

MARCELO AKIRA MIZUTANI

**ANALISE TÉCNICA E ECONÔMICA DO USO DA VINHAÇA PARA A
PRODUÇÃO DE BIOGÁS**

Monografia apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Especialista em Energias Renováveis,
Geração Distribuída e Eficiência
Energética.

**São Paulo
2017**

FICHA CATALOGRÁFICA

Mizutani, Marcelo Akira

**Análise técnica e econômica do uso da vinhaça para a produção de biogás / M.A. Mizutani. – São Paulo, 2017.
87 p.**

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

**1.Energias renováveis 2.Usinas 3.Setor sucroenergético
4. Etanol 5. Vinhaça 6. Biogás I. Universidade de São Paulo.
Escola Politécnica. Programa de Educação Continuada em
Engenharia II.t.**

AGRADECIMENTOS

Deve-se primeiramente agradecer a Deus pela oportunidade de buscar novos conhecimentos e desafios.

Agradecer em especial minha família que sempre incentivou os estudos e não mediu esforços para me motivar e apoiar. Deixo registrados os nomes da Maurício T. Mizutani (pai), Celina Mizutani (mãe), Maurício M. Mizutani (irmão) e Carolina Iguchi (noiva).

Aos meus amigos que residem em São Paulo que me ofereceram hospedagem, alimentação, companheirismo, paciência e alegria. (Leonardo Guissoni, Igor Moraes, Luiz Augusto Zafallon e José Cláudio Jambassi Filho). E aos meus amigos de trabalho (Guilherme Albino, Felipe Caires, Ronaldo Rodrigues, Guilherme Prado).

A empresa São Martinho que investiu na bolsa de estudos, no aprendizado, na oportunidade e confiança.

Aos professores e funcionários do PECE.

Meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

Frente aos novos desafios para as energias renováveis que o país terá para atendimento ao compromisso voluntário assumido no acordo de Paris em 2015, o presente trabalho vem apresentar alternativas técnicas e econômicas para o setor sucroenergético no reaproveitamento do subproduto da cana-de-açúcar para a produção de biocombustíveis: o caso do biogás de vinhaça em uma planta piloto instalada na região de Piracicaba/SP.

Devido à tendência de políticas públicas para a implantação de plano e programas, o setor sucroenergético terá grandes oportunidades em manter sua cadeia de produção cada vez mais autossustentável e agregar valores em seus produtos e subprodutos. Este aproveitamento começou com o reaproveitamento do bagaço de cana para geração de energia, o uso da torta de filtro para enriquecimento do solo agrícola e a utilização da vinhaça na fertirrigação. Hoje em dia, durante o período de safra, as usinas de cana-de-açúcar são autossuficientes para a produção e uso de energia. Atualmente as usinas - para produzir um litro de etanol - geram de 8 a 15 litros de vinhaça. A vinhaça, que é um subproduto proveniente da produção de etanol, convencionalmente usada na fertirrigação no cultivo da cana-de-açúcar é rico em água, matéria orgânica e sais minerais.

Devido ao alto teor de matéria orgânica presente na vinhaça, algumas usinas do setor sucroenergético vêm buscando alternativas para agregar valor a este subproduto, porém ainda são poucos casos, que reaproveitam esta matéria orgânica em reatores para a biodigestão e produção do biogás. No presente trabalho foi avaliada a produção de biogás a partir de uma planta piloto e seus resultados foram satisfatórios como demonstrado nos Capítulos posteriores.

O uso do biogás ainda é um desafio para o setor. Dentre as possibilidades, pode-se destacar o uso biogás em produção de energia elétrica, injeção do biogás na rede de gás natural e substituição do diesel na frota de caminhões.

Palavra chave: Energias renováveis, usina de cana-de-açúcar, setor sucroenergético, etanol, vinhaça, biogás.

ABSTRACT

Considering the new challenges for renewable energy the country faces to meet the voluntary commitment assumed in Paris Agreement in 2015, this work aims to present the use of by-product of sugar cane for biofuels production: the case of biogas in a pilot plant installed in the region of Piracicaba/SP.

Due to the trend of public policies to implement plans and programs (RenovaBio) on biofuels, the sugar and ethanol sector will have a great opportunity to increase its self-sustainable production chain and to add value to its products and by-products.

This process has begun with the reuse of sugarcane bagasse for energy generation, or the use of filter cake for agricultural soil enrichment, as well as vinasse utilization for fertirrigation. Nowadays, during the harvesting period, sugar-cane mills are self-sufficient for energy production and use.

Currently sugarcane mills - to produce 1 (one) liter of ethanol - generate from 8 to 15 liters of vinasse. Vinasse is an industrial effluent rich in water, organic matter and mineral salts, which is conventionally used in sugarcane crops for fertirrigation.

Due to the vinasse-high content of organic matter, the sugar-energy sector has been looking for alternatives to add value to this by-product, reusing this organic matter in reactors for biodigestion and biogas production. In the present work the biogas production from a pilot plant was evaluated and its results were satisfactory as demonstrated in the later Chapters.

The biogas, for (some) large groups in the sugar-energy sector, is already a reality, such as industrial installations / pilot plants in operation producing biogas. In addition, the use of biogas is still a challenge for the industry. End-uses are several, and among them we can highlight the use of biogas in Otto cycle engines, biogas injection in the natural gas network and diesel replacement of the truck fleet.

Keyword: Renewable energies, mill, sector Sugarcane industry, ethanol, vinasse, biogas.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - Rotas tecnológicas para produção de etanol.....	24
Figura 2.2 - Digestão anaeróbia da matéria orgânica.	30
Figura 3.1 - Vista aérea da Usina	58
Figura 3.2 - Fluxograma de processo da vinhaça e biogás	59
Figura 3.3 - Fluxograma do biodigestor de leite expandido de alta taxa.....	60
Figura 3.4 - Foto do biodigestor piloto implantando.....	62
Figura 4.1 - Relação do preço da eletricidade e do CER para uma TIR=21%	73
Figura 4.2 - Relação do preço da eletricidade e do CER para uma TIR=21%	76
Figura 5.1 - Rede de concessão do gás natural no estado de São Paulo	80

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 4.1 - Características médias da vinhaça – safra 16/17.....	65
Gráfico 4.2 - Características médias da vinhaça – safra 17/18.....	65
Gráfico 4.3 - Produção de biogás vs entrada de vinhaça – safra 16/17	66
Gráfico 4.4 - Produção de biogás vs entrada de vinhaça – safra 17/18	67
Gráfico 4.5 - Características do Biogás (CO ₂ e H ₂ S) – safra 16/17	68
Gráfico 4.6 - Características do Biogás (CO ₂ e H ₂ S) – safra 17/18	68
Gráfico 4.7 - Utilização de insumos no reator – safra 16/17	69
Gráfico 4.8 - Utilização de insumos no reator – safra 17/18	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Características composicionais de vinhaças de cana-de-açúcar....	26
Tabela 2.2 - Potenciais impactos adversos da fertirrigação com vinhaça.....	27
Tabela 2.3 - Taxa de depolimerização de biopolímeros (mesofílico)	31
Tabela 2.4 - Reações que ocorrem na fase metanogênica.....	33
Tabela 2.5 - Reações importantes nos processos anaeróbios	35
Tabela 2.6 - Gerações de Reatores Anaeróbios.....	42
Tabela 2.7 - Composição média do biogás de diferentes resíduos orgânicos	43
Tabela 2.8 - PCI de diferentes gases.....	44
Tabela 2.9 - Equivalência entre 1 Nm ³ de Biogás e outras fontes energéticas...	45
Tabela 2.10 – Práticas utilizadas para purificação do Biogás	47
Tabela 2.11 - Sistemas de armazenamento de biogás.....	47
Tabela 2.12 - Técnicas de remoção de impurezas do biogás.....	48
Tabela 2.13 – Qualidade do biogás, concentração limite de contaminantes	50
Tabela 2.14 –Sistema de pré-tratamento para uso comercial.....	51
Tabela 2.15 - Desempenho da célula combustível com potência de 200 kW	52
Tabela 2.16 - Emissões estimadas de células combustíveis	52
Tabela 4.1 – Custos no cenário 1	71
Tabela 4.2 – Indicadores financeiros do investimento no cenário 1.....	72
Tabela 4.3 – Custo de produção da eletr. gerada com biogás de vinhaça	72
Tabela 4.4 – Variação em função do preço da eletricidade e das CERs.	74
Tabela 4.5 - Custos (instalação e O&M) referentes a uma planta de biodigestão e upgrade de biogas	75
Tabela 4.6 –Custo de produção de biometano correspondendo a um litro de diesel equivalente	75
Tabela 4.7 – Variação em função do preço do diesel e do CER.....	77

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

BNDES - Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social

CENBIO - Centro Nacional de Referência em Biomassa (atualmente GBIO – Grupo de Pesquisa em Bioenergia/IEE/USP)

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

CGEE - Centro de Gestão e Estudos Estratégicos

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente

COP 21 - Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas

DQO – Demanda Química de Oxigênio

EPE - Empresa de Pesquisa Energética

GEE – Gases do Efeito Estufa

LCFA - Biosorção dos ácidos graxos de cadeia longa

MDL – Mecanismo de Desenvolvimento Limpo

MME – Ministério de Minas e Energia

PCI – Poder Calorífero Inferior

Proálcool – Programa Nacional do Álcool

REN 21 - Renewable Energy Policy Network for the 21st Century

TIR - Taxa Interna de Retorno

TMA - Taxa Mínima de Atratividade

UASB - Upflow anaerobic sludge blanket reactor (Reator anaeróbio de lodo de fluxo ascendente)

UNICA - União da Indústria de Cana-de-Açúcar

VPL - Valor Presente Líquido

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1 APRESENTAÇÃO	13
1.2. OBJETIVO	15
1.3. JUSTIFICATIVAS	16
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	17
2.1. DESAFIOS RELACIONADOS À PRODUÇÃO DE ENERGIA	17
2.1.1 Energias renováveis e alternativas.....	18
2.2. HISTÓRIA DA CANA-DE-AÇÚCAR NO BRASIL	19
2.2.1 Proálcool	20
2.2.2 RenovaBio – Um novo programa.....	21
2.3. SETOR SUCROENERGÉTICO NO BRASIL.....	23
2.4. VINHAÇA: ASPECTOS QUALITATIVOS E QUANTITATIVOS	25
2.5. ESTADO DA ARTE DA BIODIGESTÃO ANAERÓBICA	28
2.5.1 Microbiologia e bioquímica da digestão anaeróbia	29
2.5.1.1 Hidrólise	30
2.5.1.2 Acidogênese	31
2.5.1.3 Acetogênese	32
2.5.1.4 Metanogênese	32
2.5.1.5 Redução de Sulfato.....	33
2.5.2 Termodinâmica da digestão anaeróbia.....	34
2.5.3 Fatores que influenciam a atividade anaeróbia	35
2.5.3.1 Influência da Temperatura	35
2.5.3.2 Influência do pH	36

2.5.3.3	<i>Necessidades nutricionais</i>	38
2.5.3.4	<i>Toxicidade a digestão anaeróbia</i>	38
2.5.3.5	<i>Toxicidade por compostos orgânicos</i>	39
2.5.3.6	<i>Toxicidade por amônia</i>	39
2.5.3.7	<i>Toxicidade por sulfato e sulfeto</i>	40
2.5.3.8	<i>Toxicidade por metais pesados</i>	40
2.5.3.9	<i>Tempo de Retenção</i>	41
2.5.3.10	<i>Impermeabilidade ao Ar</i>	42
2.5.4	Reatores anaeróbios	42
2.6	O BIOGÁS	43
2.6.1	Limpeza do Biogás	46
2.6.2	Compressão e Armazenamento do Biogás	47
2.6.3	Medidas de Segurança para Utilização do Biogás	48
2.6.4	Qualidade do Biogás	49
2.7.	TECNOLOGIA DE CONVERSÃO ENERGÉTICA DE BIOGÁS	52
2.8.	VIABILIDADE ECONÔMICA	54
2.8.1	Demonstração de Fluxo de Caixa (DFC)	55
2.8.2	Valor Presente Líquido (VPL)	55
2.8.3	Taxa Interna de Retorno (TIR)	56
2.8.4	Cálculo do <i>Payback</i> Descontado	57
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	58
3.1.	OBJETO DE ESTUDO	58
3.2	PRODUÇÃO DE BIOGÁS – PLANTA PILOTO	59
3.2.1	Informações técnicas do reator anaeróbico	59
3.2.2	Informações técnicas do dessulfurizador	62
3.3	LEVANTAMENTO DE DADOS DA PRODUÇÃO DO BIOGÁS	63

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	64
4.1. PRODUÇÃO DE BIOGÁS PLANTA PILOTO	64
4.2 VIABILIDADE ECONÔMICA DA PRODUÇÃO E USO DO BIOGÁS.....	69
4.2.1. Cenário 1: Biodigestão com geração de eletricidade	71
4.2.2. Cenário 2: Biodigestão e uso veicular	74
5. CONCLUSÃO.....	78
6. REFERÊNCIAS	82

1. INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

Nos últimos anos, a temática sobre geração de energias renováveis vem ganhando espaço na discussão sobre a reestruturação da matriz energética, principalmente tendo em vista os impactos ambientais negativos oriundos do uso e exploração dos combustíveis fósseis, a instabilidade do preço internacional do petróleo e acordos internacionais firmados pelo Governo Federal.

Ademais, o Brasil há muitos anos se destaca no cenário mundial, atualmente como o segundo principal produtor de álcool combustível (etanol), e o primeiro a partir da cana-de-açúcar, uma energia limpa, renovável e economicamente viável.

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2016) o Brasil produziu em 2016 cerca de 30 bilhões de litros de etanol por ano, derivado da cana-de-açúcar. Para cada litro de etanol são gerados de 8 a 15 litros de efluente que é denominado vinhaça. A vinhaça é constituída principalmente de matéria orgânica, água e sais, resultante da destilação do vinho, que é produto da fermentação do caldo da cana-de-açúcar ou melaço no processo de fabricação do álcool.

A aplicação desse efluente diretamente na lavoura “in natura” é denominada fertirrigação, a qual oferece em curto prazo uma solução para a disposição desse efluente. Em outros países, como o caso dos Estados Unidos, maior produtor de álcool combustível que produz o álcool a partir do milho, devido a sua etapa específica de produção, o processo não gera a vinhaça como efluente. Enquanto isso, na África, a vinhaça proveniente das usinas de cana-de-açúcar, não é utilizada para fertirrigação, possivelmente este efluente é lançado diretamente em corpos d’água.

Para as usinas do Estado de São Paulo a fertirrigação é regulamentada através de uma norma de procedimento emitida pelo órgão ambiental fiscalizador CETESB – Norma P.4231/2015 para que os critérios e procedimentos do uso da

vinhaça sejam cumpridos. Anualmente, antes do início de cada safra¹, é necessário à apresentação do “Plano de aplicação de vinhaça” na agência fiscalizadora da CETESB correspondente à unidade produtiva.

A utilização da vinhaça através da fertirrigação é uma tecnologia que visa à utilização de forma racional dos recursos naturais, pois, ao mesmo tempo em que impede que ela seja descartada recursos hídricos, possibilita a fertilização dos solos agricultáveis, além da redução nos custos das atividades agrícolas. Trabalhos vêm sendo desenvolvidos pela UNICA e demonstram que os benefícios oriundos do uso agrícola da vinhaça são indiscutíveis, tanto do ponto de vista agrônomo e econômico, quanto social (desde que utilizada conforme os procedimentos regulamentados pelo órgão ambiental).

O aumento da produtividade, que ocorre com mais intensidade em solos mais pobres e em regiões mais secas, como também a economia de fertilizantes, como o caso do potássio, são benefícios imediatos decorrentes do uso racional desse efluente nas lavouras canavieiras. Entretanto, há controvérsias sobre impactos ambientais causados pelo manejo inadequado da vinhaça. Neste sentido sabe-se que a aplicação sem critérios de dosagem da vinhaça ao solo pode causar um desequilíbrio de nutrientes, gerando resultados diferentes daqueles esperados.

A vinhaça possui alto teor de potássio e matéria orgânica e a aplicabilidade deste efluente na produção de biogás vem sendo avaliada. Algumas usinas do setor sucroenergético já possuem estudos para avaliar as tecnologias e modelos para verificar a capacidade de produção de biogás a partir da vinhaça, porém os estudos são poucos divulgados. A dificuldade na viabilidade técnica e econômica do uso da vinhaça é devido ao dimensionamento das plantas, pois devido ao porte da usina, grandes reatores são necessários para produção do biogás em escala industrial. O que se sabe atualmente sobre a relação entre a vinhaça e o biogás é que, por suas características, a vinhaça se mostra um promissor substrato orgânico para o processo de biodigestão anaeróbia, apresentando algumas deficiências de nutrientes como nitrogênio, fósforo e pH mais baixo, porém algumas técnicas operacionais, como a correção de pH, adição de nutrientes, controle de temperatura e o uso do reciclo poderão contribuir significativamente para o melhor rendimento do

¹ Safra: Período em que ocorre a moagem da cana-de-açúcar – geralmente este período é de abril a novembro.

processo anaeróbio, tornando-o uma tecnologia limpa num conceito de desenvolvimento sustentável.

Destaca-se o fato de que, no sistema de produção de etanol, o biogás poderá contribuir diretamente no balanço energético da matriz brasileira oferecendo energia elétrica e/ou térmica, ou até mesmo a substituição do próprio diesel e o biofertilizante (vinhaça biodigerida) não perderá algumas de suas principais características, principalmente o teor de potássio, com melhorias no pH. Dessa forma o efluente, após passar pelo processo de biodigestão anaeróbia, irá produzir um biofertilizante a ser usado no processo de fertirrigação já existente.

1.2. OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a viabilidade técnica e econômica no uso da vinhaça para a produção de biogás em usinas de cana-de-açúcar produtora de etanol do Estado de São Paulo. Dentre as possibilidades existentes no trabalho serão avaliadas a produção biogás em uma planta piloto situada na região de Piracicaba/SP e os resultados obtidos a partir da biodigestão da vinhaça. Dentre as alternativas será avaliada a possibilidade de queima do biogás para produção de energia, interligação na rede de gás natural e também a viabilidade da substituição do combustível utilizada na frota de caminhões que transportam a cana-de-açúcar para a unidade industrial.

Objetivos específicos:

- Analisar os resultados de produção do biogás de uma planta piloto a partir da vinhaça proveniente do processo de destilação do etanol;
- Avaliar técnica e economicamente a possibilidade de utilização do biogás/biometano.

1.3. JUSTIFICATIVAS

A escolha do trabalho foi devido à oportunidade que o Brasil possui atualmente para avançar no desenvolvimento de políticas públicas dos biocombustíveis com base no compromisso voluntário assumido na COP 21 em Paris (UNICA, 2017).

Tendendo-se a desenvolver planos e programas federais (RenovaBio) o setor sucroenergético terá oportunidades em desenvolver novas tecnologias e buscar otimizar sua cadeia de produção.

