biogás pode ser utilizado em praticamente todas as aplicações desenvolvidas para o gás natural. Dependendo da aplicação, o biogás deverá ser tratado para atingir a especificação exigida pelo fabricante do motor ou equipamento. Esta especificação fará com que o equipamento, que utiliza o gás proveniente da biodigestão, atinja o grau de eficiência esperado.

As aplicações mais comuns para o biogás são o aquecimento e a geração de eletricidade. Além dessas aplicações, a utilização como combustível veicular e a injeção na rede de gás natural são aplicações que vêm atraindo interesse cada vez maior.

2.3.1.1 Digestão Anaeróbica

A digestão anaeróbia (DA) é um processo biológico para a conversão de compostos orgânicos em biogás (cerca de 50% de CH₄) (FISHER, 2013). Substratos diferentes são adequados para a produção de biogás e DA é frequentemente usada em um contexto agrícola (dejetos de animais e culturas energéticas), mas também para o tratamento de diferentes tipos de resíduos e efluentes agroindustriais.

O potencial da produção de metano depende de diferentes parâmetros técnicos, tais como carga orgânica biológica (COB), tempo de retenção hidráulica (TRH), temperatura de fermentação, imobilização da biomassa microbiana, atividade microbiana, degradabilidade dos componentes do substrato, potenciais inibições e deficiências nutricionais. Portanto, diferentes tecnologias e processos são aplicados para a produção de biogás.

Ao analisar os três diferentes conceitos de biodigestores disponíveis, e capazes de atender uma usina que descarta 12.000 m³ de vinhaça por dia, foi possível verificar as principais diferenças - Tamanho, TRH e COB (Tabela 4).

Tabela 5: Comparativo básico entre tecnologias de fermentadores anaeróbios.

Tecnologia	Reator tipo Lagoa	Reator de circulação Interna	Reator de Membrana
Vinhaça (m ³ /dia)	12000	12000	12000
DQO (kg/m ³)	35,7	35,7	35,7
DQO (kg/dia)	428400	428400	428400
Tamanho (m ³)	2 x 90.000 (180.000)	4 x 4.895 (19.580)	4 x 15.000 (60.000)
TRH (dia)	15	1,22	5
COB (kg DQO/m ³ /dia)	2,38	29,17	7,14
Metano estimado(m ³)	93.600	76.000	140.472
Consumo auxiliar de energia (kW)	250	150	250

FONTE: FISHER, 2013.

A digestão anaeróbia é realizada por diversos grupos de micro-organismos que convertem a matéria orgânica complexa em biogás, amônia, água e novas células bacterianas (SALOMON, 2007). A digestão anaeróbia é um processo complexo que envolve muitas espécies de bactérias e sucessivas etapas intermediárias. As reações bioquímicas principais que ocorrem no processo

caracterizam os grupos de micro-organismos predominantes, podendo ser dividido em quatro etapas:

1º Hidrólise: A hidrólise da matéria orgânica presente, gera compostos mais simples, que podem ser assimilados pelos micro-organismos.

2º Acidogênese: Esta etapa acontece quando a matéria orgânica dissolvida é biodegradada até ácidos graxos voláteis, hidrogênio, dióxido de carbono e alcoóis por uma população de bactérias heterogêneas.

3º Acetogênese: Nesta etapa os produtos formados anteriormente são oxidados para acetato, hidrogênio e gás carbônico. O grupo bacteriano desta etapa tem um crescimento relativamente lento. As reações que produzem são muito mais complexas energeticamente e são interrompidas facilmente por acúmulo de gás hidrogênio dissolvido no meio. De todos os produtos produzidos por estes micro-organismos somente o acetato e o hidrogênio podem ser assimilados pelas bactérias metanogênicas.

4º Metanogênese: O processo de degradação é finalizado por esta etapa, que consiste na transformação dos produtos formados anteriormente em metano e CO₂.

A geração de biogás depende da composição do substrato. Parâmetros muito importantes para a avaliação da qualidade de um substrato na geração de biogás são a quantidade de água, compostos orgânicos, e sais minerais. Outros compostos que devem ser observados são as cinzas (minerais), proteínas, lipídios e diferentes carboidratos. Essas frações têm uma degradação anaeróbia diferente e influenciam a produtividade do biogás e o teor de metano (Tabela 4). Alguns compostos (açúcares) são degradados muito rapidamente, enquanto os outros, como a lignina, não são degradados.

Tabela 6: Indicadores de conversão em metano para diferentes funções orgânicas.

Produção de biogás e composição conforme substrato.

	Produção teórica (L/kg SV)	Composição teórica em % Volume	
Carboidratos	750	50% CH ₄	50% CO ₂
Lipídeos	1.300	72% CH ₄	28% CO ₂
Proteínas	800	60% CH ₄	40% CO ₂

FONTE: (VDI, 2006)

2.3.1.2 Biogestores Anaeróbios

Existem vários tipos de biogestores disponíveis no mercado. Os reatores tipo *Upflow anaerobic sludge blanket - UASB* se mostraram adequados para tratamento da vinhaça (POVEDA, 2012). Este reator consiste em um tanque de fluxo ascendente no qual micro-organismos multiplicam-se dispersos, sem a necessidade de um material suporte, formando flocos ou grânulos densos com alta resistência mecânica que permanecem no reator. Na sua parte superior há um separador trifásico (sólido-líquido-gás), onde ocorre a remoção do gás produzido, assim como a sedimentação e retorno automático do lodo à câmara de digestão.

Salomon (2007) relata estudos realizados numa planta piloto de escala industrial (reator UASB de 75 m³), operando 280 dias por ano, demonstraram a viabilidade da digestão anaeróbia termofílica (55-57 °C) de vinhaça em reatores UASB. Conseguiram-se altas taxas de carregamento orgânico (25-30 Kg DQO/m³ de reator por dia), cerca do dobro daquelas normalmente usadas para tratamentos mesofílicos similares de vinhaça, nesse tipo de reator. Nestas condições, verificou-se alta conversão da matéria orgânica (com 72% de eficiência na remoção de DQO) e taxa de produção de biogás de 10 m³/m³ de reator por dia. Segundo dados da Tabela 6, 1 m³ de vinhaça produz 14,23 m³ de metano.

Tabela 7: Indicadores de conversão em metano para diferentes resíduos orgânicos.

Indicadores de conversão em metano para diferentes resíduos orgânicos

Resíduo Orgânico	Unidades	Indicadores	Referências
Vinhaça	$\text{m}^3\text{CH}_4/\text{m}^3$	14,23	Johansson, 1993
RSU de ETE's	$\text{m}^3\text{CH}_4/\text{m}^3$	0,029	Vieira et al., 2002
Dejetos Bovinos	$\text{m}^3\text{CH}_4/\text{m}^3$	0,04	Castanón, 2002
Dejetos Suínos	$\text{m}^3\text{CH}_4/\text{m}^3$	0,35	Castanón, 2002

Fonte: Salomon, 2007

Apesar de existir grande variedade de tecnologias fermentativas, produtoras de biogás, a tecnologia UASB é a que melhor se adaptou às condições da vinhaça no Brasil. Há empresas oferecem soluções comerciais em escala capaz de atender a necessidade das usinas.

2.3.1.2.1 Conceito de Reator tipo Lagoa (RL)

Reatores Lagoa são comumente usados na digestão anaeróbica dos dejetos animais e fluxos de águas residuais diluídas. A COB deste sistema é geralmente baixa, a TRH é alta, e produção de biogás depende muito da temperatura ambiente (FISCHER, 2013).

O conceito é propenso a instabilidades devidas à falta de controle da temperatura, controle de pH, e suplementação de micronutrientes.

Devido ao baixo COB total é necessária a instalação de digestores muito grandes. Em grandes digestores o risco de sedimentação e formação de zonas preferenciais é elevado, podendo levar à redução da degradação e redução do volume efetivo do reator. Para evitar que isto ocorra, os digestores devem contar com agitadores e bombas nas entradas e saídas do sistema, posicionadas de maneira adequada para assegurar a mistura. Especialmente durante o período de entressafra, quando a vinhaça não é produzida, se não houver uma correta manutenção, a mistura de sólidos se precipita podendo formar sedimentos que podem ser impossíveis de retirar devido ao alto grau de incrustação, praticamente petrificando no leito do reator.

Devido à baixa atividade metanogênica não é possível controlar a produção de biogás por ajuste do COB, mas as flutuações na produção do biogás pode ser compensadas pelo grande volume de digestor.

A fase de “start-up”, no início da safra leva muito mais tempo quando comparado com os outros sistemas. Após o final da safra e parada da adição de vinhaça, o biogás será produzido para muitos dias e tem que ser considerado na operação.

A grande área de cobertura e o tempo de duração vedação aumentam o risco de danos ao material, possibilitando prováveis escapes de biogás na lagoa. A permeabilidade da tampa depende do material (PVC, HDPE, LLDPE), da espessura, abióticos e composição do biogás. As emissões de metano de 302-901 ml/m² dia e são relatados na literatura (Stark, 2005). Assumindo uma profundidade de 5 m, um volume de 180,000 m³, a lagoa teria uma superfície de 36.000 m² e pode causar liberações de 10,8 a 32,4 m³ de metano por dia. Isto poderia reduzir os benefícios e influenciar o impacto ambiental negativamente.