O trabalho também apresenta as oportunidades da reutilização de um subproduto da produção de etanol de forma que agregue valor a seus efluentes, como é o caso da vinhaça. Por último, o trabalho irá avaliar economicamente o uso do biogás proveniente da biodigestão da vinhaça, comparando os diversos usos finais.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. DESAFIOS RELACIONADOS À PRODUÇÃO DE ENERGIA

Há mais de 50 mil anos, o fogo foi utilizado pela primeira vez pelo homem como fonte de energia. Entre os anos de 10.000 e 5.000 AC ocorreu a Revolução Neolítica, na qual se caracterizou pela domesticação de animais que passaram a servir como fonte de energia. Nesse mesmo período, o homem aprendeu a cultivar e com a agricultura surgiu a possibilidade de uso da biomassa como energia. Por volta de 2.000 AC, a navegação começou a usar a força do vento e em torno do século II AC, o homem utilizou da força hidráulica, passando a fazer o aproveitamento da água como fonte energética para mover moinhos.

A partir do ano 1.000 DC deu-se o início à exploração mais intenso do carvão mineral e, com a Revolução Industrial em 1850, surgem grandes inovações, como a invenção da máquina a vapor. Nos séculos XIX e XX verificou-se o aparecimento e o desenvolvimento dos processos de geração de eletricidade, bem como dos motores de combustão interna a gasolina e demais derivados do petróleo. O petróleo passou então a imperar por todo o mundo como a principal fonte energética e a economia mundial encontra-se hoje moldada à comercialização dos combustíveis fósseis, com suas desigualdades de acesso à energia, insegurança no abastecimento e elevados impactos ambientais.

Um dos maiores desafios da humanidade é descobrir o caminho para reestruturar seu modo de produção e consumo da energia, de maneira que não seja autodestrutivo e que não degrade o meio ambiente. A questão sobre a substituição de um modelo de geração de energia “sujo”, baseado no petróleo, por um modelo “limpo”, baseado em fontes de origem renovável, é de suma importância. Hoje, é indiscutível que o progresso industrial e o desenvolvimento sustentável, assim como a preservação do planeta, dependem da descoberta e utilização de novas alternativas de energia.

Neste contexto, em todo o mundo se desenvolvem pesquisas e ocorrem investimentos nas inúmeras possibilidades de utilização em larga escala de fontes renováveis e com menores impactos ambientais e sociais, como a energia eólica, a energia fotovoltaica, a energia da biomassa, entre outras fontes. Espera-se, assim, que num futuro próximo possam coexistir várias fontes de energia renováveis e pouco poluentes, o que determinará um quadro econômico global completamente diferente daquele em que vivemos nos últimos 100 anos, com total hegemonia e dependência do petróleo. Nos últimos cinquenta anos, não houve uma só década em que não ocorressem crises de petróleo na economia mundial, influenciando o mercado financeiro em todos e variados sentidos (Ramos 2004).

Segundo dados do relatório síntese do EPE (2017), no Brasil, diferente do mundo, pode ser observado que a matriz energética nacional é diversificada, tendo 43,5% dela proporcionada por fontes renováveis, como, por exemplo, a biomassa e hidrelétrica. A diversificação demonstra que o Brasil está inserido neste novo cenário de mudanças e discussões sobre o clima e o desenvolvimento sustentável, já que busca alternativas à importação, extração e uso em larga escala de energias não renováveis, como o petróleo, gás natural e carvão. Investimentos em produção de biocombustíveis a partir da cana-de-açúcar e na construção de usinas hidrelétricas, principalmente, na região Norte, trazem o Brasil para um patamar de um dos países com matriz energética mais limpa do mundo.

2.1.1 Energias renováveis e alternativas

Energia alternativa e energia renovável são duas expressões utilizadas frequentemente. Embora muitas vezes esses termos sejam adotados como sinônimos existem uma diferença básica entre eles. Para tanto existe a necessidade da definição de ambos para esclarecimentos, principalmente o que significam esses termos dentro da lógica da sustentabilidade. Energia alternativa, em termos gerais, é toda e qualquer fonte energética que pode ser adotada como uma substituta a uma fonte convencional. Tratando-se do panorama nacional e mundial, a preocupação com fontes alternativas ocorreu após a crise energética oriunda da variação – e consequente vulnerabilidade - do preço do petróleo (Silva et al., 2013)

Uma energia, para ser considerada renovável, precisa ter origem em fontes naturais que tenham a capacidade de regeneração a curto e médio prazo, o que não é o caso dos combustíveis fósseis. Exemplos de fontes de energia que combinam os dois conceitos, alternativa e renovável, são a energia eólica, a energia solar fotovoltaica e a energia da biomassa. Comparativamente, a exploração dessas fontes energéticas traria um menor prejuízo ao meio ambiente (Rocha, 2012).

2.2. HISTÓRIA DA CANA-DE-AÇÚCAR NO BRASIL

Segundo Boris (1995) não se conhece a data em que os portugueses introduziram a cana-de-açúcar no Brasil. Foi nas décadas de 1530 e 1540 que a produção se estabeleceu em bases sólidas. Em sua expedição de 1532, Martim Afonso trouxe um perito na manufatura do açúcar, bem como portugueses, italianos e flamengos com experiência na atividade açucareira da Ilha da Madeira. Plantou-se cana e construíram-se engenhos em todas as capitanias hereditárias existentes, desde São Vicente até Pernambuco.

Figueiredo (2008) comenta que Martim Afonso de Souza trouxe mudas de cana-de-açúcar para o Brasil, na capitania de São Vicente, São Paulo, onde alcançou prosperidade nos primeiros anos de exploração dessa cultura. Favorecido pela política de colonização de Dom João III que tinha a finalidade de estimular a ocupação do território brasileiro garantindo assim a manutenção de seus limites territoriais nas Américas, a cana-de-açúcar expandiu-se rapidamente para outras regiões da costa brasileira. Bahia, Piauí, Alagoas, Paraíba, Pernambuco são exemplos claros dessa expansão com finalidades tanto políticas quanto econômica.

A região de Pernambuco é considerada como uma das regiões que mais retratavam o ambiente instável e de sucessivas mudanças que prevalecia sobre o Brasil Colônia nesse momento, principalmente pela ocupação holandesa nesse território. De acordo com Andrade (1965), apud Figueiredo (2008), essa ocupação foi motivada pelo bloqueio estabelecido por Felipe II, governante da Espanha e de Portugal na época e ao comércio do açúcar produzido em seus territórios por parte dos comerciantes holandeses e ingleses - que já vinham realizando essa atividade

por décadas. Decididos a não perder os lucros da comercialização do açúcar, os holandeses resolveram apoderar-se da área produtora em 1630, permanecendo até 1654.

Expulsos do Brasil pela Coroa Portuguesa, os holandeses abriram novas frentes de cultivo de fabricação do açúcar (Caribe e Antilhas) que, segundo Junqueira e Dantas (1964), apud Figueiredo (2008), aliado à descoberta de outro na região de Minas Gerais, acarretaram na perda do monopólio do açúcar brasileiro no mercado europeu, desbancando o açúcar do primeiro lugar na geração de riqueza para a coroa portuguesa, e a retração da sua produção até o fim do século XIX.

Além do ouro (século VXIII), a concorrência com o açúcar de beterraba (século XIX), a valorização do café (século XX), as grandes guerras mundiais, a incidência de pragas e moléstias (século XX) e os baixos preços proporcionaram fases de clímax e declínio para a produção do açúcar no Brasil.

Com a primeira crise do petróleo na década de 70, o país se viu na obrigação de buscar novas fontes de energia para substituí-lo, uma vez que o Brasil nessa época importava 79% de suas necessidades externas de petróleo. Silva et al. (2005) ressalta que embora o Proálcool tenha sido criado em 1975, somente na década de 80, após o segundo choque do petróleo, em 1979, é que ocorreu um crescimento vigoroso em investimentos, subsídios e produtividade; em vista disso, as áreas de produção de cana-de-açúcar aumentaram expressivamente no Brasil².

2.2.1 Proálcool

Lançado em 1975, o Programa Nacional do Álcool - Proálcool tinha como finalidade incentivar o aumento da oferta de álcool no mercado brasileiro para reduzir a dependência do petróleo advindo do mercado externo. De acordo com Leite (1990), a finalidade do programa era fornecer ao mercado interno, basicamente, um combustível líquido alternativo a um dos derivados do petróleo, a gasolina. Naquela época o Brasil produzia apenas 160.000 barris de petróleo por dia, ou seja, 20% da sua necessidade.

² Universidades e empresas : 40 anos de ciência e tecnologia para o etanol brasileiro / Carlos Henrique de Brito Cruz... [et al.]; Luís Augusto Barbosa Cortez (org.). – São Paulo: Blucher, 2016. 224 p.: il., color

Segundo a UNICA (2008), o programa diversificou a atuação da indústria açucareira com grandes investimentos apoiados pelo Banco Mundial, possibilitando a ampliação da área plantada com cana-de-açúcar e implantação de destilarias de etanol. A produção de cana passou de 68 milhões de toneladas processadas para 223 milhões de toneladas na safra 1990/1991, compatibilizando o desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar para fins energéticos e promovendo a modernização e o desenvolvimento em todo o país (Planalsucar, 1974, apud Figueiredo, 2008).

Outro ponto relevante foi a introdução do etanol hidratado³. Em 1984, os carros a etanol passaram a responder por 84,4% da produção das montadoras instaladas no Brasil (UNICA, 2008).

Quarenta anos depois do início do Proálcool, apesar de vários períodos de dificuldades, o Brasil vive agora uma nova expansão dos canaviais com o objetivo de oferecer, em grande escala, esse combustível alternativo.

Segundo dados da UNICA (2008), o plantio avança além das áreas tradicionais do interior paulista e do Nordeste, e se expande de forma sustentável em outras regiões. A nova escalada não é um movimento comandado pelo governo, como a ocorrida no final da década de 70, quando o Brasil encontrou no álcool a solução para enfrentar o aumento abrupto dos preços do petróleo que importava.

Apesar de recentemente o Governo Federal estar desenvolvendo planos e programas (como o RenovaBio – MME 2016) para expandir a produção de biocombustíveis, a corrida para ampliar unidades industriais e expansão dos canaviais é movida por decisão da iniciativa privada, convicta de que seus produtos (açúcar, etanol e energia) são cada vez mais importante no Brasil e no Mundo e se enquadram no conceito de sustentabilidade.

2.2.2 RenovaBio – Um novo programa

O RenovaBio é um novo programa do Governo Federal, lançado pelo Ministério de Minas e Energia, em dezembro de 2016, cujo objetivo é expandir a produção de biocombustíveis no Brasil, baseada na previsibilidade, na

³ Etanol comum (96,5% em vol.) é vendido nos postos de combustível, enquanto o anidro (99,5% em vol.) é o etanol misturado à gasolina.

sustentabilidade ambiental, econômica e social, e compatível com o crescimento do mercado (MME, 2016).

A oportunidade para o Brasil em avançar no desenvolvimento de políticas públicas dos biocombustíveis se deve ao compromisso voluntário assumido na Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas, ocorrida em Paris, na qual os países se comprometeram em reduzir suas emissões de gases de efeito estufa, com definição de metas a serem alcançadas até 2030 (MME, 2016), como, por exemplo:

- Redução de 43% das emissões de gases de efeito estufa;
- Diminuição a zero do desmatamento ilegal na Amazônia; e
- Participação de 45% de energias renováveis na matriz energética.

Como componente desse compromisso, foi definida a meta específica de expansão da bioenergia, assumindo-se o valor de 18% de participação na matriz energética em 2030. Isso envolve a expansão do etanol e do biodiesel, assim como a ampliação comercial de novos biocombustíveis e a produção de energia elétrica oriunda da biomassa. Isso impõe à sociedade brasileira o desafio e a oportunidade de utilizar os biocombustíveis como um vetor de desenvolvimento que contribui para redução das emissões, entre outras externalidades positivas.

Se, por um lado, esse esforço vai ao encontro do compromisso externo assumido em Paris, por outro a expansão dos biocombustíveis é um elemento importante para garantir a regularidade do abastecimento de combustíveis já que segundo as previsões da ANP a gasolina não será suficiente para suprir a demanda.

Tudo isso é um diferencial competitivo para o país, que não precisa obrigatoriamente investir no curto prazo em novas infraestruturas de geração e distribuição de energia ou de novas plataformas veiculares, não necessariamente mais eficientes e ainda com lacunas tecnológicas, para reduzir emissões, como acontece em outros lugares do mundo.

O papel dos biocombustíveis na matriz energética torna a oferta de energia no Brasil cada vez mais sustentável. Os biocombustíveis mais conhecidos em todo o mundo, utilizados em larga escala comercial, são o etanol e o biodiesel. Os novos biocombustíveis, tais como bioquerosene, biometano e biocombustíveis avançados ou lignocelulósicos, contribuem para a diversificação dos produtos e da

competitividade do setor, assim como são uma oportunidade para agregar valor e impulsionar a eficiência produtiva, mas ainda apresentam uma produção incipiente.

Até o momento da finalização deste trabalho, o programa RenovaBio encontra-se em fase de discussão. O projeto de lei ou medida provisória que criará o programa está sendo finalizada, após consulta pública, para ser submetida para aprovação pelo Congresso Nacional⁴.

O RenovaBio introduzirá novas políticas públicas para incentivar a produção sustentável de biocombustíveis na matriz energética brasileira, assegurando que o Brasil cumpra o compromisso assumido nos acordos internacionais.

Vale ressaltar este trabalho se insere no esforço do RenovaBio, com as expectativas aqui propostas para a busca de alternativas e melhorias no setor sucroenergético visando otimizar sua cadeia de produção.

2.3. SETOR SUCROENERGÉTICO NO BRASIL

Em termos globais, o Brasil ocupa a segunda posição entre os maiores produtores de etanol, sendo superado apenas pela produção dos Estados Unidos (EUA), a partir do milho. Segundo REN 21 (2016), a produção de etanol aumentou 4% globalmente em relação ao ano de 2015, com níveis recordes de produção nos Estados Unidos e Brasil chegando a valores significativos, de 55 bilhões de litros e 30 bilhões de litros de etanol, respectivamente. Somando a produção brasileira com a norte americana, a produção de etanol é equivalente a 87% da produção mundial deste biocombustível.

A produção de etanol, independentemente do tipo de matéria-prima utilizada, ocorre basicamente a partir de duas etapas principais: fermentação da fonte de açúcar e destilação da solução alcoólica produzida durante o processo fermentativo (Figura 2.1).

⁴ Valor Econômico, 2017 - <http://www.valor.com.br/agro/5074198/divergencias-no-governo-travam-publicacao-da-mp-do-renovabio>

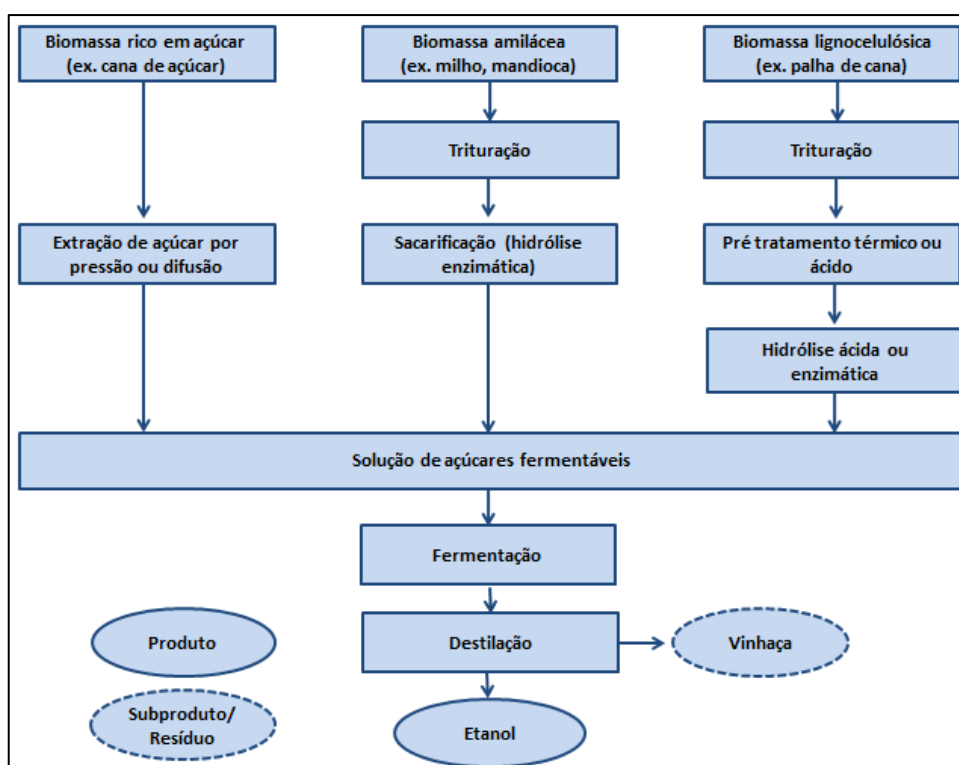


Figura 2.1 - Rotas tecnológicas para produção de etanol
Fonte: Adaptado de Fuess (2017)

Considerando o caso brasileiro, as destilarias podem utilizar tanto o caldo de cana, extraído diretamente da cana-de-açúcar por meio de moendas ou difusores, como uma mistura do caldo com o melaço, solução residual da produção de açúcar, consequência da concentração e da precipitação dos açúcares presentes no caldo. O alto valor de mercado do açúcar exerce influência considerável na utilização do açúcar total recuperável (ATR) a partir da cana, normalmente limitando o emprego direto do caldo na produção do etanol (Wilkie et al., 2000; BNDES e CGEE, 2008).

No âmbito das questões ambientais, alguns benefícios importantes devem ser destacados com relação à produção e ao uso de etanol, enfatizando-se seu caráter renovável e seu potencial intrínseco para reduzir a emissão de GEEs⁵, baseando-se tanto no sequestro de carbono na fase agrícola como na combustão mais limpa do biocombustível e no uso da biomassa (bagaço) como fonte de energia para produção do etanol.

⁵São substâncias gasosas que absorvem parte da radiação infravermelha, emitida principalmente pela superfície terrestre, e dificultam seu escape para o espaço. Isso impede que ocorra uma perda demasiada de calor para o espaço, mantendo a Terra aquecida. O etanol tem contribuído largamente para a redução das emissões de gases do efeito estufa (GEE), por serem substitutos aos combustíveis fósseis. (Macedo, 2004)

A caracterização da produção de etanol como “ambientalmente adequada” também depende, entretanto, do correto gerenciamento das águas residuárias e resíduos gerados no processo. Quanto aos resíduos sólidos, as atuais práticas utilizadas no manejo destes apresentam bons resultados. O bagaço resultante do processamento da cana-de-açúcar é queimado nas caldeiras para geração de vapor e eletricidade, suprimindo o consumo energético na planta industrial e produzindo excedentes de eletricidade passível de comercialização com as concessionárias de energia.