2.3.1.2.2 Conceito de Reator de Circulação Interna (RCI)

Reatores de circulação interna (ICR) foram desenvolvidos com base no sistema “UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*)” ou RAML (Reator Anaeróbio de Manta de Lodo). Uma mistura interna é realizada por meio da pressão do gás do biogás produzido e faz reduzir as necessidades de energia para o bombeamento e mistura. RCI são usados principalmente para aplicações industriais (tratamento de águas residuais da indústria cervejeira, indústria de açúcar, indústrias de papel e celulose e indústrias de destilaria e fermentação) (MUTOMBO, 2004). O processo compreende a imobilização de micro-organismos por granulação em que a atividade no reator é fortemente aumentada em comparação com sistemas sem granulação. Esta maior atividade permite taxas elevadas COBs (até 30-48 kg DQO/m³/d) e curto TRH (2-4 h) (FISHER, 2013)

Características do substrato orgânico pode influenciar a formação, composição e estrutura dos grânulos anaeróbios. A presença de íons bivalentes e trivalentes positivas, tais como Ca²⁺, Mg²⁺, Fe²⁺ e Fe³⁺, pode aumentar a formação de grânulos.

Devido à concentração de micro-organismos por imobilização este conceito apresenta várias vantagens:

- Digestores são pequenos;
- Período de reinicio de operação é curto;
- A produção de biogás reage rápida a mudanças no COB, o que permite um bom controle da produção de biogás pelo COB e reduz as possíveis diferenças nas taxas de produção de biogás;
- Estabilidade do processo
- Menos energia é necessária para a mistura no reator, devido à circulação interna.

A “start-up” rápido da operação é possível quando a TOC é aumentada gradualmente durante os primeiros dias e a temperatura do reator é controlada. Wolmarans e De Villiers (2004) recomendam COBs entre 4 e 8 kg DQO/m³/d para o período de arranque no tratamento de efluentes sazonais. Com isso é possível conseguir uma boa taxa de degradação da DQO em uma semana (WOLMARANS, 2004). Outro estudo relatou uma reativação cheia de grânulos metanogênicos dentro de 15-20 dias após uma pausa operacional de nove meses (FISHER, 2013).

Um dos biodigestores anaeróbios vendidos comercialmente é o Biopaq UASB da Paques (Figura 1).

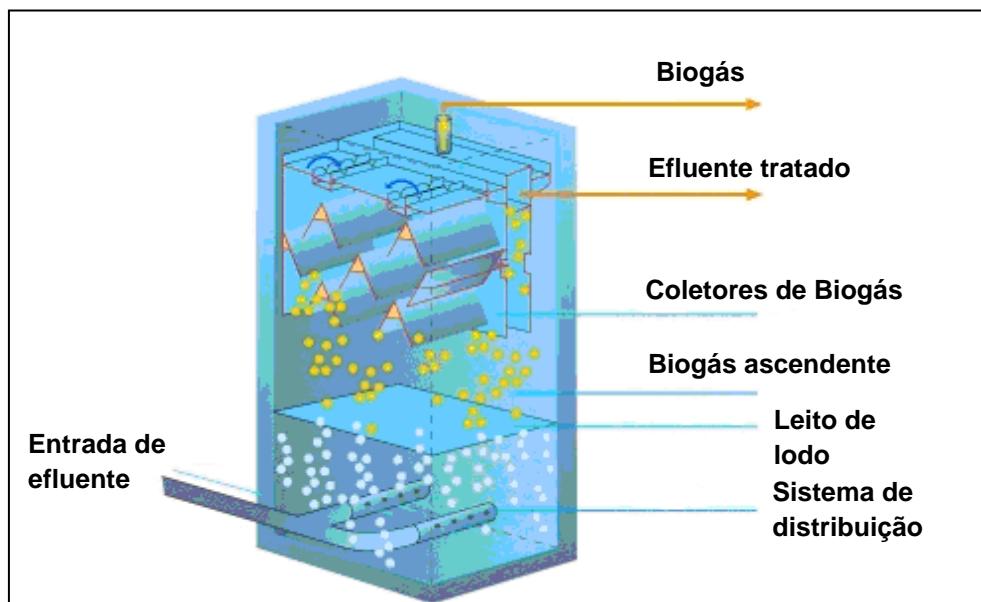


Figura 2: Reator UASB Biopaq
Fonte: BIOPAQ® UASB (2012)

2.3.1.2.3 Conceito de Reator de Membrana (RM)

Reatores anaeróbicos de membrana tiveram um desenvolvimento relativamente recente, acoplando a tecnologia de separação por membranas aos digestores anaeróbicos tradicionais (CSTR – “*Continuous Stirred Tank Reactor*”, por exemplo), mais comumente utilizados na agricultura para a produção de biogás. A vantagem da tecnologia de membranas é a de manter a biomassa microbiana ativa no interior do fermentador. Em contraste com o RCI, a biomassa não é decantada por ação da gravidade, mas reciclada.

Além disso, os sólidos suspensos são reciclados, o que pode aumentar a eficiência de degradação total, dissociando o tempo de retenção de sólidos do COB. Portanto altas reduções de DQO podem ser alcançadas. Não só orgânicos biodegradáveis são filtrados, mas também os minerais e orgânicos não degradáveis. Isto poderia causar a entupimento das membranas e, por isso, o teor de minerais e matéria seca devem ser monitorizados e removidos pelo sistema de precipitação.

O biodigestor produzido pela Veólia (Figura 2) também é de aplicação comercial. Com pequenas diferenças tecnológicas se comparados ao UASB Paques, ele pode tratar a vinhaça em escala industrial.

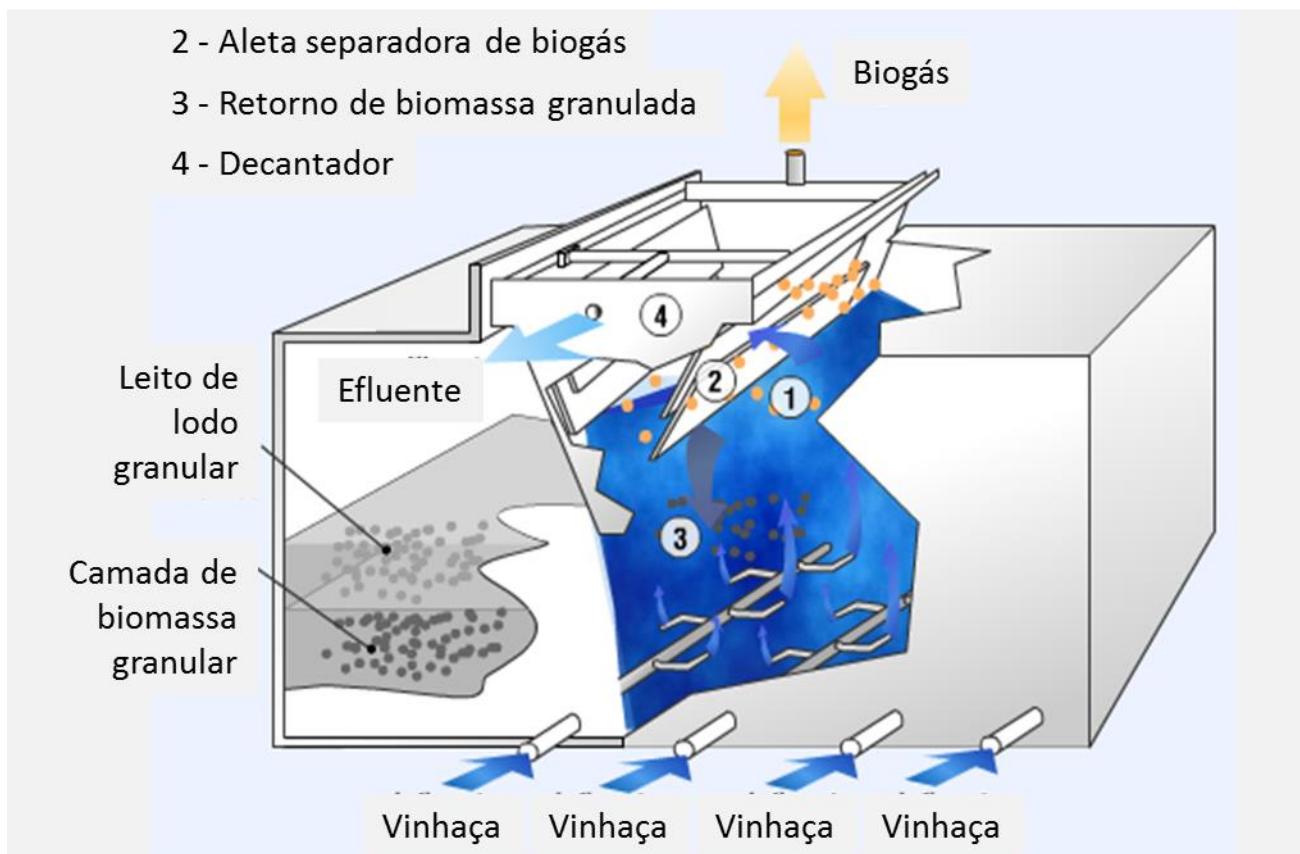


Figura 3: Reator de Membrana Veólia
 FONTE: Veolia Water, 2013

2.3.2 Usos do Biogás

Para o uso do biogás (Tabela 7) como gás natural, é preciso que atinja as especificações dos órgãos reguladores e equipamentos. Uma das aplicações é atingir as especificações do gás natural e ser utilizado nos veículos movidos a gás natural veicular (GNV). No final de 2005 havia mais de 5 milhões de veículos adaptados para o uso de GNV no mundo. A quantidade de ônibus e caminhões movidos a gás natural também está aumentando consideravelmente, totalizando

210.000 veículos pesados (140.000 caminhões e 70.000 ônibus), especialmente nos países da Europa, o que demonstra que a configuração do veículo não é um problema para o uso do biogás como combustível (IEA, 2006). Entretanto, as especificações para a qualidade do gás são estritas. Com respeito a essas exigências, o biogás proveniente de um biodigestor precisa ser purificado.

Tabela 8. Composição média do biogás proveniente de diferentes resíduos orgânicos

Composição do Biogás obtido da Vinhaça	
Gases	Porcentagem (%)
Metano (CH_4)	40 – 75
Dióxido de Carbono (CO_2)	25 – 40
Nitrogênio (N)	0,5 – 2,5
Oxigênio (O)	0,1 – 1
Ácido sulfídrico (H_2S)	0,1 – 0,5
Amônia (NH_3)	0,1 – 0,5
Monóxido de Carbono (CO)	0 – 0,1
Hidrogênio (H)	1,0 - 3,0

Fonte: Castanon, 2002

Através da purificação é obtido um gás que: possui um poder calorífico maior. Isto faz aumentar a autonomia do veículo e possui qualidade constante para uma combustão homogênea e por conseguinte, uma condução segura do veículo. O GNV não causa corrosão devido à retirada do H_2S , amônia e água, não contém partículas que causam dano mecânico aos motores, não causa congelamento do diesel devido a retirada da umidade e possui uma qualidade declarada e assegurada.

Na prática, isso significa que o CO_2 , H_2S , NH_3 , material particulado e água (e algumas vezes outros componentes-traço) foram removidos, de modo que o gás resultante para o uso veicular possui um conteúdo de metano superior 95% em volume. Em cada país, diferentes especificações para o uso veicular do biogás e do gás natural são aplicadas.

Finalmente, o biogás pode ser injetado e distribuído na rede de gás natural, uma vez que o biogás assim como o gás natural é composto principalmente de metano. Existem diversas vantagens para o uso da rede de gás natural para o

transporte e distribuição do biogás. Uma delas é que a rede conecta os locais de produção com as áreas mais populosas, o que permite que o gás alcance novos consumidores. Também é possível aumentar a produção em locais remotos aproveitando todo o gás produzido.

Adicionalmente, a injeção do biogás na rede de gás natural aumenta a segurança do abastecimento local. As especificações do gás natural devem ser atendidas para a injeção na rede, o que pode ser realizado, na maioria das vezes, com os processos de tratamento existentes. O poder calorífico do biogás varia entre 22.500 a 25.000 kJ/m³, admitindo o metano com cerca de 35.800 kJ/m³ (Resolução ANP Nº 16, DE 17.6.2008 - DOU 18.6.2008). Por tanto, seu poder calorífico pode chegar a 60% do poder calorífico do gás natural.

Tabela 9: apresenta uma comparação entre os PCI's de diferentes gases.

Tabela 9: PCI de diferentes gases.

Poder Calorífico Interno (PCI)		
Gás	PCI (kcal/m ³)	PCI (kJ/m ³)
Metano	8.500	35.558
Propano	22.000	92.109
Butano	28.000	117.230
Gás Natural	7.600	31.819
Biogás	5.500	23.027

Fonte: Castanon, 2002.

A utilização do biogás para substituição ao diesel é possível e a equivalência de 1 Nm³ de biogás em relação aos principais combustíveis utilizados é apresentado na Tabela 9.

Tabela 10: Equivalência energética entre 1 Nm³ de biogás e outras fontes energéticas.

Fonte	Faixa
Gasolina (L)	0,61 - 0,70
Querosene (L)	0,58 - 0,62
Óleo Diesel (L)	0,55
GLP (kg)	0,40 - 1,43
Álcool (L)	0,8
Carvão Mineral (kg)	0,74
Lenha (kg)	3,5
Eletricidade (kWh)	1,25 - 1,43

Fonte: (Zanetti, 2009)

O biogás é um gás corrosivo, exigindo cuidados especiais com os materiais empregados nos equipamentos utilizados. Esta característica é consequência da presença de sulfeto de hidrogênio (H_2S). No Brasil o limite de emissão para os sulfetos, segundo o CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente, não pode ultrapassar 1,0 mg/l. Segundo os padrões nacionais de qualidade do ar fixados na Resolução CONAMA nº 3, de 28/06/90, no Brasil existem limites somente para o dióxido de enxofre (SO_2) (Padrão primário – 365 $\mu g/m^3$ e Padrão secundário – 100 $\mu g/m^3$ em 24 horas), também considerado como produto da combustão do biogás e nocivo à saúde. A amônia também em baixas concentrações é corrosiva para o cobre, podendo emitir como produto da combustão os óxidos de nitrogênio também nocivos à saúde e ao ambiente.

Ao contrário do propano e butano, o metano é um gás leve e de densidade mais fraca, isto faz com que ele ocupe um volume significativo e dificulte sua liquefação, tornando mais custoso seu transporte e armazenamento.

2.3.3 Limpeza do Biogás

Existem três motivos principais para o tratamento do biogás: atender as especificações necessárias para cada aplicação (geradores, caldeiras, veículos), aumentar o poder calorífico do gás e padronizar o gás produzido. Para muitas aplicações a qualidade do biogás deve ser melhorada. Os principais parâmetros que podem requerer remoção em um sistema de tratamento são H_2S , água, CO_2 e

compostos halogenados. A Tabela 9 apresenta os principais requisitos para remoção de compostos gasosos de acordo com a utilização do biogás.

Tabela 11: Necessidade de remoção de compostos gasosos de acordo com a utilização do biogás.

Aplicação	H ₂ S	CO ₂	H ₂ O
Caldeiras	<1000 ppm	Não	Não
Fogões	Sim	Não	Não
Cogeração	<1000 ppm	Não	Condensação do Vapor
Combustível veicular	Sim	Recomendável	Sim
Rede de gás natural	Sim	Sim	Sim

Fonte: (ZANETTI, 2009)

A presença de substâncias não combustíveis no biogás, como a água e o dióxido de carbono prejudica o processo de queima, tornando-o menos eficiente. Estas substâncias absorvem parte da energia gerada. Além destes, também há a presença de H₂S que pode acarretar corrosão, diminuindo tanto o rendimento, quanto à vida útil dos equipamentos utilizados. A maioria dos biodigestores anaeróbios produz um biogás que contém entre 0,3 a 2% de H₂S, observando-se também a presença de traços de nitrogênio e hidrogênio (COELHO et al., 2004). Dependendo da aplicação é recomendável a purificação do biogás removendo o H₂S, CO₂, e a umidade. As

Alguns mecanismos básicos (Talela 11) estão envolvidos para proporcionar a separação seletiva de componentes gasosos. Estes podem incluir a absorção física ou química, a adsorção em uma superfície sólida, a separação em membranas, separação criogênica e a conversão química. Para o tratamento do biogás, os métodos de absorção física e química são geralmente utilizados por serem efetivos mesmo para as baixas vazões normalmente encontradas nas plantas de biogás. Além disso, o método é menos complicado, requer uma infra-estrutura mais simples e é custo-efetivo.

Tabela 12: Técnicas para remoção de impurezas do biogás.

Impureza	Descrição	Detalhes
Água	Adsorção	Sílica Geral Peneira Molecular Alumina
	Absorção	Etíleno Glicol Temperatura -6,7° C Selexol
	Refrigeração	Resfriamento a 2° C
Hidrocarbonetos	Adsorção	Carvão Ativado Óleo leve Etíleno Glicol Selexol
	Absorção	Temperatura -6,7° C e -33,9 °C
	Combinação	Refrigeração dom etíleno glicol e adsorção de carão ativado
CO ₂ e H ₂ S	Absorção	Solventes orgânicos Selexol Flúor Rectisol Soluções de sais alcalinos Potássio a alta temperatura Alcanolaminas Mono, di - tri etanol amina Deglicolamina Ugarsol -CR (solvente)
	Absorção	Peneira Molecular Carvão Ativado
	Separação por Membrana	Membrana de fibra oca
Siloxina	Adsorção	Carvão Ativado

A remoção de CO₂ deve acontecer quando houver a necessidade do biogás atingir os padrões do gás natural, como por exemplo seu uso em veículos ou para ser injetado na rede de GN, uma vez que ele dilui o conteúdo energético do biogás, mas não possui impacto ambiental significativo.

Um dos métodos mais fáceis e baratos envolve o uso de água pressurizada como absorvente. O biogás bruto é comprimido e alimentado no fundo de uma coluna de leito empacotado, enquanto a água pressurizada é espraiada a partir do topo. O processo de absorção é, portanto, contra-corrente. Isto dissolve o CO₂ e o H₂S na água, que são coletados no fundo da torre (Figura 3). A água pode ser reciclada para a primeira torre de purificação. O biogás que sai no topo da coluna

está enriquecido em metano e saturado com água. Para reduzir a concentração de vapor d'água o biogás deve ser seco. Além da água, um solvente orgânico como o polietileno glicol pode ser usado para a absorção do CO₂.

A remoção de água pode ser necessária devido ao potencial de acumulação de condensado na linha de gás, a formação de uma solução ácida corrosiva quando o sulfeto de hidrogênio é dissolvido ou para atingir baixos pontos de orvalho quando o biogás é estocado sob pressões elevadas para evitar a condensação e congelamento.