Estudos vêm sendo desenvolvidos para viabilizar o uso da palha da cana-de-açúcar para a produção do etanol, buscando-se um aumento da produção sem aumento da área de cultivo de cana-de-açúcar (Dias et al., 2012, 2013; Moraes et al., 2015). A torta de filtro, resultante de etapas de tratamento do caldo, apresenta concentrações apreciáveis de nutrientes (Nandy et al., 2002) sendo utilizada na adubação dos canaviais. Por outro lado, com relação às águas residuárias, especificamente a vinhaça, a atual prática de gerenciamento utilizada é a fertirrigação, embora técnica e economicamente viável, apresenta importantes limitações ambientais, considerando tanto o elevado caráter poluente deste efluente quanto seu potencial para recuperação de energia a partir da aplicação de processos anaeróbios⁶.

2.4. VINHAÇA: ASPECTOS QUALITATIVOS E QUANTITATIVOS

A vinhaça, também conhecida como vinhoto e/ou restilo, compreende o principal efluente do processo produtivo do etanol, gerada especificamente na etapa de destilação a uma taxa média de 11,5 litros por litro de etanol produzido, mas sua produção pode variar entre 8 – 15 litros por litro de etanol. Em termos gerais, a vinhaça apresenta elevado conteúdo orgânico, bem como concentrações significativas de potássio e sulfato, características ácidas e corrosivas, as quais

⁶ Dispõe sobre a homologação da Norma Técnica CETESB P 4.231 - Vinhaça – Critérios e procedimentos para aplicação no solo agrícola.

resultam de processos relacionados ao preparo da matéria-prima para a fermentação.

A elevada concentração de matéria orgânica usualmente quantificada na vinhaça resulta da presença de açúcares residuais não convertidos na etapa de fermentação, compostos orgânicos intermediários formados em rotas metabólicas paralelas na mesma etapa de fermentação, principalmente ácidos orgânicos e glicerol, e frações residuais de etanol não recuperadas na etapa de destilação (Wilkie et al., 2000; España-Gamboa et al., 2011). Na Tabela 2.1 são apresentadas as características de composição básica de vinhaças da cana-de-açúcar, tendo em vista o emprego de caldo e melaço.

Tabela 2.1 - Características composicionais de vinhaças de cana-de-açúcar.

Referência	Matéria-Prima	DBO	DQO	NTK	P _{total}	K	SO ₄ ⁻²	pH
		(g L ⁻¹)	(g L ⁻¹)	(mg L ⁻¹)	(mg L ⁻¹)	(mg L ⁻¹)	(mg L ⁻¹)	(mg L ⁻¹)
Costa et al. (1986)	Caldo	16,5	33	700	91	1742	760	3,7-4,6
Craveiro et al. (1986)		17,1	31,3	412	109	1473	ND	3,9
Driessen et al. (1994)		15	22	400	58	ND	400	3,5
Prada et al. (1998)		6-16,5	15-33	150-700	10-120	1200-2100	600-700	3,7-4,6
Ferreira et al. (2011)		11,3	42	70	200	2300	1300	3,9
Costa et al. (1986)	Caldo + Melaço	19,8	45	710	87	3817	3730	4,4-4,6
Souza et al. (1992)		ND	31,5	370	24	1300	420	3,9
Prada et al. (1998)		19,8	45,8	480-710	9-200	3340-4600	3700-3730	4,4-4,6
Siqueira et al. (2013)		ND	36-49	570-1603	35-111	2334-3147	2300-2900	4,3-4,6
Ferraz Jr. et al. (2014b)		16,7	35,2	700	160	ND	1400	4,6
Santos et al. (2014 ^a)		ND	30,4-33,8	436-861	147-181	ND	1400-2600	4,6-5,1
Santos et al. (2014b)		ND	32,1-33,9	1354-1619	208-236	4200-4800	2100-2900	4,3
Sheehan e Greenfield (1980)	Melaço	35,6	77,7	1780	168	8904	4360	4,3
Bories et al. (1988)		20,5	51,2	ND	ND	4530	3500	ND
Costa et al. (1986)		25	65	1610	127	6497	6400	4,2-5,0
Karhadkar et al. (1990)		55-65	102-130	1200-3000	43-290	9100-10000	1100-3000	4,3-4,5
Driessen et al. (1994)		39	100	1030	33	7000	9500	3,4-4,5
Goyal et al. (1996)		60	98	1200	1500	1200	5000	3,8-4,4
Prada et al. (1998)		25	65	450-1610	100-290	3740-7830	6400	4,5
Banu et al. (2006)		ND	82-101,5	1300-1850	250-750	7000-7200	1800-3000	4,0-4,7
Searmsirirongkol et al. (2011)		40	150	ND	ND	8800	7000	4,4
España-Gamboa et al. (2012)		ND	121	1341	141	7262	5336	4,0

Siglas: DBO = demanda bioquímica de oxigênio, DQO = demanda química de oxigênio, NTK = nitrogênio total Kjeldahl, P_{total} = fósforo total, K = potássio, SO₄⁻² = sulfato, nd = dado não disponível.

Fonte: Fuess e Garcia (2014b).

No setor sucroenergético brasileiro, praticamente toda vinhaça gerada nas destilarias é direcionada à fertirrigação das áreas agricultáveis, buscando-se o reciclo de água e de nutrientes. Embora esta prática possibilite a obtenção de benefícios em curto prazo, a aplicação contínua de vinhaça na lavoura tem potencial para gerar inúmeros impactos adversos ao solo, recursos hídricos e na produtividade se não manejadas adequadamente (Tabela 2.2).

Tabela 2.2 - Potenciais impactos adversos da fertirrigação com vinhaça.

Potenciais Impactos	Implicações
Salinização do solo (risco elevado)	Redução do potencial osmótico do solo Toxicidade de íons específicos (SO_4^{2-} , Cl^- , Na^+ , K^+) Redução na absorção de água e nutrientes pelas plantas Destruição da estrutura do solo Lixiviação de sais para água subterrânea
Sodificação do solo (risco baixo)	Destruição da estrutura do solo Redução severa da taxa de infiltração de água Queimaduras e necrose do tecido foliar em plantas
Sobrecarga orgânica (risco elevado)	Depleção dos níveis de oxigênio dissolvido (OD) Geração de condições anaeróbias Redução da atividade microbiana Aumento da instabilidade estrutura do solo
Superfertilização do solo - excesso de N e P (risco elevado)	Aumento da suculência nas plantas Depleção dos níveis de OD por bactérias nitrificantes Liberação de óxidos de nitrogênio (N_2O) Toxicidade por nitrogênio amoniacal (biota aquática) Lixiviação de nitratos Eutrofização de corpos d'água (excesso de P)
Acidificação permanente - solo e água (risco elevado)	Alteração do poder tampão do solo Solubilização de metais tóxicos às plantas Redução na produtividade da lavoura Redução da atividade microbiana

Fonte: Fuess e Garcia (2014b).

A fertirrigação das lavouras com vinhaça objetiva, principalmente, o retorno de potássio ao solo, nutriente usualmente mais abundante em sua composição. Em solos pobres em teor de potássio, a fertirrigação é de suma importância para o desenvolvimento do cultivo da cana-de-açúcar (Tabela 2.1). No Estado de São Paulo, principal produtor de etanol no Brasil e, por consequência, maior gerador de vinhaça, a definição da taxa de aplicação desta baseia-se unicamente na concentração de potássio em sua composição (CETESB, 2015), desprezando outros aspectos importantes, principalmente as elevadas concentrações de matéria

orgânica e sulfato e o elevado nível de acidez deste efluente. Além disso, baseando-se no raio econômico para o transporte da vinhaça (cerca de 30 km a partir da destilaria), sua aplicação não ocorre em toda a área de cultivo de cana-de-açúcar (Silva, 2012; Poveda, 2014), fato que favorece a concentração dos compostos supracitados no solo, desencadeando impactos como a salinização do meio (Fuess e Garcia, 2014) e a liberação de maus odores devido à decomposição da fração orgânica biodegradável presente na vinhaça (Moraes et al., 2015).

Além da problemática ambiental, os elevados valores observados para a DQO da vinhaça (superiores a 30 g L^{-1} , valor representativo para o caso brasileiro) indicam a presença de substrato com potencial para aplicação em processos (bio)tecnológicos complementares, visando à recuperação de energia e/ou obtenção de outros produtos de interesse. Utilizando-se como referência a composição da cana-de-açúcar em termos energéticos, 1 tonelada de cana limpa (TC) possui cerca de 1.718×10^3 kcal distribuídas entre açúcares (153 kg, 608×10^3 kcal), bagaço – 50% de umidade (216 kg, 598×10^3 kcal) e palha – 15% de umidade (165 kg, 512×10^3 kcal) (Palacio et al., 2012).

2.5. ESTADO DA ARTE DA BIODIGESTÃO ANAERÓBICA

Salomon (2007) relata que, em 1776, Alessandro Volta, físico Italiano, descobriu o “ar combustível”, formado em sedimentos no fundo de lagos e rios. Oitenta anos mais tarde, Reiset detectou a formação de metano em estrumeiras e propôs o estudo desse tipo de manejo de resíduos para explicar o processo de decomposição anaeróbia. Bechamp, em 1868, concluiu que o gás metano é formado por microrganismos sendo que, em 1875, Popoff investigou a formação de metano a partir de vários substratos. Em 1890, Van Sensus verificou que a decomposição anaeróbia era feita por vários microrganismos e Omeliansui isolou organismos que produziam hidrogênio, ácido acético e butírico, a partir da celulose. Deduziu também que o metano seria produzido a partir da redução do gás carbônico por hidrogênio (EEA 2005).

Em 1910, Sohngen verificou que a fermentação de materiais orgânicos produz compostos reduzidos como hidrogênio, ácido acético e gás carbônico. Demonstrou também que ocorre a redução de CO₂ para a formação de metano e assumiu que o ácido acético é descarbonizado para formação de metano. Essa hipótese, hoje considerada correta, permaneceu em controvérsia por várias décadas. Em 1914, Thum e Reichle concluíram que o processo se dava em duas fases: ácida e metânica. Em 1916, Imhoff, denominou de digestão ácida e digestão metânica as fases do processo. Em 1940, Barker isolou a *Methano Bacterium Omelianski* que oxida o etanol, o acetato e o metano. Em 1956, Jerris verificou que 70% do metano produzido era proveniente do acetato. Em 1967, Briant publicou que existem dois grupos de bactérias que convertem a metano uma pela via do acetato e outra pelo hidrogênio (EEA, 2005).

O crescimento do processo de industrialização resultou num aumento das quantidades de efluentes com alto teor de orgânicos, o que poderia resultar num potencial aumento de fontes alternativas de energia. Estes efluentes passíveis de causar um grande impacto ambiental podem se tornar uma considerável fonte de energia. Atualmente, pesquisadores de todo mundo tem dado uma especial atenção aos processos anaeróbios, bem como ao desenvolvimento de reatores para o tratamento de resíduos e principalmente a conversão de orgânicos em biogás. Esta nova geração de reatores possui a vantagem de operar com alta carga orgânica diária, alta velocidade no fluxo de entrada e baixo tempo de retenção hidráulica (Salomon, 2007).

2.5.1 Microbiologia e bioquímica da digestão anaeróbia

Salomon (2007) afirma que um reator de digestão anaeróbia pode ser considerado como um ecossistema onde diversos grupos de microrganismos trabalham conjuntamente na conversão da matéria orgânica complexa em metano, gás carbônico, água, gás sulfídrico e amônia, além de novas células bacterianas. As reações bioquímicas principais que ocorrem no processo caracterizam os grupos de microrganismos predominantes, podendo o mesmo ser dividido em quatro etapas: hidrólise, acidogênese, acetogênese, e metanogênese, conforme descreve McCarty

e Smith (1986) apud Speece (1995). A Figura 2.2 apresenta o balanço da digestão anaeróbia da matéria orgânica (reproduzido de Lettinga, 1985).

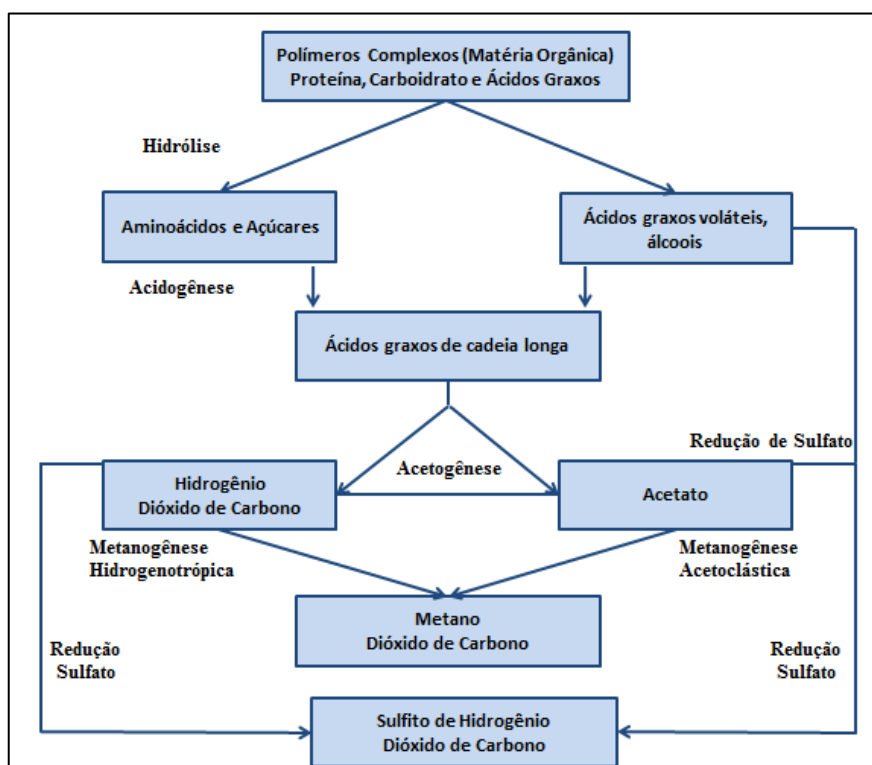


Figura 2.2 - Digestão anaeróbia da matéria orgânica.
Fonte: adaptado de Lettinga (1985).

2.5.1.1 Hidrólise

Segundo Palmisano, (2003) a primeira etapa pode ser chamada de depolimerização que consiste no processo de degradação da matéria orgânica que inicia-se com a hidrólise do material presente no efluente, gerando-se compostos mais simples, que possam ser assimilados pelos microrganismos. Normalmente os compostos orgânicos complexos (polímeros orgânicos) são transformados a monômeros ou dímeros, como açúcares, ácidos orgânicos, aminoácidos, etc. Esta conversão é realizada por enzimas extracelulares que são excretadas pelas bactérias fermentativas hidrofílicas, chamadas hidrolasas. Lema (1997) afirma que na degradação de muitos compostos poliméricos há possibilidade da etapa hidrolítica ser mais lenta que as demais etapas, sendo esta a que limita o processo global de digestão anaeróbia. Os principais fatores que influenciam na hidrólise,

segundo Lettinga (1985), são: pH, temperatura, tempo de retenção, tamanho e distribuição das partículas.

Segundo Rittmann 2001, apud Salomon 2007, a hidrólise pode ser descrita pelo modelo cinético de primeira ordem, mas o que se pode observar é que ela segue a cinética de primeira ordem sendo relativamente independente da concentração de microrganismos (inclusive baixas concentrações) devido a ação das enzimas extracelulares. Dependendo do tipo de composto a hidrólise se realiza por diferentes grupos enzimáticos. A Tabela 2.3 apresenta alguns valores de taxas de depolimerização.

Tabela 2.3 - Taxa de depolimerização de biopolímeros (mesofílico)	
Biopolímeros	Taxa de depolimerização dias ⁻¹
Lipídeos	0,4-0,6 (ésteres de AGV) 0,12-1,7 (gorduras) 0,08 (lipídios)
Proteínas	0,02-0,03
Celulose	0,04-0,13
Hemicelulose	0,54

Fonte: Palmisano (2003).

2.5.1.2 Acidogênese

Esta etapa acontece quando a matéria orgânica dissolvida é biodegradada até ácidos graxos voláteis (ácido acético, propiônico, butírico), hidrogênio, dióxido de carbono e álcoois por uma população de bactérias heterogêneas. Dentre os microrganismos presentes nesta etapa estão os fungos e protozoários, além da predominância de bactérias acidogênicas. Estas bactérias são consideradas de crescimento rápido, tempo de duplicação mínimo de 30 minutos (Mussati, 1998), e a reação preferida pelas mesmas é a que produz ácido acético; as outras reações são as respostas das bactérias ao acúmulo de hidrogênio durante as perturbações de carga do sistema.

2.5.1.3 Acetogênese

Na acetogênese os produtos formados anteriormente são oxidados para acetato, hidrogênio e gás carbônico, com o objetivo de fornecer substrato apropriado aos microrganismos metanogênicos. Geralmente isto acontece a partir de dois mecanismos: o primeiro a acetogênese de hidrogenação que produz ácido acético como um só produto final de fermentação de hexose ou de CO_2 e H_2 e o segundo chamado de acetogênese de desidrogenação que converte os ácidos graxos de cadeia curta e longa em ácido acético por um grupo de bactérias acetogênicas. O grupo bacteriano desta etapa tem um crescimento relativamente lento, tempo de duplicação mínimo de 1,5 a 4 dias (Mussati, 1998). 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 microrganismos apenas o acetato e o hidrogênio podem ser assimilados pelas bactérias metanogênicas. De acordo com as pesquisas realizadas por Breure et al. (1984), a distribuição dos ácidos orgânicos voláteis dependerá principalmente da natureza do substrato e das condições às quais os microrganismos estão sendo expostos. Com isto a etapa de acetogênese pode ser mais ou menos intensa no processo de degradação do substrato.

Segundo Speece (1995), na degradação de efluentes complexos, como os carboidratos, a maior fração do metano formado resulta do acetato como precursor direto. Cerca de 20% da produção de metano do sistema tem como precursor o propionato, que durante o metabolismo é convertido a acetato e hidrogênio e gás carbônico.

2.5.1.4 Metanogênese

O processo de degradação do substrato é finalizado por esta etapa, que consiste na transformação dos produtos formados (com um ou dois átomos) anteriormente em metano e dióxido de carbono. A formação do metano é realizada por dos mecanismos distintos, conforme descreve Speece (1995). O primeiro

consiste da formação do metano a partir do CO_2 e H_2 , pelos microrganismos do grupo de *arqueas hidrogenotróficas*. Estes se desenvolvem rapidamente com um tempo de duplicação mínimo de 6 horas e controla o potencial redox do processo, os traços de hidrogênio que ficam no meio regulam a velocidade total de produção de ácidos pelas bactérias acidogênicas, e a composição da mistura formada. O hidrogênio também controla a velocidade da qual os ácidos propiônico e butírico são convertidos a ácido acético, ou seja, regulam a formação de ácidos voláteis. O segundo mecanismo consiste da produção do metano a partir do acetato, realizada pelos microrganismos do grupo de *arqueas acetoclásticas*, que se desenvolvem muito lentamente com um tempo de duplicação mínimo de 2 – 3 dias e influenciam no pH do sistema pela eliminação do ácido acético e formação de dióxido de carbono, além do mais são responsáveis pela maioria do metano produzido.