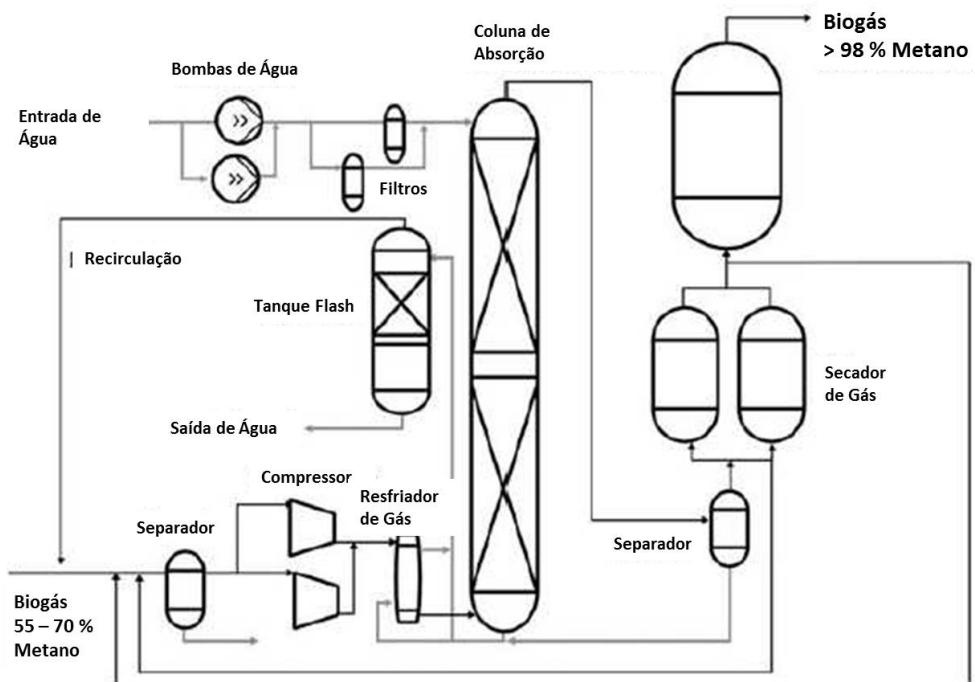


Figura 4: Esquema de purificação de biogás por Absorção.
FONTE: Zanetti, 2013

As especificações de qualidade dependem principalmente da aplicação. A utilização em unidades de cogeração é o caso típico onde apenas os contaminantes devem ser removidos do biogás. A maioria dos fabricantes de turbinas a gás especifica limites máximos de ácido sulfídrico, hidrocarbonetos halogenados e siloxanas no biogás. Quando usado como combustível veicular, todos os contaminantes bem como o dióxido de carbono devem ser removidos para atingir uma qualidade adequada do gás. Existem diversas tecnologias disponíveis para a remoção de contaminantes do biogás e purificação do biogás para atender as especificações de combustível veicular ou do gás natural.

2.3.4 Compressão e Armazenamento de Biogás

Com o crescimento da produção de biogás, as tecnologias de geração tendem a ser mais eficientes, provocando a necessidade de construção de cilindros especiais para acondicionamento do mesmo. Os cilindros de armazenamento de gases devem ser resistentes para suportar a pressão exigida, porém o mais leve possível para não comprometer a capacidade de carga do veículo.

Para que possa ser utilizado como combustível para veículos, os gases devem ser comprimidos para que atinja pressões de abastecimento da ordem de 200 a 220 bar (ISO 11439:2000). Este aumento de pressão é possível com o uso de compressores.

Depois de purificado, o biogás deverá ser comprimido para diminuir o volume e facilitar o transporte e o armazenamento. O biogás contendo principalmente metano não pode ser facilmente armazenado e nem liquefeito à pressão e temperatura ambiente (temperatura crítica de -82°C e pressão 47,5 bar). A compressão é melhor no biogás limpo. Os sistemas de armazenamento mais comumente utilizados são apresentados na Tabela 12.

Tabela 13: Sistemas de armazenamento de biogás.

Pressão	Estocagem	Material
Baixa (0,138 – 0,414 bar)	Selo d`água	Aço
Baixa (1,05 – 1,97 bar)	Gás 'bag'	Plástico, vinil, lona (borracha)
Media	Tanques de propano e butano	Aço
Alta (200 bar)	Cilindros comerciais de gás	Aço

Fonte: KAPDI, 2004.

2.4 Tecnologia dos motores

A transformação de motores para gás constitui-se basicamente em modificações nos sistemas de alimentação e de ignição (Figura 4), bem como taxa de compressão. Os motores a gás, de ignição por centelha, possuem uma eficiência volumétrica menos eficiente que o equivalente motor que se utiliza combustíveis fósseis, porque quando ocorre a adição de gás reduz-se o volume de ar aspirado. Contudo, essa menor eficiência volumétrica é geralmente compensada pelo fato de que os motores a gás possuem taxas de compressão mais elevadas.

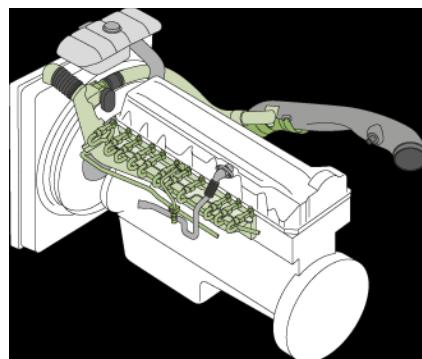


Figura 5: Sistema de injeção de motores Diesel-Gás.

FONTE: Volvo, 2013

Com as tecnologias de transformação de motores e conversão para utilização flex, é possível reduzir as emissões de poluentes, sem perda de potência do motor. A flexibilidade permite escolher o combustível de acordo com a disponibilidade de abastecimento e o melhor preço.

2.4.1 Kits de transformação

O protótipo traz a tecnologia flex GNV+Diesel da Bosch, um moderno sistema que permite a utilização de Gás Natural Veicular (GNV) em motores de ciclo Diesel. A substituição do diesel pelo gás natural é de até 90%, mantendo a mesma potência e nível de consumo de combustível do motor Diesel (BOSCH, 2013).

Um sistema de injeção de gás natural é adicionado paralelamente ao sistema de injeção diesel, de forma que o GNV, injetado no coletor de admissão de ar do

motor, chegue à câmara de combustão. O diesel é injetado posteriormente, em uma quantidade bem reduzida, com o objetivo de iniciar o processo de combustão que fará a queima do gás natural (Figura 5).

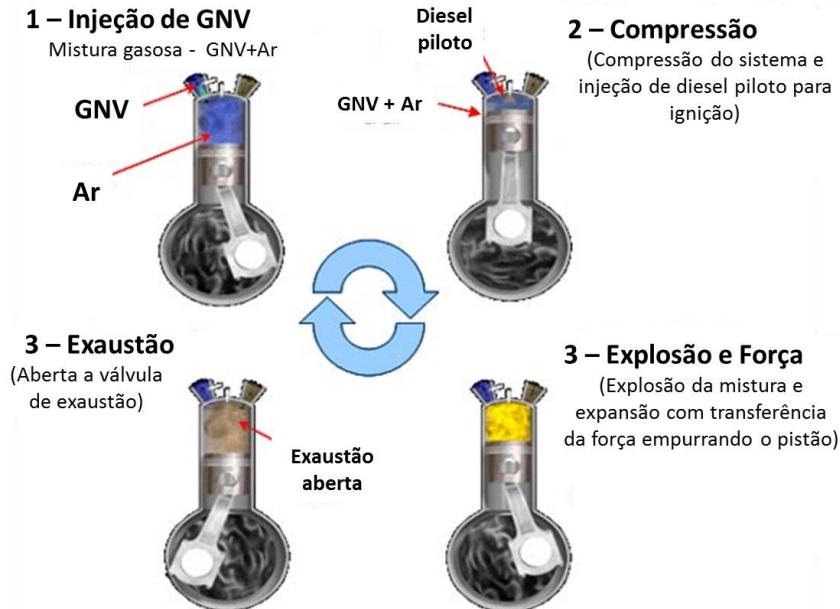


Figura 6: Funcionamento da tecnologia GNV+Diesel.

FONTE: Volvo, 2013

O coração da tecnologia flex GNV+Diesel está no seu sofisticado sistema de gerenciamento eletrônico, que permite controlar simultaneamente os sistemas de injeção dos dois combustíveis de modo a proporcionar a maior eficiência possível..

O motor GNV+Diesel tem apresentado alta eficiência em consumo de gás natural, semelhante ao motor que funciona somente com diesel: 1 litro de diesel pode ser substituído por 0,9 m³ de gás natural. Isso significa que uma frota de veículos equipados com essa tecnologia apresentará melhora em termos de consumo, além de se beneficiar economicamente com a redução de custos com combustível, uma vez que o GNV é normalmente mais barato que o diesel.

A flexibilidade para uso de gás natural ou diesel é outro fator importante. "Assim como ocorre com os carros flex, com o GNV+Diesel a escolha do combustível a ser utilizado é feita pelo usuário, a qualquer momento, considerando

fatores como disponibilidade ou vantagem no preço", ressalta Besaliel Botelho, vice-presidente executivo da Robert Bosch América Latina (BOSCH, 2013).