Segundo Lema (1997), os microrganismos metanogênicos possuem uma velocidade de crescimento e um fator de produção de biomassa inferior ao dos grupos acidogênicos e sulfato redutores, o que muitas vezes pode gerar desequilíbrio no processo de degradação do substrato. As principais reações que ocorrem na fase metanogênica são apresentadas na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 - Reações que ocorrem na fase metanogênica	
Equações	ΔG^0 (kJ)
$\text{CH}_3\text{CO}_2^- + \text{H}^+ \rightarrow \text{CH}_4 + \text{CO}_2$	-36
$\text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2^+ \rightarrow \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$	-113
$\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2 \text{H}_2\text{O}$	-131
$\text{HCO}_2^- + \text{H}^+ + 3\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2 \text{H}_2\text{O}$	-134
$\text{HCO}_3^- + \text{H}^+ + 4\text{H}_2 \rightarrow 9 \text{CH}_4 + 3 \text{CO}_2 + 4 \text{NH}_3$	-136

Fonte: Klass (1998).

2.5.1.5 Redução de Sulfato

Segundo Chernicharo (1997) na presença de sulfato, sulfito ou outros compostos a base de enxofre a oxidação da matéria orgânica é realizada utilizando estes compostos como aceptores de elétrons. Como produtos finais deste processo serão formados o gás sulfídrico e gás carbônico.

Lettinga et al. (1985) afirma que os microrganismos responsáveis pela redução dos compostos de enxofre são chamados de bactérias redutoras de sulfato.

Estes microrganismos são capazes de utilizar vários tipos de substrato para o sua manutenção e crescimento. A habilidade de utilizar os ácidos orgânicos voláteis torna este grupo importante para o equilíbrio da digestão anaeróbia.

Pela existência da possibilidade de ambos os grupos de bactérias, redutoras de sulfato e metanogênicas, poderem utilizar o acetato como fonte de carbono e energia para o seu crescimento, em sistemas onde estes dois grupos estejam presentes, a competição entre eles pode afetar o desempenho do sistema de tratamento (Bhattacharya et al., 1996).

O aumento desta competição torna-se mais importante quando a relação DQO/SO_4^{-2} é pequena. Segundo Lettinga et al. (1985), a digestão anaeróbia pode ser realizada sem problemas quando esta relação é superior a 10. Teoricamente a redução completa do sulfato é possível para relações de DQO/SO_4^{-2} acima de 0,67, porém a literatura cita que em relações abaixo de 10, o sistema anaeróbio tem dificuldades para proceder a degradação da matéria orgânica em taxas satisfatórias. O modelo matemático desenvolvido por Lettinga et al. (1985) explica que com a diminuição da relação DQO/SO_4^{-2} , a concentração do H_2S aumenta no reator, e a capacidade de arraste do biogás formado no reator decai rapidamente com o declínio da relação, aumentando a quantidade de H_2S solúvel no efluente.

A redução do sulfato pode ser executada por outros metabolismos. Polanco et al. (2001) propõem um novo processo de remoção de sulfato e nitrogênio em meio anaeróbio. Neste novo processo estaria envolvida a oxidação da amônia e a redução do sulfato, com a formação de enxofre elementar e nitrogênio molecular.

2.5.2 Termodinâmica da digestão anaeróbia

Segundo Salomon (2007), o conhecimento da acetogênese foi significativamente ampliado pelo entendimento dos aspectos termodinâmicos envolvidos, tendo resultado no esclarecimento de alguns mecanismos de autocontrole do processo. O estudo das trocas de energia que ocorrem em reatores anaeróbios é difícil não apenas por ser um processo complexo; mas, também, pela dificuldade de se medirem os produtos finais e intermediários que se apresentam em concentrações muito baixas. Assim, as considerações sobre a termodinâmica do

processo se restringem à análise da variação da energia livre padrão das principais reações. A Tabela 2.5 apresenta algumas relações redox⁷ importantes no processo de digestão anaeróbia.

Tabela 2.5 - Reações importantes nos processos anaeróbios

Oxidações (doadoras elétrons)	Reações	ΔG^0 , kJ
Propionato → acetato	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COO}^- + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}^+ + \text{HCO}_3^- + \text{H}_2$	76,1
Butirato → acetato	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{COO}^- + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}^+ + 2\text{H}_2$	48,1
Etanol → acetato	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}^+ + 2\text{H}_2$	9,6
Lactato → acetato	$\text{CH}_3\text{CHOHCOO}^- + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_3\text{COO}^- + \text{HCO}_3^- + \text{H} + 2\text{H}_2$	-4,2
Acetato → metano	$\text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HCO}_3^- + \text{CH}_4$	-31
Reduções (recebe elétrons)		
$\text{HCO}_3^- \rightarrow \text{acetato}$	$2\text{HCO}_3^- + 4\text{H}_2 + \text{H}^+ \rightarrow \text{CH}_3\text{COO}^- + 4\text{H}_2\text{O}$	-104,6
$\text{HCO}_3^- \rightarrow \text{metano}$	$\text{HCO}_3^- + 4\text{H}_2 + \text{H}^+ \rightarrow \text{CH}_4 + 3\text{H}_2\text{O}$	-135,6
Sulfato → sulfeto	$\text{SO}_4^{2-} + 4\text{H}_2 + \text{H}^+ \rightarrow \text{HS}^- + 4\text{H}_2\text{O}$	-151,9
Sulfato → sulfeto	$\text{SO}_4^{2-} + \text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}^+ \rightarrow 2\text{HCO}_3^- + \text{H}_2\text{S}$	-59,9
Nitrato → amônia	$\text{NO}_3^- + 4\text{H}_2 + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{NH}_4^+ + 3\text{H}_2\text{O}$	-559,9
Nitrato → amônia	$\text{NO}_3^- + 4\text{H}_2 + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{NH}_4^+ + 3\text{H}_2\text{O}$	-511,4
Nitrato → nitrogênio	$2\text{NO}_3^- + 5\text{H}_2 + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$	-1121

Fonte: EEA (2005).

A Tabela 2.5 mostra claramente que, em sua maioria, as reações bioquímicas acetogênicas são termodinamicamente desfavoráveis ($\Delta G^0 > 0$) nas condições padrão. Isto é, caso as espécies químicas indicadas à direita estejam presentes nas concentrações indicadas pela reação, ela se dá no sentido de formar as espécies químicas à esquerda. Como a metanogênese depende da disponibilidade de acetato, é importante que o equilíbrio das reações acetogênicas seja deslocado para a direita, o que é conseguido com a remoção contínua do H_2 , através das reações receptoras de elétrons.

2.5.3 Fatores que influenciam a atividade anaeróbia

2.5.3.1 Influência da Temperatura

⁷ São as reações de transferência de elétrons. Esta transferência se produz entre um conjunto de espécies químicas, um oxidante e um redutor.

De acordo com Sánchez et al. (2001), estudos têm registrado a aplicação do processo anaeróbio em diferentes faixas de temperatura. Segundo Lema (1997), estas faixas de temperatura associadas com o crescimento microbiano podem ser classificadas como:

- faixa psicrófila: entre 0 e aproximadamente 20°C;
- faixa mesófila: entre 20 e aproximadamente 45°C;
- faixa termófila: entre 45 e aproximadamente 70°C.

Na faixa mesófila (20-45°C), a temperatura ótima se situa em torno de 35°C e na faixa termófila (45-70°C), em torno de 55°C (Soares e Hirata, 1997).

Segundo Soares (1990), o processo apresenta uma maior instabilidade nos seus parâmetros de controle, quando operado na faixa termófila, e quando ocorre variação da temperatura, esse problema se agrava podendo afetar mais seriamente o processo. O grupo de bactérias metanogênicas são os que mais sofrem com a influência da temperatura, pois apresentam um intervalo de temperatura muito restrito de operação, podendo causar o aumento de ácidos voláteis através de baixas temperaturas, e consequentemente uma queda de pH.

A digestão anaeróbia é possível à temperatura baixa (10°C), mas a eficiência e a carga orgânica diminuem muito com a diminuição da temperatura (Van Haandel e Lettinga, 1994).

Segundo Speece (1996) para cada 5°C de queda de temperatura há um declínio de 34% da atividade dos microrganismos, o mesmo autor considera a temperatura ótima na faixa de 25 a 30°C para processos mesofílicos.

2.5.3.2 Influência do pH

O pH se manifesta sob diferentes formas alterando as cargas dos sítios ativos das enzimas, modificando suas estruturas e consequentemente perdendo suas características, aumentando ou diminuindo a toxicidade destes.

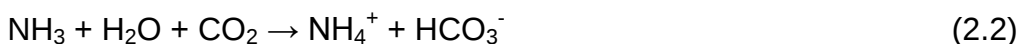
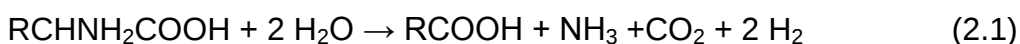
Segundo Lema (1997) o pH ótimo depende do consórcio de microrganismos envolvidos no processo. Normalmente os microrganismos têm o seu pH ótimo perto da neutralidade como é o caso das arqueas metanogênicas, com uma faixa ótima de

6,5 a 8,2. Em condições acima ou abaixo desta faixa decresce a taxa de produção de metano. As bactérias produtoras de ácidos têm um crescimento ótimo na faixa de pH entre 5 e 6, tendo uma tolerância maior a valores mais baixos de pH que as *arqueas* metanogênicas.

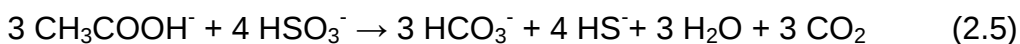
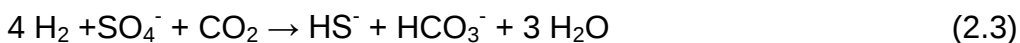
Soares (1990) descreve que, o pH está intimamente ligado a concentrações de ácidos orgânicos voláteis no meio, resultante do equilíbrio entre populações de microrganismos e a alcalinidade total do sistema. Portanto, qualquer desequilíbrio no sistema provoca o acúmulo de ácidos orgânicos no meio e consequentemente queda do pH. Segundo o autor os valores de pH abaixo de 6 e acima de 8, praticamente fazem cessar a produção de metano.

Os dois principais compostos que afetam o pH nos processos anaeróbios são o ácido carbônico e os ácidos voláteis. Na faixa de pH entre 6 e 7,5 a capacidade de tamponamento (capacidade de uma determinada amostra em resistir a mudança do pH) do sistema é quase completa, dependendo da relação gás carbônico/alcalinidade, que em equilíbrio com a dissociação do ácido carbônico, tende a regular a concentração do íon H^+ .

As equações 2.1 e 2.2 abaixo expressam a geração de alcalinidade resultante da degradação de uma proteína. Segundo Speece (1995), o resultado do aumento de alcalinidade durante a digestão anaeróbia é o resultado do metabolismo da matéria orgânica realizada pelos microrganismos com a liberação de um cátion e um ânion. Na biodegradação de compostos orgânicos nitrogenados, o aumento da alcalinidade é proporcional à quantidade de amônia liberada.



Segundo Anderson e Yang (1992) apud Speece (1995), a concentração de ácidos orgânicos, sulfatos, compostos nitrogenados, e DQO têm um profundo efeito na demanda de alcalinidade para o controle do pH no tratamento anaeróbio. As equações 2.3, 2.4 e 2.5 a seguir apresentam a alcalinidade gerada a partir do sulfato e sulfito.



2.5.3.3 Necessidades nutricionais

Segundo Lema et al. (1997), uma das principais vantagens do processo anaeróbio é a sua baixa necessidade de nutrientes, devida logicamente a baixa produção celular. As necessidades nutricionais dos microrganismos presentes no sistema anaeróbio são estabelecidas de acordo com a composição química das células microbianas.

Os elementos químicos em maior quantidade na composição dos microrganismos são: carbono, oxigênio, nitrogênio, hidrogênio, fósforo e enxofre. Outros nutrientes são necessários para a biossíntese dos componentes celulares, como cátions (Mg^{+2} , Ca^{+2} , Na^{+} , K^{+} , Fe^{+2}), ânions (Cl^{-} , SO_4^{-2}), e traços de elementos considerados como micronutrientes (Co, Cu, Mn, Mo, Zn, Ni, Se,) servindo como elementos auxiliares para várias enzimas. Os microrganismos precisam de uma fonte de carbono para o seu crescimento, muitos utilizam CO_2 outros, carbono orgânico. A classificação dos microrganismos em seres autotróficos e heterotróficos está relacionada à fonte de carbono utilizada pelos mesmos, onde os autotróficos sintetizam suas moléculas carbônicas a partir do CO_2 , e os heterotróficos utilizam como fonte de carbono compostos orgânicos (Chernicharo, 1997).

De acordo com Chernicharo (1997), assumindo-se que os nutrientes estejam numa forma disponível, uma relação de nutrientes representada pela Equação 6 é geralmente utilizada nos processos de tratamento de efluente.

$$DQO:N:P = 350:5:1 \quad (2.6)$$

2.5.3.4 Toxicidade a digestão anaeróbia

Segundo Chernicharo (1997), a adequada degradação dos efluentes por qualquer processo biológico depende da manutenção de um ambiente favorável para os microrganismos, incluindo o controle e a eliminação de constituintes tóxicos. A toxicidade tem sido considerada uma das principais razões para a não aplicação de processos anaeróbios, pois as bactérias metanogênicas são facilmente inibidas por toxinas, devido a sua pequena fração de substratos sintetizados em células e ao elevado tempo de geração dessas bactérias. Os microrganismos possuem um grau

de adaptação a concentrações inibitórias, desde que certas condições de projeto sejam favorecidas como elevados tempos de residência de sólidos e minimização do tempo de residência das toxinas no sistema.

Grupos de substâncias químicas como metais pesados e substâncias organoclorados têm uma influência tóxica, mesmo em concentrações muito baixas. (Pol et al., 1998).

2.5.3.5 Toxidade por compostos orgânicos

Hwu et al. (1998) estudaram a bio-adsorção dos ácidos graxos de cadeia longa (LCFA) em reatores UASB, concluindo que a adsorção destes compostos na matriz dos grânulos de microrganismo é rápida e que, com o aumento da concentração destes compostos no efluente, maior será a sua adsorção aos grânulos, gerando uma maior inibição na sua degradação.

A degradação de corantes do tipo azo, produto normalmente utilizado na indústria têxtil e de curtume, foi estudada por Manu et al. (2001), onde o efeito tóxico, destes corantes e dos sais presentes neste tipo de efluente, nos microrganismos metanogênicos foi avaliado através dos indicadores de produção máxima de metano e máxima atividade metanogênica. Os resultados mostraram não haver inibição quanto a máxima produção de metano, porém os resultados da atividade metanogênica indicaram que concentrações acima de 400 mg/l do azocorante preto (Reativo 5B) podem ser inibitórias para estes microrganismos.

2.5.3.6 Toxidade por amônia

Segundo Chernicharo (1997), a presença do bicarbonato de amônia, resultante da degradação de efluentes ricos em compostos protéicos ou ureia, é benéfica ao sistema de digestão, como fonte de nitrogênio e como tampão para alterações de pH. Tanto o íon amônia (NH_4^+) quanto a amônia livre (NH_3) podem ser tóxicas aos microrganismos. Estas duas formas apresentam-se relacionadas pela Equação 2.7.



Sterling et al. (2001) estudaram o efeito da amônia na produção de hidrogênio e metano, empregando diferentes concentrações de ureia como fonte de nitrogênio amoniacal. Os autores verificaram que a concentração de H_2 aumentou nos digestores que continham de 600 a 1500 mg N/l, e no digestor com 3000 mg N/l a produção de H_2 foi inibida. As produções de metano e de biogás decaíram com o aumento da adição de ureia.

Segundo Speece (1995), quando 10.000 mg/l de N^+NH_4 foram adicionados a uma biomassa metanogênica em pH neutro, a taxa de produção de biogás gradativamente caiu a zero, indicando forte inibição celular. Entretanto após 10 dias de produção insignificante de biogás, a atividade da biomassa rapidamente retornou para 70% da atividade inicial nos primeiros 5 dias, mostrando que a amônia não tem um efeito bactericida.

2.5.3.7 Toxidade por sulfato e sulfeto

Segundo Lettinga et al. (1985) o tratamento anaeróbico de efluentes que contenham compostos sulfonados podem gerar grandes problemas de inibição em concentrações acima de 145 mg S/l de H_2S não dissociado, apesar do sulfeto de hidrogênio (H_2S) ser um nutriente essencial para as arqueas metanogênicas.

Conforme Lettinga et al., (1985), a inibição pelo sulfeto está relacionada com o pH do meio, pois o H_2S formado durante a digestão anaeróbia dissocia-se na água, gerando HS^- e S^{2-} . A forma não dissociável de H_2S é o principal componente dissolvido para valores de pH inferiores a 7. A forma H_2S^- predomina na faixa de pH entre 7 e 14. A concentração de sulfeto livre é considerada desprezível na faixa de pH em que atua os processos de tratamento de efluentes.

2.5.3.8 Toxicidade por metais pesados

Elementos e compostos químicos como cromo, cromatos, níquel, zinco, cobre, arsênico, cianetos, dentre outros, são classificados como altamente tóxicos.

As concentrações dos metais pesados mais tóxicos que podem ser toleradas no tratamento anaeróbico estão relacionadas com a concentração de sulfeto

disponível no meio para combinar com estes metais pesados e formar sais de sulfeto que são bastante insolúveis, sem efeito adverso ao tratamento anaeróbio. Cerca de 1,8 a 2 mg/l de metais pesados são precipitados como sulfetos metálicos, quando este está presente na quantidade de 1 mg/l de sulfeto (S^-) (Chernicharo,1997).

Segundo Scavino et al. (1997), o cromo presente nos efluentes de curtumes é um importante agente tóxico aos microrganismos encontrados no sistema anaeróbio. Uma completa inibição em um ecossistema metanogênico é atingida quando este está exposto a concentrações acima de 100 mg/l de Cr total. A toxicidade do cromo pode ser reduzida pela adição de quelatos, porém não pela adição de outros metais. Segundo os autores, é possível reverter a atividade dos microrganismos metanogênicos após uma exposição de 500 mg/l, retornando a 66% da atividade inicial. O grupo das bactérias redutoras de sulfato é mais resistente ao cromo que as metanogênicas, este grupo é capaz de suportar concentrações superiores a 250 mg/l de cromo total.

2.5.3.9 Tempo de Retenção

Segundo Salomon (2007) é o tempo necessário para a mistura ser totalmente digerida no digestor e ocorre quando a produção de gás é máxima, definindo a melhor qualidade digestora. Seu valor depende do substrato, tipo de digestor, além de outros fatores, e pode variar de 50 dias, em alguns tipos de digestores rurais, em apenas algumas horas, em certos digestores industriais.

O tempo de retenção combinado com a taxa de decomposição dos sólidos voláteis é responsável pela eficiência do digestor. O menor tempo de retenção e o maior de decomposição são resultados dos melhores digestores. O tempo de retenção é definido pela relação entre o volume do digestor e o volume da carga diária, e pode variar em função da adição de nutrientes, ou pela agitação e variação da temperatura da mistura no digestor.

2.5.3.10 Impermeabilidade ao Ar

Nenhuma das atividades biológicas dos microrganismos, inclusive, seu desenvolvimento, reprodução e metabolismo, exige oxigênio, que em cuja presença são eles, de fato, muito sensíveis. A decomposição de matéria orgânica na presença de oxigênio produz dióxido de carbono (CO_2); na ausência de oxigênio, produz metano. Se o biodigestor não estiver perfeitamente vedado a produção de biogás é inibida.

2.5.4 Reatores anaeróbios

Na Europa, no início dos anos 80, a biodigestão anaeróbia tornou-se atraente, pois possibilitou o tratamento de diferentes tipos de águas residuais de origem industrial. Em decorrência da ampliação de conhecimento na área, os sistemas anaeróbios de tratamento, notadamente os reatores de manta de lodo (UASB) e os filtros anaeróbios, foram melhorados, passando a ocupar uma posição de destaque. Diversos biodigestores anaeróbios de alto desempenho para o tratamento de águas residuárias tem sido propostos. Geralmente os reatores biológicos podem ser divididos em dois grupos distintos: os reatores de biomassa em suspensão e os reatores de biomassa fixa a um suporte inerte. Rizzo & Leite, (2004), apresenta a evolução ao longo dos anos dividindo em três gerações de reatores como mostra a Tabela 2.6.

Tabela 2.6 - Gerações de Reatores Anaeróbios

Reatores de 1ª Geração	Reatores de 2ª Geração	Reatores de 3ª Geração
Fossa Moura	Filtro Anaeróbio	Reator Anaeróbio de Leito Fluidizado
Tanque Séptico	Reator Anaeróbio de Fluxo	Reator Anaeróbio de Leito Expandido
Tanque Imhoff	Ascendente e Camada de Lodo (UASB)	
Lagoas Anaeróbias		
Reator Anaeróbio de Contato		

Fonte: Rizzo et. al (2004)

2.6 O BIOGÁS

Salomon (2007) comenta que o biogás era simplesmente encarado como um subproduto, obtido a partir da decomposição anaeróbia (sem presença de oxigênio) de resíduos orgânicos. No entanto, a crise ambiental, a ratificação do Protocolo de Quioto, a implementação do MDL⁸ e o rápido desenvolvimento econômico dos últimos anos, bem como a crescente elevação do preço dos combustíveis convencionais, vêm aumentando as pesquisas e investimentos na produção de energia a partir de novas fontes alternativas e economicamente atrativas que possibilitem a preservação dos recursos naturais esgotáveis.

O biogás proveniente da digestão anaeróbia de resíduos sólidos ou líquidos constitui uma fonte de energia alternativa, bem como contribui em muito na solução dos problemas ambientais, pois, reduz potencialmente os impactos da fonte poluidora. Sua composição é uma mistura de gases onde o metano e o dióxido de carbono estão em maiores proporções. O potencial energético do biogás está em função da quantidade de metano contida no gás que determina o seu poder calorífico. O teor de metano varia de 40 a 75% dependendo da fonte geradora. A quantidade de biogás produzido na biodigestão corresponde somente de 2,0 a 4,0% do peso da matéria orgânica utilizada no processo (Castanón, 2002). Sua composição média é apresentada na Tabela 2.7.

Tabela 2.7 - Composição média do biogás de diferentes resíduos orgânicos

Gases	Porcentagem (%)
Metano	40-75
Dióxido de Carbono	25-40
Nitrogênio	0,5-2,5
Oxigênio	0,1-1,0
Ácido Sulfídrico	0,1-0,5
Amônia	0,1-0,5
Monóxido de Carbono	0-0,1
Hidrogênio	1,0-3,0

Fonte: Castanon, (2002)

⁸ Instrumento de mercado utilizado para promover reduções de gases de efeito estufa de maneira economicamente mais eficiente no âmbito global. Trata-se de um sistema de compensações que autoriza empresas dos países desenvolvidos a cumprirem suas metas de redução de emissões, assumidas no Protocolo de Quioto, através do incentivo ao investimento em tecnologias de baixa intensidade de carbono nos países em. (UNICA, 2009). Atualmente, o acordo de Paris é o novo incentivador para as políticas mundiais de redução das emissões de gases do efeito estufa.

O poder calorífico do biogás varia na faixa de 22.500 a 25.000 kJ/Nm³⁹, sua potencialidade é demonstrada quando tratado, pois o seu poder calorífico pode chegar a 60% do poder calorífico do gás natural, dependendo do teor de metano. A Tabela 2.8 apresenta uma comparação entre os PCI's de diferentes gases.

Tabela 2.8 - PCI de diferentes gases

Gás	PCI (kcal/Nm³)	PCI (kJ/Nm³)
Metano	8500	3558
Propano	22000	92109
Butano	28000	117230
Gás Natural	7600	31819
Biometano	5500	23027

Fonte: Castanon (2002)

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 (ácido sulfídrico – H₂S). No Brasil o limite de emissão para os sulfetos, segundo o Conselho Nacional do Meio Ambiente, não pode ultrapassar 1,0 mg/l S. As substâncias que contem enxofre, usualmente são consideradas poluentes do ar e podem ser classificadas da seguinte forma: SO₂, SO₃, H₂S, sulfatos. 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 (SO₂) (Padrão primário – 365 µg/m³ e Padrão secundário – 100 µg/m³ em 24 horas), também considerado como produto da combustão do biogás e nocivos a 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 difícil seu transporte e armazenamento. A Tabela 2.9 mostra a equivalência energética de 1 Nm³ de biogás com outras fontes.

⁹ Nm³ é medido em condições normais de temperatura e pressão (CNTP)

Tabela 2.9 - Equivalência entre 1 Nm³ de Biogás e outras fontes energéticas

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

Fonte: Adaptado de Pompermayer (2000).

Segundo CENBIO, 2001, de uma forma geral, a produção de energia elétrica a partir de biogás apresenta as seguintes vantagens:

Para a sociedade:

- Geração de empregos e eliminação ou redução de subempregos;
- Geração descentralizada e próxima aos pontos de carga, a partir de uma fonte renovável que vem sendo tratada como resíduo;
- Colaboração para a viabilidade econômica do saneamento básico.

Para as prefeituras:

- Possibilidade de receita extra, proveniente da energia gerada com biogás e vendida às concessionárias;
- Contribuição para a viabilidade econômica do tratamento dos resíduos (urbanos, rurais e industriais);
- Menor rejeição social das instalações de saneamento, uma vez que elas passam a ser gerenciadas de forma melhor, representando um exemplo a ser seguido.

Para as estações de tratamento de esgotos, gerenciadoras de aterros e outras:

- Redução na quantidade de eletricidade comprada da concessionária;
- Possibilidade eventual de venda de eletricidade à rede;
- Possibilidade de uso de processos de cogeração, ou seja, a geração de eletricidade tem como subproduto calor, a ser utilizados em processos, ou mesmo, ser vendido a terceiros.

Para o meio ambiente:

- Redução das emissões de metano para a atmosfera, pois este é um importante gás de efeito estufa. O seu potencial de aquecimento global é muito maior que o de CO₂;

- Redução do consumo de combustíveis fósseis, principais responsáveis pelo efeito estufa;
- Redução na geração de odor para as vizinhanças, de chorume e de contaminação do lençol freático;

As principais barreiras existentes são as seguintes:

Tecnológicas:

- Limpeza do gás;
- Necessidade de planta de demonstração no país.

Econômicas:

- Investimento elevado dependendo da fonte de biogás;
- A análise econômica convencional desconsidera benefícios ambientais (emissões de metano – saneamento).

2.6.1 Limpeza do Biogás

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 de energia gerada. Além destes, também há a presença de gás sulfídrico (H_2S), que pode acarretar corrosão, diminuindo tanto o rendimento, quanto a vida útil do motor térmico utilizado. A maioria dos digestores anaeróbios produz um biogás que contém entre 0,3 a 2% de H_2S , observando-se também a presença de traços de nitrogênio e hidrogênio (Coelho, 2004).

Dependendo da aplicação faz-se necessário a purificação do biogás, removendo o H_2S , CO_2 , e a umidade, ou seja, remoção de partículas que prejudiquem a eficiência da combustão. Como é o caso dos cenários de injeção da rede de gás natural e substituição de combustíveis dos veículos (caminhões/tratores/frota leve). Já para os motores de ciclo Otto, não se faz necessário à purificação. As práticas mais utilizadas estão apresentadas na tabela 2.10.

Tabela 2.10 – Práticas utilizadas para purificação do Biogás

Tipo	Método
Remoção de Umidade	Utilização de glicóis, sílica gel, etc.
Remoção de CO ₂	Absorção física
	Absorção química
	Adsorção sobre superfície sólida
	Separação por membranas
	Separação criogênica
	Método de conversão química
	Separador supersônico
Remoção de H ₂ S	Processos de oxidação a seco
	Processos de oxidação na fase líquida
Remoção de Partículas	Lavadores tipo torre
	Lavadores centrífugos
	Lavadores Venturi

Fonte: Adaptado Salomon (2007)

2.6.2 Compressão e Armazenamento do Biogás

O biogás contendo principalmente metano não pode ser facilmente armazenado e nem liquefeito a pressão e temperatura ambiente (temperatura crítica de -82°C e pressão 47,5 bar). Os sistemas de armazenamento mais comumente utilizados são apresentados na Tabela 2.11.

Tabela 2.11 - Sistemas de armazenamento de biogás

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

Fonte: Kapdi (2004)

Khapre (1989) conduziu um estudo sobre lavagem e compressão do biogás e subsequentemente usado para cocção de alimentos. Durante a limpeza e compressão do biogás foi reduzido de 0,591 m³ para 0,353 m³ para o uso de uma família de seis pessoas. Ele estocou o biogás limpo e comprimido a uma pressão de 7 bar em um cilindro com capacidade de 0,1 m³.

Um experimento na Bélgica feito com dejetos de aves domésticas, onde o biogás limpo e comprimido foi estocado em um tanque de aço de 0,2m³ a uma pressão de 4 bar (Anonymous 1985 apud Kapdi, 2004).

Segundo Alves, 2000 e Capstone, 2001, para utilização do biogás é necessário se fazer a purificação através das seguintes técnicas (Tabela 2.12):

Tabela 2.12 - Técnicas de remoção de impurezas do biogás

Tipos de Impureza	Descrição Geral	Detalhes
Água	Adsorção	Sílica Geral
		Peneira Molecular
		Alumina
	Absorção	Etileno Glicol Temperatura -6,7°C Selexol
Hidrocarbonetos	Refrigeração	Resfriamento a 2°C
	Adsorção	Carvão Ativado
		Óleo Leve
		Etileno Glicol Selexol
CO ₂ e H ₂ S	Absorção	Temperatura -6,7°C e -33,9°C
		Refrigeração com etileno glicol e adsorção em carvão ativado
		Combinação
	Absorção	Solventes Orgânicos
		Selexol
		Flúor
		Rectisol
		Soluções de sais alcalinos
		Potássio a alta temperatura
Siloxina	Adsorção	Alcanolaminas
		Mono, di, tri etanol amina
		Deglicolamina
		Ucarsol – CR (solvente)
	Adsorção	Peneiras Moleculares
		Carvão Ativado
	Separação por membranas	Membrana de Fibra oca
	Adsorção	Carvão Ativado

Fonte: Alves, (2000), Capstone (2001).

2.6.3 Medidas de Segurança para Utilização do Biogás

O grande perigo na utilização do biogás é quanto a explosões, devido a seus componentes quando o metano entra em contato com o ar. Conforme relata

Salomon (2007) a literatura sugere que a concentração de metano seja mantida fora da faixa de 5-15% (em volume) e a de oxigênio inferior a 3-15%. A atenção maior deve se concentrar para não ocorrer a entrada de ar nas etapas de transporte, armazenamento ou tratamento. As principais medidas de segurança para os sistemas com biogás são:

- Evitar vazamentos utilizando materiais adequados para execução dos reatores, armazenamentos e transporte dos gases;
- Instalar de para-raios;
- Treinar regular do pessoal que opera no sistema de tratamento;
- Sinalizar adequadamente as áreas de maior perigo;
- Evitar aumento da temperatura do biogás nas etapas de armazenamento e transporte;
- Instalar de equipamentos corta-chamas na sucção de gases ou em setores em que se prevê a compressão dos gases;
- Instalar os *flares* longe de vias de circulação, cercados e equipados com dispositivos corta-chamas;
- Prever drenos para a extração de vapores condensados da mistura de gases.
- Fazer monitoramento da composição do biogás;
- Desenvolver os critérios de segurança e execução por empresas especializadas;
- Respeitar normas relativas a projeto de sistemas de gases combustíveis.

2.6.4 Qualidade do Biogás

A utilização do biogás na geração termelétrica requer atenção pelo conteúdo de ácido sulfídrico (H_2S) e pela umidade contida no biogás. Muitos pesquisadores recomendam o limite de H_2S de 10 ppm ou 0,01% em volume (Cummins, 1985). Por este principal motivo se recomenda a limpeza prévia do biogás antes de qualquer utilização em máquinas térmicas. Se estes limites forem excedidos não se pode garantir um bom funcionamento dos motores de combustão interna. Já para

tecnologias avançadas de geração deve-se fazer a remoção total destas substâncias. Segundo a Capstone (2007), microturbinas com potência elétrica de 65 kW, permitem um conteúdo máximo de H₂S no biogás de 5000 ppmv.

Os principais contaminantes do gás dos digestores anaeróbios para o uso em células a combustível e microturbinas a gás são os compostos halogenados e o enxofre. Outros potenciais contaminantes que necessitam serem eliminados são sólidos, líquidos água e condensado, e bactérias que podem estar presentes no biogás. Segundo Spiegel (1999), os valores máximos permissíveis para estes contaminantes em células a combustível são mostrados na Tabela 2.13.

Tabela 2.13 – Qualidade do biogás, concentração limite de contaminantes

Contaminantes do Biogás	Requerimentos para o uso em células a combustível ^(a)	Comentário
H ₂ S	<4ppmv ^(b)	Degradação do catalisador do processamento do combustível por reforma
Halogenos (F, Cl, Br)	<4ppmv ^(c)	Corrosão dos componentes do processamento de combustível
NMOCs ^(d)	<0,5%	Degradação dos catalisadores do processamento por deslocamento
O ₂	<4%	O excesso de oxigênio aumenta a temperatura do leito de combustível da célula
NH ₃	<0,5%	Desempenho do “stack” (pilha) da célula combustível
	<1 ppmv	Formação de NH ₃ no reformador
N ₂	<3,5%	Desempenho do “stack” (pilha) da célula combustível
H ₂ O	Remover umidade e condensado	Danos na válvula controladora de combustível; Transporte de bactérias fosfatadas
Bactérias / sólidos	Remover todos sólidos e bactérias	Possíveis estragos nas tubulações e leitos do processamento de combustível

a – Operando com biogás (composição: 60% CH₄, 40% CO₂); b - Com leito de óxido de zinco como protetor de enxofre; c – Com opcional leito protetor de halogenados no processamento de combustível; d – Composto orgânico Não-Metano

Fonte: Spiegel (1999).

A Tabela 2.14 apresenta os requerimentos de pré-tratamento do biogás para uma aplicação comercial em células combustíveis. O sistema utiliza um leito de absorção de enxofre para remoção de H₂S. Este leito dessulfurizador opera a temperatura e pressão ambiente e converte o H₂S em água e enxofre elementar via reação de Claus ($\text{H}_2\text{S} + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{S}_{(\text{s})}$). O elemento enxofre produzido é adsorvido por leito de carvão ativado. Um sistema de injeção de ar é requerido para controlar níveis de O₂, entre 0,3 0,5% em volume. Um filtro contracorrente é adicionado para remover os possíveis sólidos, bactérias e líquidos presentes no

biogás. Segundo Salomon (2007) os dados indicam uma alta capacidade de adsorção e alta eficiência de remoção de enxofre com 100% de remoção de H_2S . Mas para que ocorra o processo de remoção do H_2S em enxofre, são requeridos baixos níveis de oxigênio. Testes indicam que somente 0,1% de O_2 é suficiente para iniciar o processo de absorção descrito anteriormente. O baixo tempo de residência corresponde a uma velocidade do gás de 15 - 18 m/min (metros por minutos).

Tabela 2.14 – Sistema de pré-tratamento para uso comercial

Contaminantes do Biogás	Faixa de concentração	Requerimentos do pré-tratamento
Enxofre (H_2S)	> 200 ppmv	Redução do conteúdo de enxofre para < 4ppmv
Halogenos (F, Cl, Br)	> 4 ppmv	Não requer tratamento se for usado um leito protetor de halógenos
NMOC's(a)	Baixos ppm	-
O_2	<0,5%	-
	<0,5%	Requer atenção
NH_3	-	-
N_2	>4%	-
H_2O	Saturada 35-43°C	Remover condensados
Bactérias / sólidos	Talvez presente no gás	Remover sólidos e umidade
a- Compostos Orgânicos Não-Metano.		

Fonte: Spiegel (1999).

Salomon (2007) comenta que três pontos importantes devem ser levados em consideração quando se utiliza biogás em células combustíveis. O primeiro é a adição de um sistema de pré-tratamento do biogás para remoção do H_2S e compostos halogenados, como visto anteriormente. O segundo ponto é a presença de componentes mecânicos para o suprimento do biogás devido a um aumento no fluxo de gás resultante do aumento de CO_2 (menor poder calorífico). E o terceiro é a redução da eficiência da central termelétrica em aproximadamente 5% em comparação com uma central a gás natural, devido também ao menor poder calorífico. Uma consequência disto é a redução da eficiência e um aumento da quantidade de calor que pode ser recuperável pela central.

Um módulo de uma central termelétrica com célula combustível de 200 kW operando com biogás em substituição ao gás natural pode ser projetado sem a necessidade de mudanças tecnológicas. O projeto poderia requerer alguns componentes para acomodar um aumento do fluxo de gás com um mínimo de queda de pressão. A Tabela 2.15 apresenta uma comparação do desempenho de uma central termelétrica com célula combustível operando com biogás e gás natural.