2.4.1.1 Testes

Os testes realizados pela Bosch também comprovam que há ganhos ambientais na utilização do GNV+Diesel, e que essa nova tecnologia atenderá, com vantagens, a futura legislação ambiental. "A redução de particulados pode chegar a 80% e há um forte potencial de redução de NOx - Óxido de Nitrogênio", afirma Botelho. Além disso, a utilização do novo sistema permite também redução de aproximadamente 20% na emissão de CO₂ -Dióxido de Carbono, quando comparado ao motor trabalhando só com diesel (Bosch, 2013).

2.4.1.2 Aplicação da nova tecnologia

O GNV+Diesel pode ser aplicado em todos os tipos de motores do ciclo Diesel, seja no segmento de veículos pesados ou leves. Além do GNV, a tecnologia é compatível também com GNL (Gás Natural Liquefeito) e Biometano. A utilização deste sistema em carros de passeio com motores a Diesel tem o potencial de criar um veículo de baixo impacto ambiental e alta economia, ideal para o uso profissional, como taxis, por exemplo. "No preço atual dos combustíveis no Brasil, com a nova tecnologia o custo por quilometro rodado em cidade não seria maior que R\$0,10, ou seja, menos da metade do custo do quilômetro rodado por um veículo com gasolina ou etanol", exemplifica Botelho (VOLVO, 2013)

2.4.2 Novos motores

Os caminhões rodam usando apenas diesel, porém, sem os mesmos ganhos ambientais e econômicos oferecidos pelo GNV obtido de fontes renováveis. A tecnologia do motor baseada no motor diesel convencional equipado com injetores para gás, um tanque de combustível especial, que mantém o GNV, e um conversor catalítico torna-se uma solução para a redução do consumo de diesel. Testes de campo realizados pela Volvo na Europa mostraram que a tecnologia diesel/metano oferece o mesmo nível de confiabilidade operacional aos caminhões que o motor diesel convencional.

A Volvo iniciou no Brasil os primeiros testes com um caminhão movido a diesel/metano, uma solução de combustível alternativo para transporte de longa distância. O caminhão é movido com até 75% de GNV e o restante de diesel (Volvo, 2013).

A Volvo é a primeira montadora de caminhões a adotar a tecnologia GNV+Diesel em escala industrial. Além do Brasil, a empresa está testando veículos movidos a GNV+Diesel na Europa, nos Estados Unidos e na Ásia.

O caminhão também pode rodar usando apenas diesel, porém, sem os mesmos ganhos ambientais e econômicos oferecidos pelo gás natural. A tecnologia do motor é baseada no motor diesel convencional equipado com injetores para gás, um tanque de combustível especial, parecido com uma garrafa térmica. A dirigibilidade é similar à de caminhões diesel convencionais. Se o tanque de gás acabar, o sistema automaticamente passa para diesel. O motorista é então alertado por uma luz que acende no painel de instrumentos (VOLVO, 2013).

3. Metodologia

Este trabalho tem como objetivo verificar a perspectiva da substituição do óleo diesel da frota de caminhões da usina pelo biogás obtido da vinhaça. Foi utilizada uma metodologia pautada em revisão bibliográfica e informações de equipamentos com tecnologia estabelecida.

Para isso, estabeleceram-se os limites do sistema a serem avaliados:

1. Plantio (Preparação do solo, plantio, tratos agrícolas, colheita);
2. Fase Agrícola (Tratos agrícolas, colheita e transporte até a unidade de produção);
3. Fase Industrial (todas as etapas existentes, desde a moagem da cana-de-açúcar até a produção final do álcool e obtenção da vinhaça);

4. Tratamentos da Vinhaça (todas as etapas de tratamento da vinhaça até a obtenção do metano GNV).

Para realizar este estudo, será considerada uma usina de produção de álcool de porte médio, produzindo diariamente 500 m³ de etanol hidratado (96% V/V) gerando 6000 m³ de vinhaça. Esta usina hipotética distribui a vinhaça resultante da mesma maneira antes e depois do tratamento. A única alteração considerada será na composição físico-química da vinhaça antes e pós-tratamento, os volumes serão os mesmos 6000 m³ para efeitos de comparação e análise dos impactos.

O biogás gerado e purificado para a obtenção do biometano será utilizado em caminhões concebidos para queimar diesel puro e mistura diesel + biometano, em mistura de até 75% metano.

4. Estudo de Caso - Usina Hipotética

Serão utilizados dados e informações da literatura para estabelecer os parâmetros de trabalho de uma usina dimensionada para produzir 500 m³/dia de etanol, bem como o balanço de massa das correntes que interessam neste estudo.

4.1 Cálculo do Diesel consumido:

Para cálculo da estimativa de consumo de diesel da usina, foram utilizados como referência os dados extraídos de Bianchini (2007), conforme Tabela 13. Fazendo as relações, obteve-se uma estimativa do número de consumo de combustível fóssil nas principais etapas, bem como os maiores equipamentos consumidores de combustível.

Tabela 14: Consumo de diesel durante o plantio agrícola em usinas de açúcar e etanol.

Etapa	Atividade	Equipamento	litros / ha	%
Preparo do Solo	Aração	Valtra/MF 680	50,00	19,41%
	Gradagem	Valtra/MF 680	23,30	9,05%
Plantio	Abertura de Sulcos	Vatra BH 180	24,70	9,59%
	Transporte das Mudas	Caminhão Scania	18,20	7,07%
Tratos	Fechamento Sulcos	Vatra BH 180	10,90	4,23%
	Aplicação de Herbicidas	Jacto/Uniport 2000	0,60	0,23%
Colheita	Colheita	Case A7700	79,20	30,75%
	Armazenamento da Cana	Trator Maxion 9150	18,70	7,26%
Transporte Cana	20 km de distância	Caminhão Scania	32,00	12,42%
Total			257,6	100,00%

FONTE: Desenvolvida a partir dos dados de *Bianchini, 2007*.

Somente serão consideradas as fases de Preparo do Solo, Plantio, Tratos Agrícolas, Colheita e Transporte da Cana até a usina. O consumo de diesel no transporte de etanol aos distribuidores e a fase de preparo de mudas não fazem parte deste estudo.

A Figura 3 apresenta o balanço de massa do processo de produção de etanol considerando os principais componentes para o estudo

Se levarmos em consideração as principais componentes neste estudo, podemos simplificar as informações.

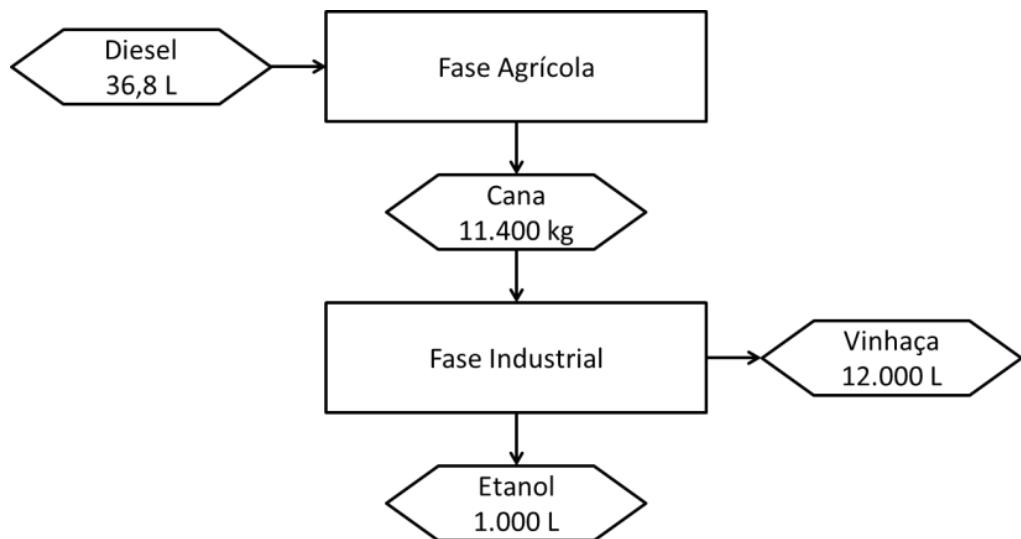


Figura 7: Balanço de massa do processo de produção de etanol.

FONTE: Desenvolvida a partir dos dados de *Bianchini, 2007*.

O transporte do campo até a indústria deverá ser uma média de 40 km, uma vez que o raio de plantio das usinas pode chegar a 100 km. Como os caminhões consomem em média 1,6 L/km, haverá um acréscimo de 32 L no item “Transporte Cana” da Tabela 13, passando de 32 L/ha para 64 L/ha.

Levando em consideração que as mudas plantadas de cana poderão ser cortadas 4 vezes por ciclo de vida. Isso fará com que o processo de “Preparo do Solo” e “Plantio” aconteça uma vez a cada 4 anos em uma mesma área, reduzindo para $\frac{1}{4}^*$ o consumo de diesel dessas etapas descrito na Tabela 13.

Desta forma, a Tabela 14 representa o consumo de diesel final durante o plantio agrícola em usina de açúcar e etanol.

Tabela 15: Consumo de diesel final durante o plantio agrícola em usinas de açúcar e etanol.

Etapa	Atividade	Equipamento	litros / ha	%
Preparo do Solo*	Aração	Valtra/MF 680	12,50	6,43%
	Gradagem	Valtra/MF 680	5,83	3,00%
Plantio*	Abertura de Sulcos	Vatra BH 180	6,18	3,18%
	Transporte das Mudas	Caminhão Scania	4,55	2,34%
	Fechamento Sulcos	Vatra BH 180	2,73	1,40%
Tratos	Aplicação de Herbicidas	Jacto/Uniport 2000	0,60	0,31%
Colheita	Colheita	Case A7700	79,20	40,77%
	Armazenamento da Cana	Trator Maxion 9150	18,70	9,63%
Transporte Cana	40 km de distância	Caminhão Scania	64,00	32,94%
Total			194,28	100,00%

FONTE: Desenvolvida a partir dos dados de *Bianchini, 2007*.

Cálculo do consumo de diesel em uma usina que produz **500 m³/dia** de etanol levará em consideração os dados da Figura acima, bem como da Tabela 14.

Conforme Figura 6 serão necessários 11.400 kg de cana-de-açúcar para produzirmos 1 m³ de etanol, logo:

$$\text{Cana-de-açúcar por dia} = 11.400 \text{ kg} \times 500 \text{ m}^3 = 5.700 \text{ toneladas por dia};$$

Sabe-se que 1 hectare produz cerca de 80 toneladas de cana-de-açúcar (BIANCHINI, 2007), então:

$$\text{Área de plantio colhida diariamente (500m}^3/\text{dia}) = 5.700 \text{ ton/dia} \div 80 \text{ ton/ha} = 71,25 \text{ ha/dia}$$

O consumo médio de diesel durante o plantio agrícola apresentado na Tabela 14 é de 194,28 litros de diesel/hectare, portanto:

$$\text{Consumo diário de diesel} = 194,28 \text{ L/ha} \times 71,25 \text{ ha/dia} = 13.842,09 \text{ L/dia}$$

Para cada litro de etanol produzimos 12 litros de vinhaça, conforme indicado na Figura 6, temos:

$$\text{Vinhaça por dia} = 500 \text{ m}^3 \times 12 = 6.000 \text{ m}^3$$

A partir desses dados, elaborou-se a Figura 7 que apresenta as correntes necessárias para os balanços de massa deste estudo.

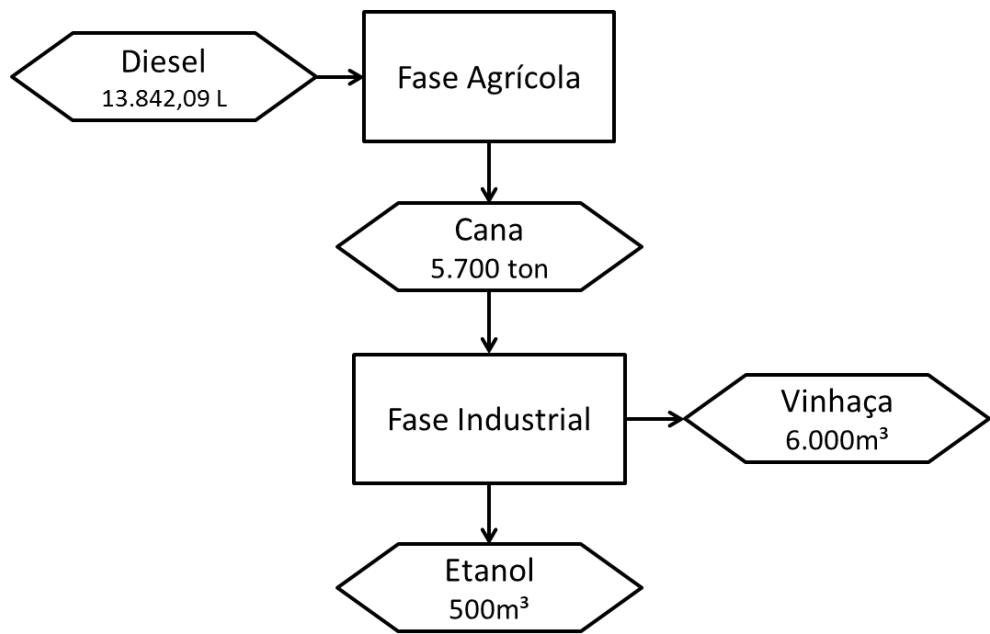


Figura 8: Operação da Usina
 FONTE: Desenvolvida a partir dos dados de *Bianchini, 2007*.

4.2 Cenário de aplicação das tecnologias apresentadas

Visto que a vinhaça serve como um importante fertilizante, a tecnologia aplicada deverá levar em consideração a aplicação agrícola. A biodigestão anaeróbica se mostrou a melhor alternativa para esta aplicação, pois conserva os sais minerais importantes para a reposição no solo.

De acordo com Medeiros et al. (2003), a aplicação racional da vinhaça *in natura* em doses de 150 m³/ha equivale a uma adubação de 61 kg/ha de nitrogênio, 40 kg/ha de fósforo, 343 kg/ha de potássio, 108 kg/ha de cálcio e 80 kg/ha de enxofre.

É muito importante ressaltar que a concentração de potássio contida na vinhaça não se altera depois do processo de biodigestão conforme apresentado na Tabela 165.

Tabela 16. Características físico-químicas da vinhaça – Usina São Martinho.

Resultado do tratamento da vinhaça

Parâmetro	Vinhaça (antes da biodigestão)	Vinhaça (depois da biodigestão)
pH	4	6,9
DQO (mg/l)	29.000	9.000
Nitrogênio total (mg/l)	550	600
Nitrogênio Ammoniacal (mg/l)	40	220
Fósforo P ₂ O ₅ (mg/l)	17	32
Sulfato (mg/l)	450	32
Potássio K ₂ O (mg/l)	1400	1400

Fonte: Cortez et al., 1998.

Portanto, no caso estudado de produção de 6.000 m³/dia de vinhaça, multiplicando este volume pelos valores das características físico-químicas da vinhaça biodigerida mostrados na Tabela 16, obtém-se os valores apresentados em massa na Tabela 16:

Tabela 17. Quantidades mássicas diárias produzidas de subprodutos.

Resultado do tratamento da vinhaça (6.000m³/dia)

Parâmetro	Vinhaça (antes da biodigestão)	Vinhaça (depois da biodigestão)
pH	4	6,9
DQO (kg)	174.000	54.000
Nitrogênio total (kg)	3.300	3.600
Nitrogênio Ammoniacal (kg)	240	1.320
Fósforo P ₂ O ₅ (kg)	102	192
Sulfato (kg)	2.700	192
Potássio K ₂ O (kg)	8.400	8.400

Fonte: Elaboração própria a partir dos dados de (Cortez et al., 1998).

Uma das vantagens da biodigestão da vinhaça é que seu potencial de fertilização continua sendo o mesmo após o processo, fazendo com que a vinhaça biodigerida possa ser levada ao campo para a fertirrigação. Por esta conservação dos nutrientes, principalmente do conteúdo de potássio, fósforo e nitrogênio, se evita a aplicação de fertilizantes minerais.

Depois da biodigestão, o volume de vinhaça continua sendo o mesmo (Poveda, 2012). A tecnologia de biodigestão poderá ser aplicada sem prejuízo aos valores nutricionais exigidos na lavoura sem perda de volume. Os sistemas de fertirrigação permanecerão os mesmos, facilitando o estudo.

Desta maneira, o cenário apresentado para este estudo é apresentado na Figura 5.

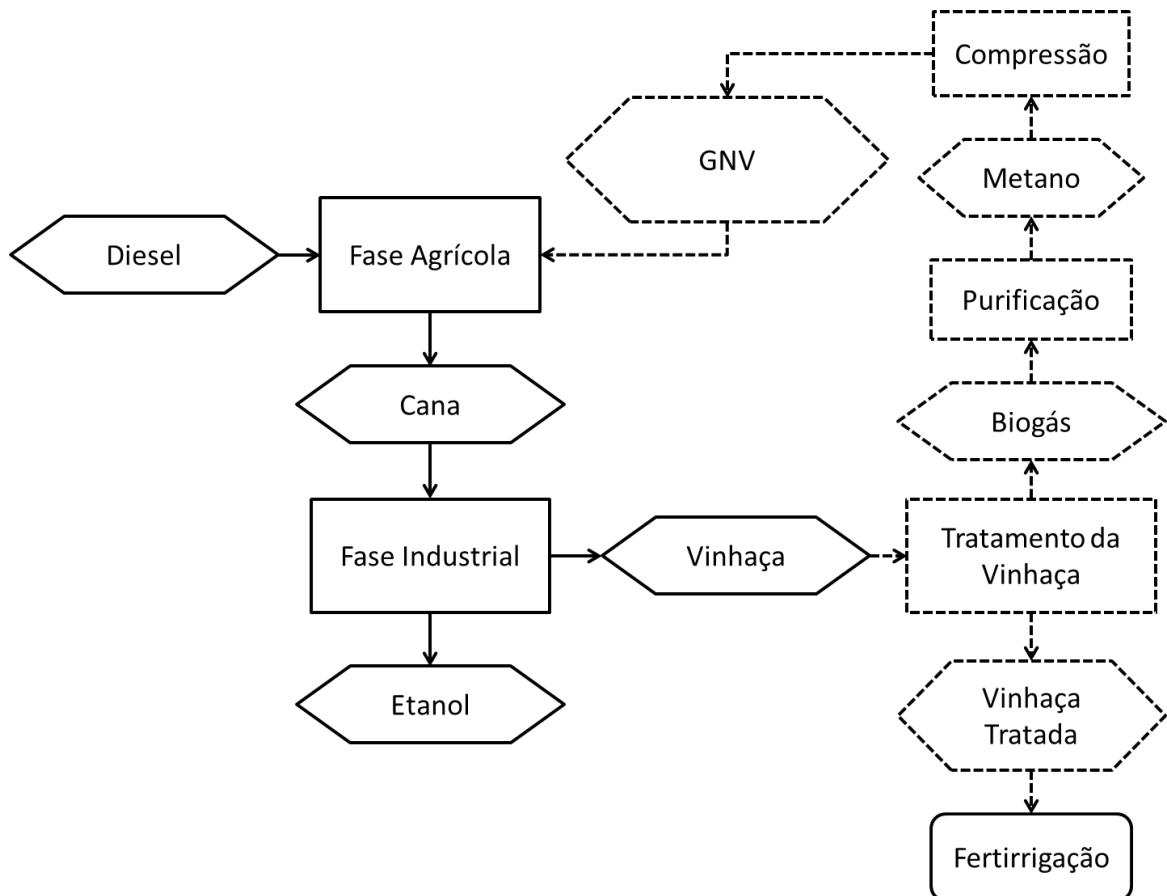


Figura 9: Operação para obtenção de GNV
FONTE: Elaboração própria.