Tabela 2.15 - Desempenho da célula combustível com potência de 200 kW

Parâmetros	Central Termoeleétrica a Gás Natural	Central Termoeleétrica a Gás de Digestão Anaeróbia (Biogás)
Eficiência Elétrica (LHV) (%)	40,0	38,0
Heat Rate (HHV) (kcal/kWh)	2395	2495
Calor disponível (kcal/h)	190000	200000
Temperatura ambiente recuperação de água (°C)	35	35
Combustível "Startup"	Gás natural	Biogás

Fonte: Spiegel (1999).

As emissões atmosféricas estimadas da utilização de células combustíveis operando com biogás são apresentadas na Tabela 2.16.

Tabela 2.16 - Emissões estimadas de células combustíveis

Poluentes	Emissões kg/GJ (Biogás)
NO _x	0,000703
SO _x	Não detectado
Particulados	Não detectado
CO	0,1032
Hidrocarbonetos (exceto metano)	0,0000165

Fonte: Spiegel (1999).

2.7. TECNOLOGIA DE CONVERSÃO ENERGÉTICA DE BIOGÁS

Como analisa Poveda (2014), existem diferentes tecnologias de conversão energética de biogás, estando cada uma delas em diferentes estágios de desenvolvimento ou comercialização. Serão apresentadas a seguir resumidamente as características mais importantes de algumas tecnologias disponíveis:

- a) Motor de combustão interna alternativo:** São máquinas simples e robustas, sendo os equipamentos mais utilizados para queimar biogás por sua flexibilidade. Podem utilizar diversos tipos de combustíveis líquidos ou gasosos tais como óleo diesel, óleo pesado, gás natural, biogás ou ainda uma mistura deles. Normalmente são utilizados para fornecer pequenas e médias potências elétricas, da ordem de centenas de kW até dezenas de MW. A eficiência dos motores praticamente não é alterada com as condições

ambientais como são as turbinas a gás (Pecora, 2006). O problema desta opção é seu consumo de óleo lubrificante e as manutenções frequentes.

- b) Caldeiras:** A adaptação desses equipamentos para uso do biogás pode ser realizada através de pequenas modificações. Os níveis de umidade do gás devem ser controlados com a instalação de purgadores e linha de condensado para impedir danos aos equipamentos e problemas na operação das caldeiras. Para a adaptação das caldeiras para a queima do biogás deve-se aumentar a vazão de combustíveis, uma vez que o biogás possui menor quantidade de metano que o gás natural. A instabilidade da chama, decorrente da menor concentração de metano e das flutuações na composição do biogás, pode ser controlada com a instalação de sensores ultravioletas que monitoram a chama da caldeira impedindo que esta apague, ou com o uso de um sistema de combustível auxiliar. A corrosão devido à umidade e ao ácido sulfídrico presentes no biogás é outro problema para as caldeiras. O revestimento do pré-aquecedor e da chaminé com material anticorrosivo, o controle da temperatura dos gases de exaustão acima do ponto de orvalho e a circulação adequada da água podem reduzir os efeitos corrosivos (USEPA, 1991).
- c) Microturbinas a gás:** As microturbinas são fabricadas na faixa de potência de 15 a 200 kW. O conteúdo de metano não afeta a eficiência, desde que o teor volumétrico do CH_4 seja superior a 35% (Pecora, 2006). O custo por potência instalada é consideravelmente superior ao motor (Cenbio, 2017).
- d) Uso veicular do biogás:** Uma vez extraído o biogás, o metano pode ser utilizado em motores de veículos nas mesmas condições que o gás natural. Existe a possibilidade de transformar veículos a etanol/gasolina e a diesel para seu funcionamento com metano, fazendo modificações no tanque de armazenagem de combustível, no motor e no chassi. Para o armazenamento do gás, este é comprimido de 240 bar a 245 bar antes de ser bombeado para os cilindros de alta pressão. Os motores de ciclo otto que utilizam a gasolina podem ser facilmente modificados para o funcionamento com metano,

trocando o sistema de injeção de combustível e regulando os sensores e computadores que ajustam a mistura de ar e combustível. No caso dos motores diesel, existem duas possibilidades de modificação para operar com metano: operação bi-combustível (diesel-metano) com ignição por injeção de combustível piloto, e funcionamento unicamente a gás utilizando ignição por faísca. No primeiro caso, a tecnologia diesel dual-fuel utiliza o diesel como chama piloto e o gás natural como combustível principal, sendo necessária a modificação do sistema de injeção eletrônica de combustível. No segundo caso o motor tem que ser transformado para ciclo otto, retirando os injetores, colocando velas de ignição e um gás carburador, além de diminuir a taxa de compressão.

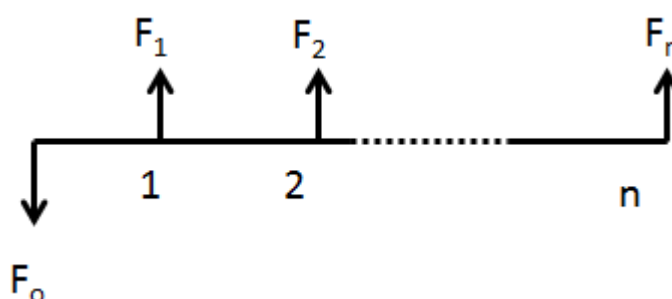
2.8. VIABILIDADE ECONÔMICA

Como analisa Luzio (2011), ao se realizar a análise de viabilidade econômica de determinado projeto, verifica-se a capacidade do projeto oferecer sucesso econômico/financeiro, ou seja, qual o tempo necessário para se pagar os investimentos efetuados no referido projeto.

Como cita Rabelo (1987), o projeto só é viável se remunerar adequadamente o capital investido, tornando os benefícios maiores que os custos. Para se efetuar um estudo de viabilidade econômica, devem-se fazer estimativas de todo o gasto envolvido com o investimento inicial, operação e manutenção e receitas geradas durante um determinado período de tempo, para assim montar-se o fluxo de caixa relativo a esses investimentos, custos e receitas e determinar quais serão os indicadores econômicos conseguidos com esse empreendimento. As ferramentas consideradas necessárias para se efetuar um estudo de viabilidade econômica são: Fluxo de Caixa, Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e Cálculo do *Payback* Descontado.

2.8.1 Demonstração de Fluxo de Caixa (DFC)

Como ressalta Marion (1998), no cálculo de viabilidade econômica, torna-se necessária a Demonstração de Fluxo de Caixa (DFC), pois indica a origem de todo o dinheiro que entrou no caixa, bem como a aplicação de todo o dinheiro que saiu do caixa em determinado período, e, ainda o resultado do fluxo financeiro. É a representação das contribuições monetárias (entradas e saídas de dinheiro) ao longo do tempo. Pode ser representado conforme a Equação 2.1, sendo: F_n = caixa líquido e/ou valor residual de ordem n ; F_o = investimento inicial; n = período.



Equação 2.1 - Representação do fluxo de caixa

sendo:

F_n = caixa líquido ou valor residual de ordem n ;

F_o = investimento inicial e

n = número de períodos.

A Demonstração do Fluxo de Caixa resume as entradas e saídas efetivas de dinheiro ao longo de um determinado período ao qual o projeto foi planejado, permitindo conhecer a sua rentabilidade e viabilidade econômica. Neste sentido, os fluxos de caixa representam a renda econômica gerada pelo projeto ao longo de sua vida útil.

2.8.2 Valor Presente Líquido (VPL)

O cálculo do Valor Presente Líquido (VPL) consiste em determinar o valor no instante inicial, descontando o fluxo de caixa líquido de cada período futuro gerado

durante a vida útil do investimento, segundo uma taxa de juros i , obtendo o valor atualizado dos custos e receitas de uma alternativa proposta. O VPL maior ou igual a zero indica a viabilidade econômica do empreendimento, uma vez que gera retorno igual ou maior que o custo de capital investido. Quando um projeto apresenta o VPL menor que zero, seu retorno é inferior a seu custo de capital e ele deixa de ser viável (HOJI, 2010). A expressão do Valor Presente Líquido é representada a seguir:

$$VPL = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+i)^t}$$

Equação 2.2 - Formula do Valor Presente Líquido

sendo:

VPL = Valor Presente Líquido

FC_t = fluxo de caixa no período t

t = enésimo período no tempo em que o dinheiro será investido no projeto (começa no período 1, quando há efetivamente o primeiro fluxo de dinheiro)

n = número de períodos t

i = taxa de juros.

2.8.3 Taxa Interna de Retorno (TIR)

Como cita Rebelatto (2004), a Taxa Interna de Retorno (TIR) é a taxa de desconto que torna o valor atual líquido (VPL) do investimento igual a zero. É o percentual de retorno obtido sobre o saldo obtido e ainda não recuperado em um projeto de investimento. Matematicamente a TIR é a taxa de juros que torna o valor presente das entradas de caixa igual ao valor presente das saídas de caixa do projeto de investimento.

É a taxa que torna equivalente o investimento inicial ao fluxo de caixa subsequente, ou seja, torna nulo o VPL do projeto dentro de um período de tempo estipulado (Santos, 1999).

Rebelatto (2004) complementa que a TIR deve ser comparada com a Taxa Mínima de Atratividade (TMA), para aceitação ou não do projeto.

A TIR de um investimento pode ser:

- maior do que a taxa atrativa mínima: significa que o investimento é economicamente atrativo.
- igual a taxa atrativa mínima: o investimento está economicamente numa situação de indiferença.
- menor do que a taxa atrativa mínima: o investimento não é economicamente atrativo, pois seu retorno é superado pelo retorno de um investimento sem risco. Logo, quanto maior a TIR, melhor será o investimento.

A TIR pode ser expressa como:

$$0 = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+TIR)^t} - I_0$$

Equação 2.3 - Formula da Taxa Interna de Retorno

sendo:

FC_t = valor presente das entradas de caixa

I_0 = investimento inicial

k = taxa de desconto (taxa de juros)

t = tempo de desconto de cada entrada de capital

n = tempo de desconto do último fluxo de caixa

2.8.4 Cálculo do *Payback* Descontado

O *Payback* Descontado é um indicador que determina o prazo de recuperação de um investimento levando em conta a taxa de desconto para os fluxos de caixa de cada período, também chamado de payout, segundo (MOTTA & CALLOBA, 2002).

É utilizado para avaliar a atratividade de um investimento, que se combinado com outros indicadores demonstra a relação entre valor e tempo de retorno dos investimentos.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. OBJETO DE ESTUDO

O objetivo principal deste estudo é avaliar a viabilidade técnica e econômica do uso da vinhaça para a produção de biogás em uma empresa do setor sucroenergético da região de Piracicaba/SP.



Figura 3.1 - Vista aérea da Usina
Fonte: Arquivo pessoal

Situada na região de Piracicaba e pertencente a um dos principais grupos do setor sucroenergético, esta usina está em operação há mais de 70 anos. Atualmente, sua moagem é de aproximadamente 3 (três) milhões de toneladas de cana/safra, e somada com as outras plantas industriais do grupo, moem aproximadamente 24 milhões de toneladas/safra. O Grupo possui 3 (três) unidades no Estado de São Paulo e 1 (uma) no Estado de Goiás.

A usina, em estudo, já possui um concentrador de vinhaça em operação o qual possibilitou o manejo da vinhaça em áreas mais distantes e atualmente possui uma planta piloto para a produção do biogás a partir da vinhaça, subproduto do

processo de produção do etanol, na qual estudos vêm sendo desenvolvidos estudos para avaliar a viabilidade técnica e econômica para a produção do biogás em escala industrial. A capacidade nominal do projeto piloto é de 5 m³/h de vinhaça e produção teórica é de 30 (trinta) Nm³/h de biogás.

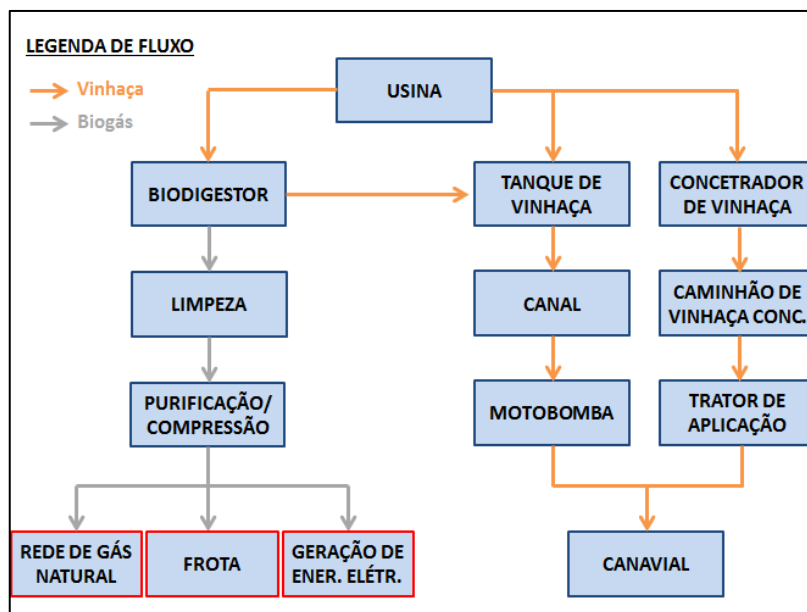


Figura 3.2 - Fluxograma de processo da vinhaça e biogás
Fonte: Autor, 2017

3.2 PRODUÇÃO DE BIOGÁS – PLANTA PILOTO

Optou-se por realizar os estudos para este trabalho baseando-se em dados e informações técnicas disponibilizadas pelo fabricante da tecnologia, além de resultados analíticos obtidos nas safras 16/17 e 17/18 na planta piloto existente, para a análise técnica e econômica na produção de biogás a partir da vinhaça.

3.2.1 Informações técnicas do reator anaeróbico

A tecnologia utilizada para a produção do biogás é um reator anaeróbio de lodo granular que converte a biomassa em componentes orgânicos (expresso em DQO) da vinhaça em biogás.

A vinhaça é bombeada e introduzida no sistema de alimentação do reator anaeróbico (Influente), onde é misturado com a biomassa. Existe um separador secundário que recircula o efluente com a bomba (*recycle pump*).

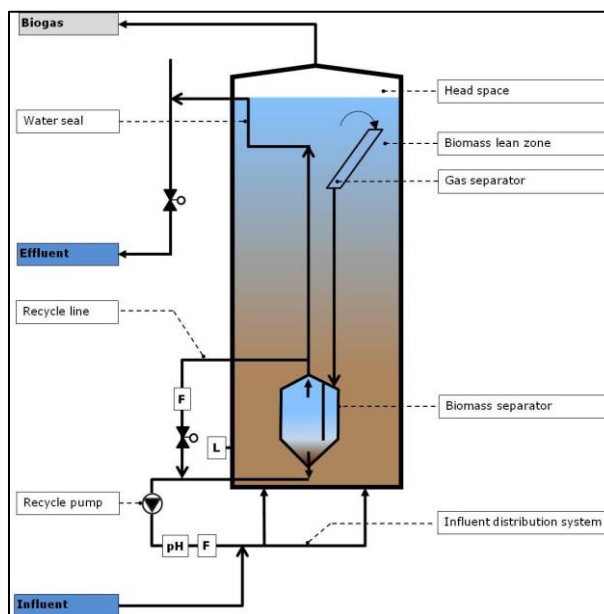


Figura 3.3 - Fluxograma do biodigestor de leito expandido de alta taxa
Fonte: Projeto piloto instalado na empresa

A mistura de vinhaça reciclada (efluente/biomassa) e o afluente bruto são direcionados para o reator através do sistema de distribuição do afluente. Este sistema garante uma distribuição uniforme da vinhaça que entra através da parte inferior do reator e, ao mesmo tempo, fornece a mistura em forma de energia. O efluente reciclado fornece uma capacidade “*buffer*” (alcalinidade), a fim de evitar flutuações do pH e também proporciona uma diluição da DQO do afluente.

Após a entrada dos efluentes, os mesmos são distribuídos na parte inferior do reator, que são direcionados para a parte superior passando pelo leito de lodo expandindo (biomassa). Nesta etapa, os componentes orgânicos são convertidos em biogás pela biomassa granular. As bolhas de biogás sobem, através do reator, chegando à câmara de biogás localizada na parte superior do equipamento (Head space). Na seção superior do reator, existe um separador primário relativamente pequeno que pode ser preenchido com biomassa granular, sem perdas de biomassa. Isto garante uma elevada concentração de biomassa em todo o reator, conduzindo assim a uma elevada capacidade de conversão de DQO. O biogás produzido é coletado no espaço superior do tanque reator e deixa o equipamento através da saída de biogás.

Na seção superior do reator a mistura de vinhaça/biomassa/biogás é direcionada para dentro da unidade de separação primária posicionada logo abaixo da superfície da vinhaça. Nesta unidade, o gás é removido e a mistura de vinhaça/biomassa é direcionada para baixo, para a unidade de separação secundária posicionada na parte inferior do reator.

O efluente tratado deixa o separador secundário na parte superior da unidade, após ser dividido em efluente final e reciclar parte da vazão. A biomassa concentrada é coletada no separador e posteriormente misturada com os efluentes reciclados, posteriormente é bombeada de volta para o leito de biomassa junto com os efluentes.

Por fim, os efluentes do separador secundário são direcionados para a parte superior do reator onde sai através de um selo de água. No caso do fluxo afluente ser reduzido ou interrompido, uma maior quantidade de efluente pode ser reciclado de modo que as condições hidráulicas no reator e a unidade de separação permaneçam relativamente estáveis.

A conexão entre a tubulação do reator e de sistema de reciclo tem a finalidade de realizar o enchimento e drenagem do reator. Desta forma, durante o enchimento/drenagem, deve ser aberta para evitar que as diferenças de nível de água, e por tanto, manter as diferenças de pressão entre o separador secundário e o reator. Durante a operação normal esta válvula é fechada. As unidades do decantador secundário e primário podem ser limpos no próprio local por meio de injeção de nitrogênio, através de válvulas localizadas na unidade de separação primário e também válvula instalada na unidade de separação secundária.



Figura 3.4 - Foto do biodigestor piloto implantando
Fonte: Autor, 2017

3.2.2 Informações técnicas do dessulfurizador

O dessulfurizador é um processo biotecnológico para a remoção de gás sulfídrico (H_2S) presente em diferentes gases, convertendo H_2S em enxofre elementar (S). O processo utilizado na planta piloto é similar ao processo de absorção com soda caustica tradicional. No entanto a soda caustica é regenerada biologicamente num biorreator aeróbico por bactérias.

A metodologia para avaliação da dessulfurização do biogás seguem as seguintes premissas:

- Fluxo: 25-35 Nm^3/h de biogás
- Carga S (máxima): 24 kg S/dia
- Temperatura do gás: 25 – 40 °C
- CH_4 : 70%
- CO_2 : 28%
- Entrada H_2S : 20.000 ppmv
- Saída H_2S : ≤ 100 ppmv
- Perda de carga: 5,2 mbarg (teórica)

3.3 LEVANTAMENTO DE DADOS DA PRODUÇÃO DO BIOGÁS

O levantamento de dados para verificar a eficiência na produção do biogás se deu através de acompanhamento dos dados analíticos de produção realizada internamente pela usina e pela prestadora de serviço para operação da planta piloto.