4.3 Balanço de massa para a usina de 500 m³/dia de etanol

De acordo com os cálculos apresentados anteriormente, uma usina de 500 m³/dia de etanol produz 6.000 m³/dia de vinhaça.

Conforme apresentado na Tabela 6, o indicador de conversão de metano para vinhaça é de 14,23 m³ CH₄/m³ de vinhaça. Portanto:

$$\text{Produção de Metano} = 6.000 \text{ m}^3 \text{ de vinhaça/dia} \times 14,23 = 85.380 \text{ m}^3 \text{ de metano/dia}$$

Considerando que o biogás obtido a partir do tratamento da vinhaça possui entre 40 a 75% de metano em sua composição (Tabela 7), foi adotado para este estudo 60% de metano presente no biogás. Portanto:

$$\text{Biogás} = 85.380 \text{ m}^3 \text{ de metano} / 60\% = 142.300 \text{ m}^3 \text{ de biogás/dia}$$

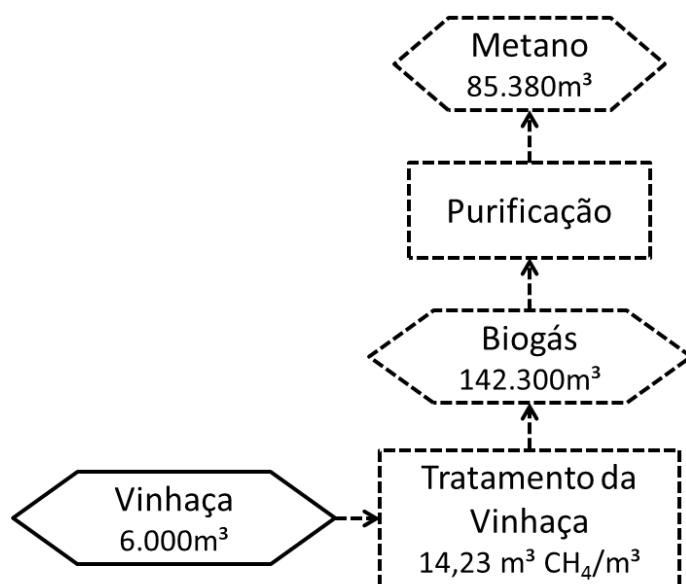


Figura 10: Balanço de massa produção de vinhaça
FONTE: Elaboração própria.

Poveda (2012) relata que o volume de vinhaça tratada é o mesmo da vinhaça sem tratamento, desta forma:

$$\text{Vinhaça Tratada} = \text{Vinhaça "in natura"} = 6.000 \text{ m}^3/\text{dia}$$

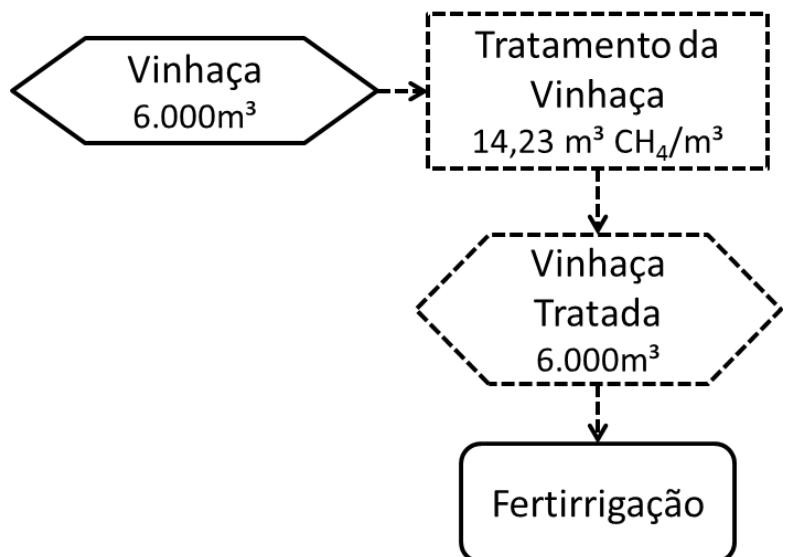


Figura 11: Balanço de massa produção de vinhaça tratada
FONTE: Elaboração própria.

Segundo a Tabela 9, 1 Nm³ de biogás é o equivalente a 0,55 L de diesel. Com isso obteve-se:

$$\text{Diesel equivalente} = 142.300 \text{ m}^3 \text{ biogás} * 0,55 \text{ L Diesel/m}^3 \text{ biogás} = 78.265 \text{ L diesel}$$

Observa-se na Figura 11 que o consumo de diesel para a produção de 500m³ de etanol é de 13.842,09 L por dia. O Biogás proveniente da vinhaça teria condições energéticas de substituir por completo o diesel utilizado nas usinas.

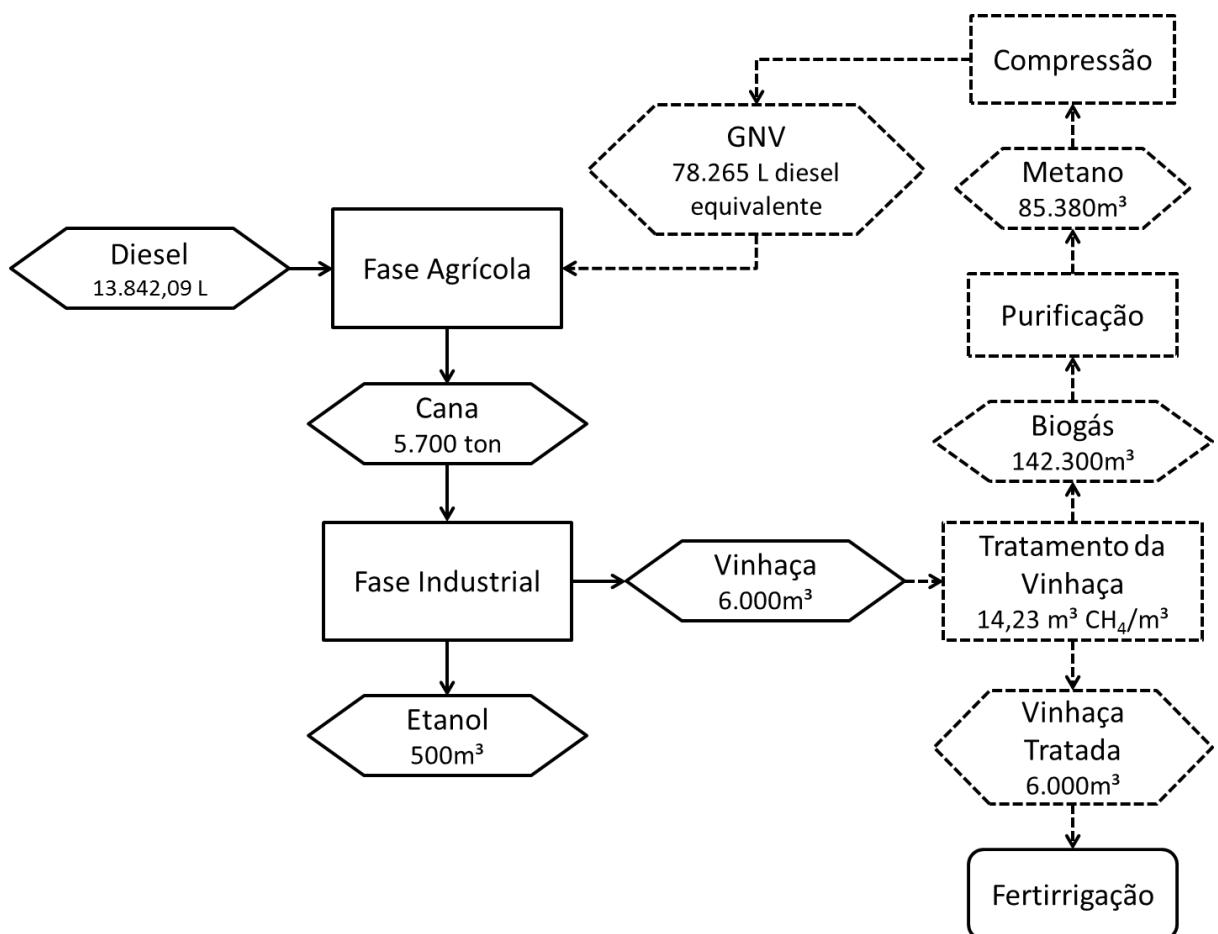


Figura 12: Balanço de massa geral do processo de obtenção de GNV e vinhaça tratada

FONTE: Elaboração própria.