Foram selecionados os principais parâmetros que possam influenciar na eficiência da produção do biogás referente a um período de safra completo, ou seja, safra 16/17 e informações da safra atual de 17/18.

Porém, para os dados do dessulfurizador e próximas etapas de purificação do biogás, não será possível apresentar dados analíticos, devido à recente instalação da etapa piloto de dessulfurização e à instabilidade dos processos para a remoção do H_2S .

Até o momento, não está sendo estudada tecnicamente a limpeza do CO_2 em planta piloto. Porém sabe-se que, posteriormente, com a planta de tratamento, as alternativas para remoção do CO_2 serão avaliadas para verificar a viabilidade técnica e econômica do uso da tecnologia.

Outros dados analíticos no uso do biogás serão avaliados. Importante destacar que a usina está realizando testes em motores adaptados para caminhões flex (diesel/gás). Porém, no momento está sendo utilizado o gás natural para avaliar a eficiência e o rendimento do motor. Além disso, a empresa já está em contato com os fabricantes (ex: FIAT, Volvo, Scania e Mercedes) para desenvolver projetos e parcerias para atender às expectativas do uso do biogás (biometano) a partir da vinhaça.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Considerando o potencial brasileiro de produzir 30 bilhões de litros de etanol - sendo que para 1 litro de etanol aproximadamente produz-se de 8 a 15 litros de vinhaça - o potencial de geração vinhaça no país é de aproximadamente 345 bilhões de litros de vinhaça.

De acordo com dados obtidos através deste trabalho e considerando a tecnologia implantada e os resultados da planta piloto, conclui-se que o Brasil tem potencial de produção de biogás a partir da vinhaça do setor sucroenergético de aproximadamente 5,5 trilhões de Nm³ de biogás¹⁰.

4.1. PRODUÇÃO DE BIOGÁS PLANTA PILOTO

Neste capítulo serão apresentados os resultados com as discussões de foram as operação do projeto piloto durante as safras 16/17 e 17/18.

Os gráficos 4.1 e 4.2 ilustram a composição da vinhaça produzida a partir da produção do etanol na usina em estudo. Foi realizada a avaliação dos parâmetros de DQO, temperatura, pH e condutividade.

Observou-se que o parâmetro de DQO presente na vinhaça na safra de 16/17 teve como média 36.000 mg/l e, na safra 17/18, média de 32.750 mg/l. Portanto, pode-se concluir que a eficiência de remoção de DQO da vinhaça pela tecnologia implantada é em torno de 70%, o que está dentro da expectativa do projeto proposto.

Para os parâmetros de temperatura, a safra de 16/17 teve como média 37,27 °C e, na safra 17/18, média de 39,75°C. Os valores encontram-se dentro do padrão de projeto para produção de biogás, não sendo necessária a instalação de uma torre de resfriamento para a planta industrial.

¹⁰ Considerando que para 1 litro de etanol gera-se em média 11,5 litros de vinhaça e para cada litro de vinhaça gera-se em torno de 16 Nm³ de biogás. (Geração de biogás obtida através da usina em estudos)

No caso dos parâmetros de pH e condutividade, houve pouca variação, não causando a interferência na produção do biogás, porém o parâmetro de pH é essencial para a produção do biogás na faixa ótima 6 a 8.

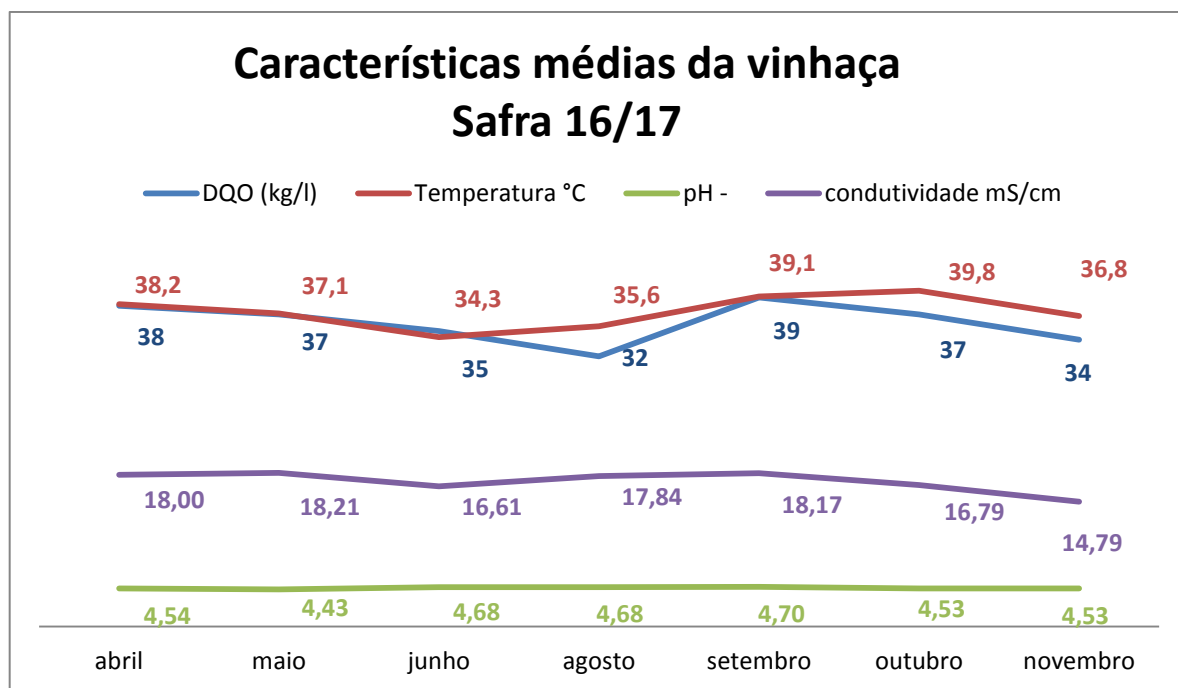


Gráfico 4.1 - Características médias da vinhaça – safra 16/17

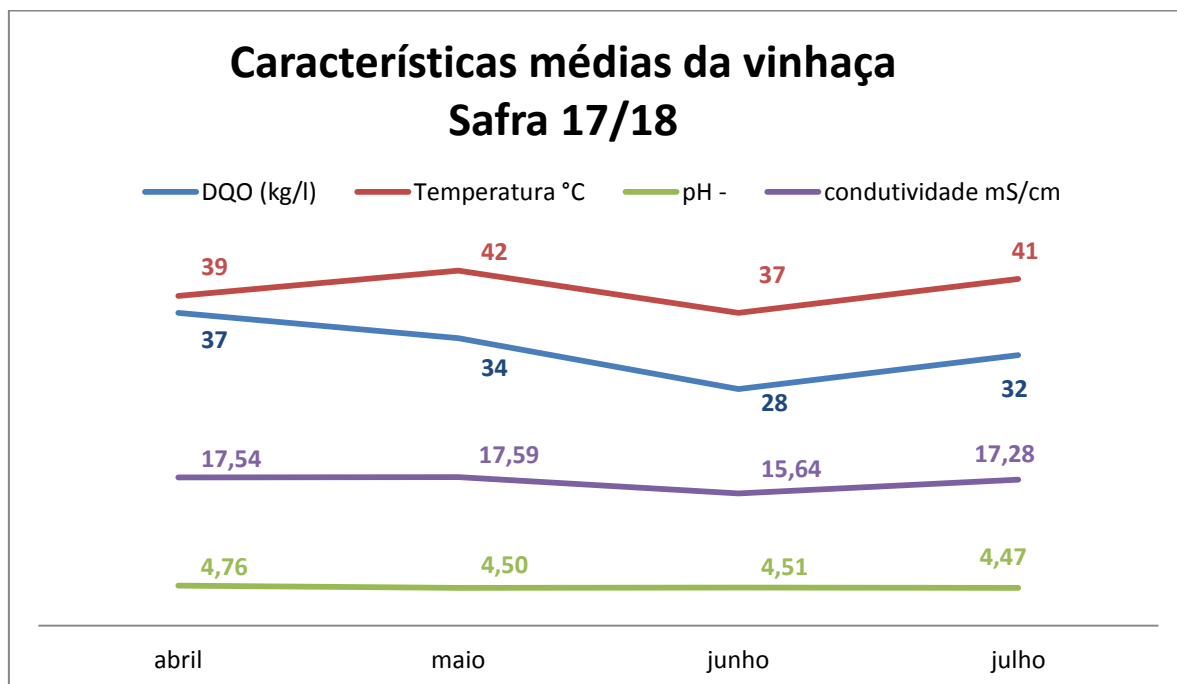


Gráfico 4.2 - Características médias da vinhaça – safra 17/18

Os gráficos 4.3 e 4.4 representam a produção de biogás em relação à alimentação de vinhaça no sistema.

Pode-se concluir que a grande produção biogás no mês de abril se deva à intenção da empresa desenvolvedora da tecnologia para a produção do biogás em apresentar resultados rápidos para a empresa.

Vale ressaltar que o objetivo principal da usina é a produção de açúcar, etanol e não o biogás. Mas, com este novo desafio de implantação do projeto, o grupo de trabalho da usina vem realizando trabalhos técnicos para avaliar a tecnologia e viabilizar o projeto.

Como pode ser observado no gráfico 4.3, no início do projeto (mês de abril de 2016), houve um pico na produção de biogás. Isto se deve a uma possível sobrecarga no reator para apresentar rápidos resultados e atender a expectativa da empresa. Porém, para os meses posteriores a produção do biogás diminuiu chegando até a inatividade do lodo (morte das bactérias acidogênicas e metanogênicas) e necessidade de substituição nos meses de julho/agosto de 2016.

Mesmo assim, no primeiro ano do teste do reator, houve uma produção de aproximadamente 30.248 m³ de biogás com a alimentação de 2.089 m³ de vinhaça.

Isto quer dizer que, com as características apresentadas no gráfico acima, houve uma relação de 14,47 Nm³ de biogás/ m³ de vinhaça introduzida na safra 16/17.

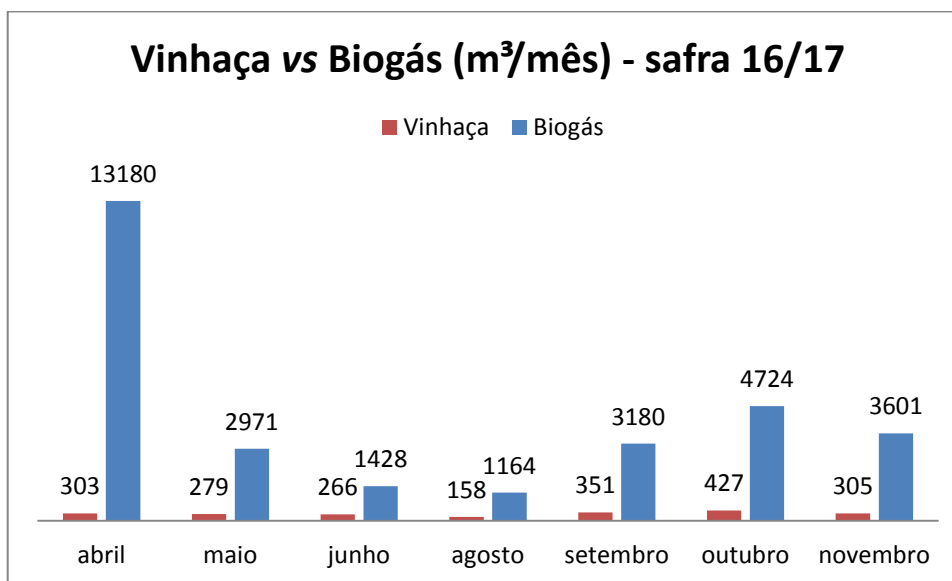


Gráfico 4.3 - Produção de biogás vs entrada de vinhaça – safra 16/17

Na safra 17/18, até o momento de conclusão deste trabalho, houve a produção do biogás de 46.610m³ com a utilização de 2.636 m³ de vinhaça. Ou seja, uma relação de 17,68 Nm³ de biogás/ m³ de vinhaça introduzida no sistema.

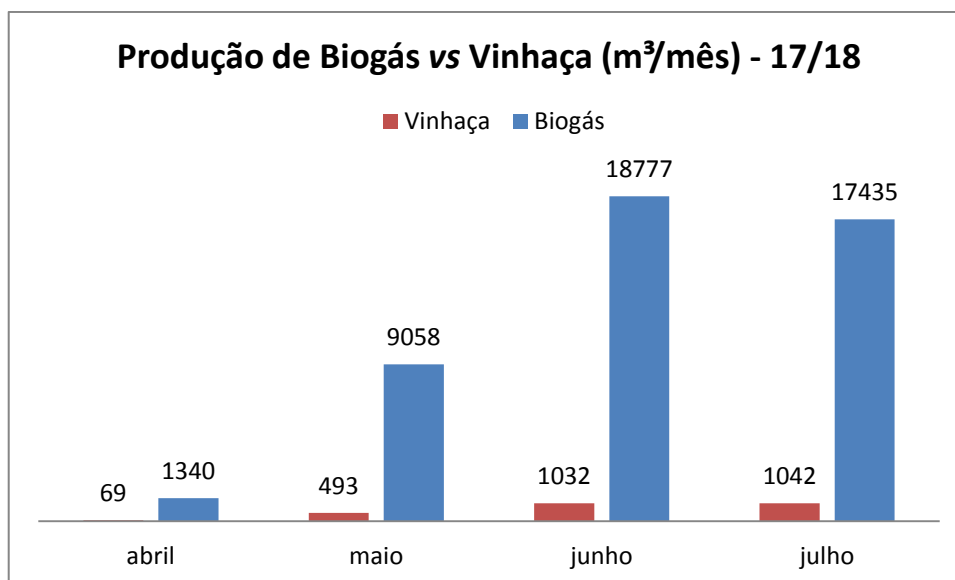
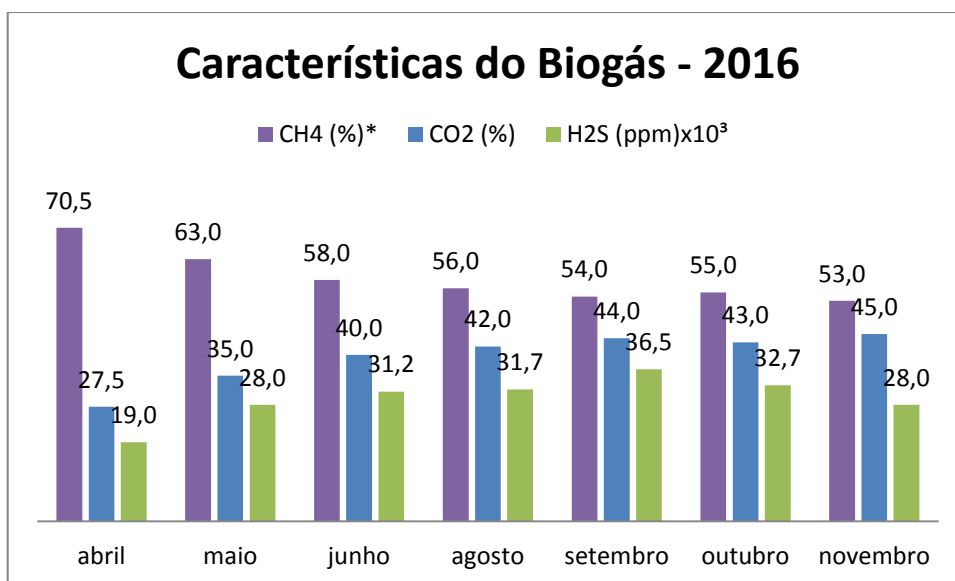
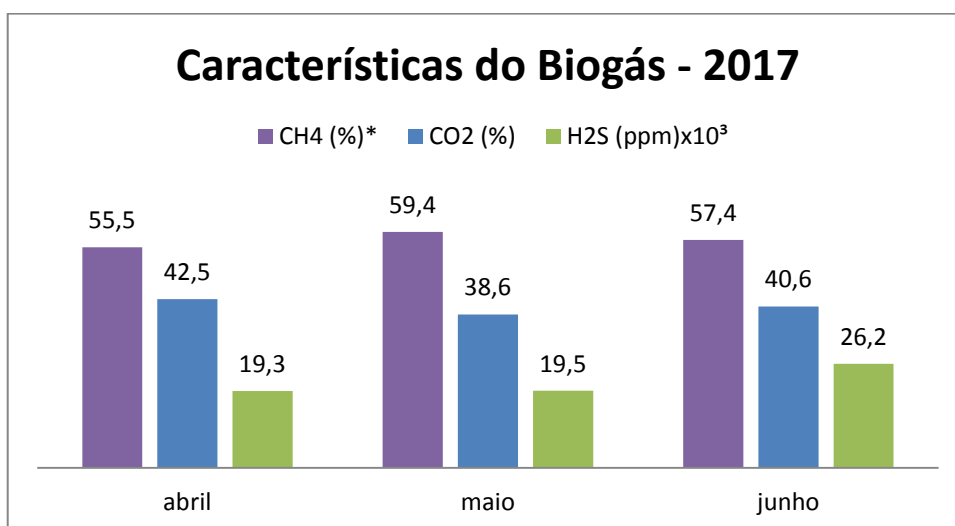


Gráfico 4.4 - Produção de biogás vs entrada de vinhaça – safra 17/18

Nos gráficos 4.5 e 4.6 serão apresentadas as características do biogás em parâmetros de CH₄ (%)*¹¹, CO₂ (%) e H₂S (ppm).

No primeiro ano de teste do reator, a característica média do biogás foi de 58,5% de CH₄, 39,5% de CO₂ e 29.585 ppm de H₂S. e no ano de 2017 57,4% de CH₄, 40,56% de CO₂ e 21.666 ppm de H₂S.

¹¹ Valor calculado a partir das premissas do projeto piloto em implantação na usina.

Gráfico 4.5 - Características do Biogás (CO₂ e H₂S) – safra 16/17Gráfico 4.6 - Características do Biogás (CO₂ e H₂S) – safra 17/18

Pode-se concluir, a partir dos gráficos 4.7 e 4.8, para o ano de 2016 e para o ano de 2017, que houve uma redução significativa no uso de soda caustica (NaOH) para o controle de pH. Isso se reflete diretamente nos custos do projeto quanto à utilização de insumos. Os outros insumos analisados (ácido fosfórico e micronutrientes) não tiveram representatividade para análise neste trabalho.