4.4 Substituição do diesel pelo GNV

A utilização do combustível fóssil, além de ser um combustível não renovável, é um custo considerável para as usinas. Ao renovar a frota de caminhões, uma usina que optar por comprar caminhões flex deverá dar preferência para substituição dos caminhões (consumo de 35,28% do diesel) e colheitadeiras (consumo de 40,77% do diesel) que juntos representam 76,05% de diesel consumido.

O GNV a partir de vinhaça pode substituir aproximadamente 78.256 L de óleo diesel. Há um excedente de biogás que poderá servir a outras finalidades que não o veicular.

Pode-se verificar que utilizando a tecnologia GNV+Diesel nos 2 grandes consumidores de combustível, o consumo passa de 194,28 L/ha para 83,46 L/há, uma economia de 57,04% ou 7895 L de diesel por dia.

Tabela 18. Economia de diesel estimado.

Etapa	Atividade	Equipamento	Atual		Estudo de caso	
			litros / ha	%	litros / ha	%
Preparo do Solo*	Aração	Valtra/MF 680	12,50	6,43%	12,50	14,98%
	Gradagem	Valtra/MF 680	5,83	3,00%	5,83	6,98%
Plantio*	Abertura de Sulcos	Vatra BH 180	6,18	3,18%	6,18	7,40%
	Transporte das Mudas	Caminhão Scania	4,55	2,34%	1,14	1,36%
	Fechamento Sulcos	Vatra BH 180	2,73	1,40%	2,73	3,26%
Tratos	Aplicação de Herbicidas	Jacto/Uniport 2000	0,60	0,31%	0,60	0,72%
Colheita	Colheita	Case A7700	79,20	40,77%	19,80	23,72%
	Armazenamento da Cana	Trator Maxion 9150	18,70	9,63%	18,70	22,41%
Transporte Cana	40 km de distância	Caminhão Scania	64,00	32,94%	16,00	19,17%
Total			194,28	100,00%	83,46	100,00%

FONTE: Elaboração própria.

4.5 Dificuldades de implantação

Verificou-se neste trabalho que a biodigestão da vinhaça e o aproveitamento do biogás é uma opção interessante sob o ponto de vista técnico para substituir o óleo diesel em usinas.

Entretanto, um dos problemas existentes é em relação ao uso de antibióticos na produção de álcool. Os antibióticos são utilizados para conter fermentação de bactérias no mosto fermentativo, melhorando a eficiência do processo da usina de etanol. Resíduos dessas moléculas são carregados com a vinhaça que deve ser tratada em biodigestores. Estes equipamentos possuem bactérias, sensíveis a antibióticos, como micro-organismo produtor de biogás. Uma das maneiras de evitar a perda de bactérias nos reatores anaeróbios é o aumento de temperatura. O problema é que a maioria dessas moléculas é termoestável. Isso será um sério problema se os procedimentos industriais na fabricação do etanol não forem

modificados ou não estiverem em sintonia com a etapa de tratamento da vinhaça e produção do biogás.

Além disso, o uso de antibióticos gera uma barreira comercial para a exportação de bioetanol e leveduras (vendidas como ração animal), pois países que são potenciais importadores da União Europeia na aceitam o uso destes agentes na fabricação.

Resolvidos os problemas fermentativos, deve-se solucionar os problemas mecânicos. Motores e kits para possibilitar o uso de flex dos veículos são importantíssimos. O principal empecilho encontrado é a perda da garantia original (ANFAVEA, 2013) dos motores transformados em flex GNV+Diesel. Muitas vezes isso é contornado com uma garantia da concessionária que instalou o kit.

Montadoras como a Volvo disponibilizam motores desenvolvidos para a tecnologia GNV+Diesel e conta com as garantias de fábrica. O ganho de eficiência desses motores concebidos para funcionar com GNV e diesel tem aumentado muito e isso tende a viabilizar cada vez mais a substituição do diesel pelo biogás.

5. Conclusão

As crescentes restrições ambientais ao lançamento de vinhaça bem como questões relacionadas à segurança energética e o interesse em promover as fontes renováveis de energia, têm contribuído para a crescente utilização dos processos de digestão anaeróbica e o aproveitamento energético do biogás resultante desses processos.

O biogás produzido pode ser utilizado em praticamente todas as aplicações desenvolvidas para o gás natural, como a produção de calor e/ou eletricidade e o uso como combustível veicular, sendo necessários diferentes níveis de tratamento do biogás de acordo com a aplicação pretendida.

O melhor conhecimento dos sistemas de biodigestão, de limpeza e compressão do biogás e de combustão GNV+Diesel, discutidos neste trabalho,

demonstram a possibilidade e o desenvolvimento de diversos ramos da indústria capazes de produzir equipamento para a utilização do GNV como uma alternativa ao combustível fóssil.

Os avanços tecnológicos fazem com que o biogás da vinhaça tenha boa perspectiva para substituir combustíveis fósseis utilizados no setor sucroalcooleiro. O GNV a partir de vinhaça pode substituir aproximadamente 78.256 L de óleo diesel por dia, muito mais que os 13.842,09 L de diesel consumidos diariamente por uma usina que produz 500 m³ de etanol. Este excedente pode ser utilizado na própria usina ou se tornará mais um produto do setor, que hoje produz açúcar etanol e energia.

Dentre as barreiras discutidas neste trabalho, destaca-se a perda de garantia original dos motores quando instalados os kits de conversão. Barreira que pode ser solucionada conforme a demanda por esta tecnologia for aumentando e uma regulamentação seja feita para incentivar o uso do biogás.

É sugestão e complementação a este estudo, a análise de viabilidade econômica e também a análise mais criteriosa dos impactos sociais e ambientais da substituição do diesel pelo biogás proveniente do tratamento da vinhaça.

Finalmente, o estímulo à entrada de novos agentes e tecnologias, especialmente a indústria nacional com conhecimento das tecnologias, também pode ser uma alternativa para viabilizar os projetos de aproveitamento do biogás.

6. Bibliografia

ANFAVEA – Relatório anual 2013, disponível em <www.anfavea.com.br>, Acessado em 20 jun. 2013.

BIANCHINI, U. L., **Análise do Ciclo de Vida do Álcool Hidratado produzido na Usina São Luiz localizada no município de Ourinhos – SP**, Monografia: UFSC, 2007.

BIOPAQ® UASB, disponível em: <<http://paques.hscglab.nl/?pid=43>>, acessado em 03/05/2012

BOSCH 2013, disponível em: < www.bosch-career.com/pt/br/>, acessado em 20 jun.2013.

COELHO, S.T., V, S.M.S.G., MARTINS, O.S., COSTA, D.F., BASAGLIA, F., BACIC, A.C. K., “**Instalação e Testes de uma Unidade de Demonstração de Geração de Energia Elétrica a partir de Biogás de Tratamento de Esgoto**”, UNICAMP. Anais em CD-ROM do AgrenerGD. Campinas. 2004

FISHER, E.; Imar, S., Schmidt, T., Stur, M., **Technical-Biological Assessment os Concepts for Anaerobic Digestion os Vinasse in Brazil**, DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH, 2013

IEA, 2006. **Renewables Information 2006**. Paris, IEA.

KAPDI, S.S; VIJAY, V.K; RAJESH, S.K; PRASAD R., 2005, “Biogas scrubbing, compression and storage: perspective and prospectus in Indian context”. **Renewable Energy**, v. 30, pp. 1195–1202

METCALF & EDDY. INC., 2003. **Wastewater Engineering treatment Disposal Reuse.** 4. ed. New York, McGraw - Hill Book, 1815p.

MUTOMBO, T. D. (2004). **Internal circulation reactor: pushing the limits of anaerobic industrial effluents treatment technologies**, Proceedings of the Water Institute of Southern Africa (WISA) Biennial Conference, Cape Town, South Africa, 2004.

POVEDA, M. M. R., 2012, **Sustentabilidade da Biodigestão vesus Combustão para o Tratamento da Vinhaça**. Monografia de Especialização, USP, Piracicaba, SP, Brasil.

SALOMON, K., R., **Avaliação Técnico-Econômica e Ambiental da Utilização do Biogás Proveniente da Biodigestão da Vinhaça em Tecnologias para Geração de Eletricidade**, Itajubá, 219 p. Tese de Doutorado (Doutorado em Conversão de Energia) - Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, 2007.

STARK, T. D., CHOI, H., **Methane gas migration through geomembranes**, Geosynth. Int. 12 (2005) 120–125.

UNICA 2011, Key Numbers of the Brazilian Sugarcane Industry - 2010/2011 Harvest. UNICA.

UNICA 2005, disponível em <www.unica.com.br>, Acessado em 20 jun. 2013.

VEOLIA 2013, disponível em <www.veoliawaterst.com/biobed_advanced/en/> acessado 26 de jul. 2013.

VOLVO 2013, disponível em <www.volvotrucks.com/trucks/global/en-gb/trucks/new-trucks/Pages/volvo-fm-methanediesel.aspx> , acessado em 20 jul. 2013.

ZANETTE, A. L., 2009, **Potencial de aproveitamento energético do biogás do Brasil**. Dissertação de mestrado, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.