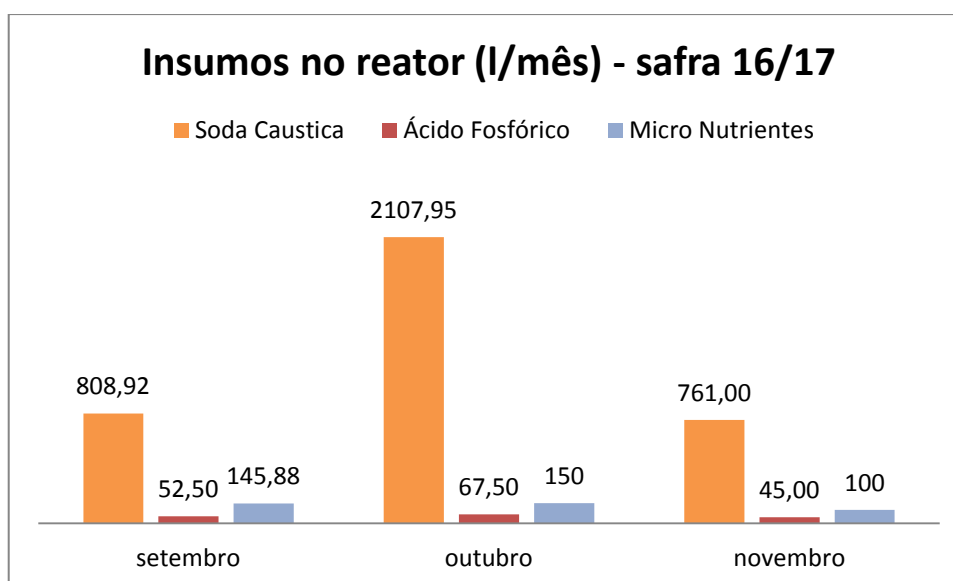


Gráfico 4.7 - Utilização de insumos no reator – safra 16/17

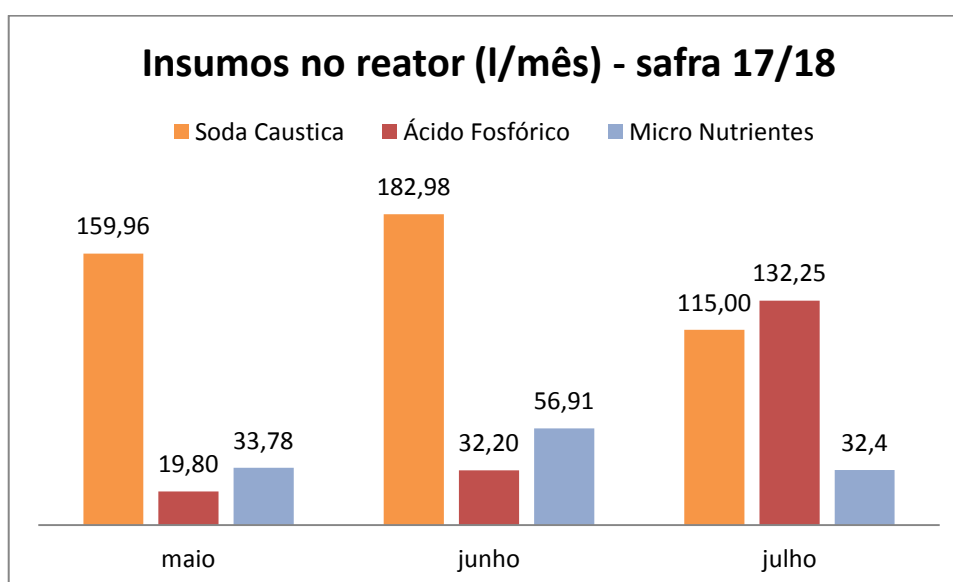


Gráfico 4.8 - Utilização de insumos no reator – safra 17/18

4.2 VIABILIDADE ECONÔMICA DA PRODUÇÃO E USO DO BIOGÁS

Neste capítulo, devido à falta de informações reais em escala industrial da usina em estudo, será avaliada a viabilidade econômica de dois cenários propostos por este trabalho a partir das informações existentes no trabalho de Poveda (2014), que aborda esta temática.

Serão considerados os custos de instalação, de operação e manutenção das diferentes alternativas tecnológicas, o preço de venda da energia elétrica, assim como do diesel e do gás natural. Desta forma, pretende-se avaliar se o processamento da vinhaça com aproveitamento energético é um investimento atrativo nas condições atuais.

Os indicadores calculados para a avaliação econômica de todos os cenários são o Valor Presente Líquido, o *Payback* descontado e a Taxa Interna de Retorno. Para cálculo destes indicadores é necessária a elaboração do Fluxo de Caixa das tecnologias proposta no estudo.

Importante esclarecer que os resultados oferecidos com o cálculo destes indicadores estão sujeitos a variações futuras uma vez que existem consideráveis incertezas, tais como a variação nos preços da energia, dos insumos, das taxas cambiais e das políticas públicas em desenvolvimento.

Para o cálculo dos indicadores foi considerada uma taxa de desconto de 15%, considerando a Taxa SELIC¹² de 11,65% ao ano, possibilitando uma margem de mais de 3% para as flutuações futuras desta taxa, para a porcentagem de lucro do banco prestamista e para a inflação contra a rentabilidade do projeto.

O valor adotado para a vida útil do projeto foi de 18 anos, sendo que, após esse período, os equipamentos não teriam valor residual.

O levantamento do preço dos equipamentos, assim como seus custos de operação e manutenção, foi realizado mediante revisão bibliográfica e informações existentes em Poveda (2014).

Importante destacar que os custos de implantação e operação de um concentrador de vinhaça não estão inclusos no escopo deste trabalho, uma vez que a implantação desta nova etapa do processo não necessariamente requer a implantação do processo de biodigestão da vinhaça.

¹²A Taxa referencial do Sistema Especial de Liquidação e de Custódia (SELIC) é também conhecida como a taxa básica de juros da economia brasileira. É a menor taxa de juros do país e serve de referência nos empréstimos feitos entre os bancos e também nas aplicações realizadas por estas instituições bancárias em títulos públicos federais.

4.2.1. Cenário 1: Biodigestão com geração de eletricidade

Para estudar a viabilidade econômica da instalação do cenário 1 (Biodigestão com geração de eletricidade), foram levantados os custos relativos a um sistema de Reator de Recirculação Interna, por ser, no presente momento, a mais eficiente tecnologia publicada no mercado, com respeito à remoção da matéria orgânica e a produção de biogás.

Também foram levantados os custos associados a um lavador biológico de gás, sendo este tipo de sistema de limpeza recomendado para a quantidade de H_2S presente no biogás proveniente da vinhaça, para a escala de produção manejada e para o tipo de uso final (FNR, 2010).

Quanto à geração elétrica, esta é prevista para ser realizada através de moto-geradores de combustão interna, devido a sua economia frente a outras tecnologias tais como as microturbinas (Coelho et al, 2006, e Salomon, 2007).

Assim, foram admitidas as informações existentes no trabalho de Poveda (2014) para um cenário de biodigestão com capacidade de tratar $4.000 \text{ m}^3/\text{dia}$ de vinhaça com $29 \text{ kg DQO}/\text{m}^3$ e que possua uma produção de biogás de $1.000 \text{ m}^3/\text{h}$,

Os custos da biodigestão, de limpeza do biogás e de geração elétrica a partir do mesmo são apresentados na tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Custos no cenário 1

	Preço Unitário	Unidades	Total
Instalação			
Biodigestor	R\$110/(kg DQO/dia)	116.000 kg DQO/dia	R\$ 12.760.000
Dessulfurizador	R\$1.330/(m^3/h)	$1.000 \text{ m}^3/\text{h}$	R\$ 1.330.000
Motogerador	R\$ 2.000/kW	1.300kW	R\$ 2.600.000
Custo total de instalação			R\$ 16.690.000
Operação e Manutenção			
Biodigestor + Dessulfurizador	R\$ 0,018 kg de DQO	27.840.000 kg DQO/ano	R\$ 501.120/ano
Motogerador	R\$ 40,00/MWh	7.550,4 MWh/ano	R\$302.016/ano
Custo anual O&M			R\$ 803.136/ano

Fonte: Adaptado de Poveda (2014)

Utilizando os valores da Tabela 4.1 e a quantidade de produção de energia elétrica, foi determinado o custo aproximado de geração do MWh_e neste cenário. Este custo de produção é determinado procurando o valor que faça nulo o VLP do investimento.

Tabela 4.2 – Indicadores financeiros do investimento no cenário 1

Investimento inicial	R\$ 16.690.000 ^a
Custo anual O&M	R\$ 803.136/ano ^a
Eletricidade vendida	6,6 GWh _e /ano ^d
Vida útil	18 anos ^c
Taxa de desconto	15% ^c
Custo de Produção da eletricidade	R\$540/MWh ^b

Fonte: a) Tabela 4.1; b) Cálculo Poveda (2014); c) Valores preestabelecido no estudo; d)

equação: $E_e/\text{ano} = (Q_{\text{biogás}}/\text{ano} \times \eta_{e/t}) - C_{e.\text{biog}}/\text{ano}$

Observa-se um elevado custo de produção de energia elétrica no cenário 1. Isto se deve aos valores conservadores de produção de biogás utilizados no trabalho de Poveda (2014). Na tabela 4.3, calcula-se este preço de produção assumindo valores mais otimistas dados pelos fabricantes de equipamentos, aumentado a proporção de metano no biogás, o rendimento do gerador e a produção de biogás por cada m³ de vinhaça.

Tabela 4.3 – Custo de produção da eletr. gerada com biogás de vinhaça

	Conservador	Otimista
% metano no biogás	50	65
Rendimento do motogerador	0,29	0,35
m ³ biogás/m ³ vinhaça	6	9
Eletricidade produzida/m ³ vinhaça	6,9 kWh _e /m ³	20kWh _e /m ³
Potencia instalada	1,3 MW	3,36 MW
Eletricidade vendida	6,6 GWh _e /ano	19,5 GWh _e /ano
Investimento Inicial	R\$ 16.690.000	R\$ 20.833.802
Custo anual O&M	R\$ 803.136/ano	R\$1.284.480/ano
Custo de produção do MWh	R\$540/MWh _e	R\$240/MWh _e

Fonte: Adaptado Poveda (2014)

Com esta tabela, pode-se avaliar a importância da melhora da eficiência do processo de biodigestão na produção de biogás. Caso sejam utilizados os dados da planta piloto este valor torna-se um pouco mais atrativo. Ainda assim, para o cenário mais que otimista o preço de energia elétrica gerada com o biogás é pouco competitivo se comparado com o preço indicado para as térmicas de bagaço¹³.

Até este momento da análise, não foi considerada economicamente a redução de emissões de GEEs que a implantação da biodigestão trará de

¹³ Em 2016, pela primeira vez no Leilão A-5, promovido pela Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel). O setor sucroenergético negociou energia do biogás produzido a R\$ 251,00/MWh (UNICA 2016).

benefícios, uma vez que atualmente o preço do *Certificate Emission Reduction* (CER) é praticamente nulo.

A seguir, realiza-se a avaliação dos preços que deveriam ter o MWh_e e o CER, para que a implantação desta tecnologia fosse economicamente atrativa, com um valor mínimo da TIR = 21%¹⁴.

Na figura 4.1 pode ser observada a relação que existe entre o preço do MWh_e e da tonelada de dióxido de carbono (tCO₂eq) evitada, para obter um investimento com uma TIR = 21%. Esta função indica os valores que devem adquirir as duas variáveis para manter a atrativa a geração de eletricidade com biogás de vinhaça, desde o ponto de vista econômico.

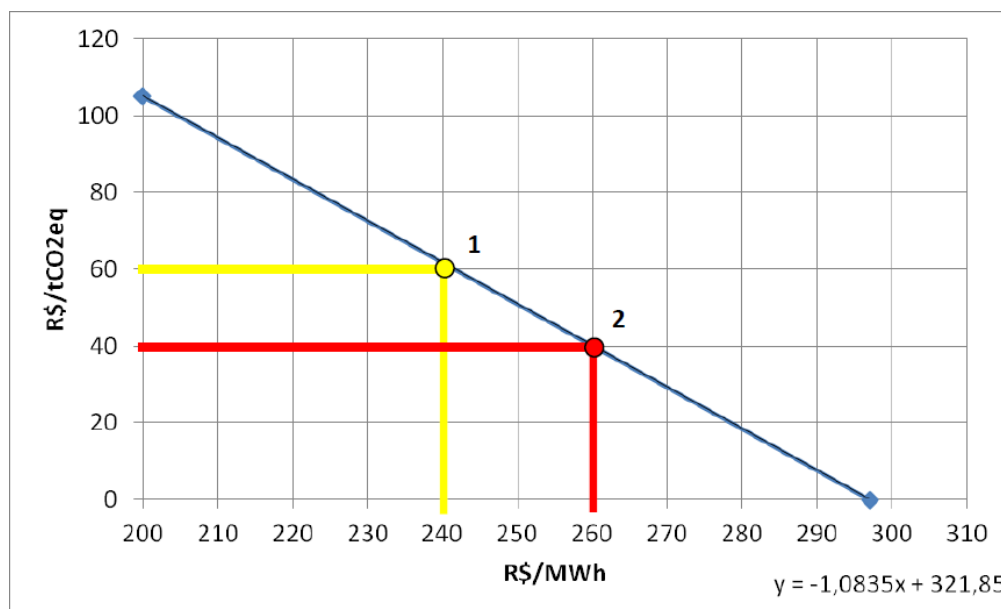


Figura 4.1 - Relação do preço da eletricidade e do CER para uma TIR=21%
Fonte: Adaptado Poveda (2014)

Na figura 4.1, foram adotados como exemplo dois pontos que fazem que a TIR do investimento seja igual a 21%. No ponto número 1, a eletricidade teria um preço de R\$240/MWh, sendo necessário que a CER atinja os R\$60/tCO₂eq. No ponto número 2, o preço da eletricidade seria de R\$260/MWh, correspondendo a um preço do CER de aproximadamente R\$40/tCO₂eq para que o projeto tenha atratividade.

¹⁴ Definição a partir de resultados de Poveda (2014) .

Por fim, a regulação do preço da eletricidade e das emissões no entorno destes valores criaria um cenário no qual o investimento na biodigestão com geração de eletricidade seria atrativo, como mostra a tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Variação em função do preço da eletricidade e das CERs.

Investimento inicial	R\$20.833.802	
Custo anual O&M	R\$ 1.284.480/ano	
Vida útil	18 anos	
Taxa de desconto	15%	
TIR	21%	
Ponto da Figura 4.1	1	2
Preço da eletricidade	R\$240/MWh _e	R\$260/MWh _e
Preço da CER	R\$60/tCO ₂ eq	R\$40/tCO ₂ eq
VPL	R\$6.872.708	R\$6.872.708
Payback descontado	9 anos	9 anos

Fonte: Adaptado Poveda (2014)

Portanto, esta tecnologia está próxima à viabilidade econômica, uma vez em que a viabilidade econômica estudada por Poveda (2014) é conservadora. Também é necessário que haja uma atratividade, ou seja, subsídios econômicos, no preço pago pela eletricidade e um mercado de carbono atrativo.

O presente trabalho demonstra que a produção do biogás a partir da vinhaça, na escala piloto, vem trazendo grandes resultados acima dos estudos realizados pelo Poveda (2014), tornando atrativa a implantação de reatores anaeróbicos e uso da vinhaça para produção do biogás.

4.2.2. Cenário 2: Biodigestão e uso veicular

Neste cenário é avaliado o uso veicular do biometano obtido a partir do biogás de vinhaça. São contabilizados os custos do sistema de biodigestão de recirculação interna, do dessulfurizador, de uma planta para a separação do CO₂ tipo *water scrubber* utilizada na purificação do biogás até 98% de metano (*upgrading*) e de uma estação de Gás Natural Veicular (GNV) com compressão até 220 bar. Também é adicionada a compra de um moto-gerador a biogás dimensionado para suprir, a

partir do biogás, as cargas internas de todo o sistema. O valor destes equipamentos, dimensionados segundo estudos de Poveda (2014) estão na tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Custos (instalação e O&M) referentes a uma planta de biodigestão e upgrade de biogas

	Preço Unitário	Unidades	Total
Instalação			
Biodigestor	R\$ 110/(kg DQO/dia)	116.000 kg DQO/dia	R\$ 12.760.000
Dessulfurizador	R\$ 1.330.000	1.000 Nm ³ /h	R\$ 1.330.000
Upgrading	R\$ 5.100.000	1.000 Nm ³ /h	R\$ 5.100.000
Compressor	R\$ 500.000	300 Nm ³ /h	R\$ 500.000
Motogerador	R\$ 2.000/kW	500 kW	R\$1.000.000
Custo total de instalação			R\$20.690.000
Operação			
Biodigestor + dessulfurizador	R\$ 0,018 kg de DQO	27.840.000 kg DQO/ano	R\$ 501.000/ano
Upgrading		1.000 Nm ³ /h	R\$ 150.000/ano
Compressor		300 Nm ³ /h	R\$ 50.000/ano
Motogerador	R\$ 40,00/MWh	2.904 MWh/ano	R\$ 116.000/ano
Custo anual O&M			R\$ 817.000/ano

Fonte: Adaptado de Poveda (2014)

Uma vez conhecido o custo desta instalação, avalia-se qual seria o custo do biometano comprimido com especificações para seu uso veicular. O custo do biometano é expresso em R\$ por “litro de diesel equivalente”, sendo esta medida definida como o custo de produzir uma quantidade de metano capaz de proporcionar a mesma energia térmica que um litro de diesel fóssil. Utilizando os valores da tabela 4.6, é calculado um custo de produção do “litro de diesel equivalente” de R\$2,79/l.

Tabela 4.6 – Custo de produção de biometano correspondendo a um litro de diesel equivalente

Biodigestão + Uso veicular	
Investimento inicial	R\$ 20.690.000
Custo anual O&M	R\$ 817.000/ano
Produção de volume de diesel equivalente	1.545 m ³ /ano
Vida útil	18 anos
Taxa de desconto	15%
Custo de produção “litro de diesel equivalente”	R\$ 2,79/l

Fonte: Adaptado Poveda (2014)

Neste cenário não foram contabilizados os custos de transformação dos veículos para uso de GNV. Poveda (2014) analisa que a transformação se encontra entre R\$2.000 e R\$3.000 para veículos leves, sendo superior para veículos médios. Para veículos pesados como o caso dos rodotrens¹⁵, onde se encontra o principal consumo de combustível da usina, não é possível a conversão, necessitando uma adaptação da frota em biocombustível para poder utilizar GNV. Caso a usina esteja planejando a renovação da frota requer incluir este custo no investimento inicial.

A seguir, será apresentada uma análise semelhante à do cenário anterior, neste caso variando o preço do diesel fóssil na bomba e do CER, procurando os valores que fazem com que a TIR do investimento seja igual a 21%. Também será incluído um custo de renovação parcial da frota para o uso de biocombustível de 5 milhões de reais.

Na figura 4.2, mostra-se a relação que existe entre o preço do litro de diesel e da tCO₂eq evitada, para obter um investimento com uma TIR = 21%.

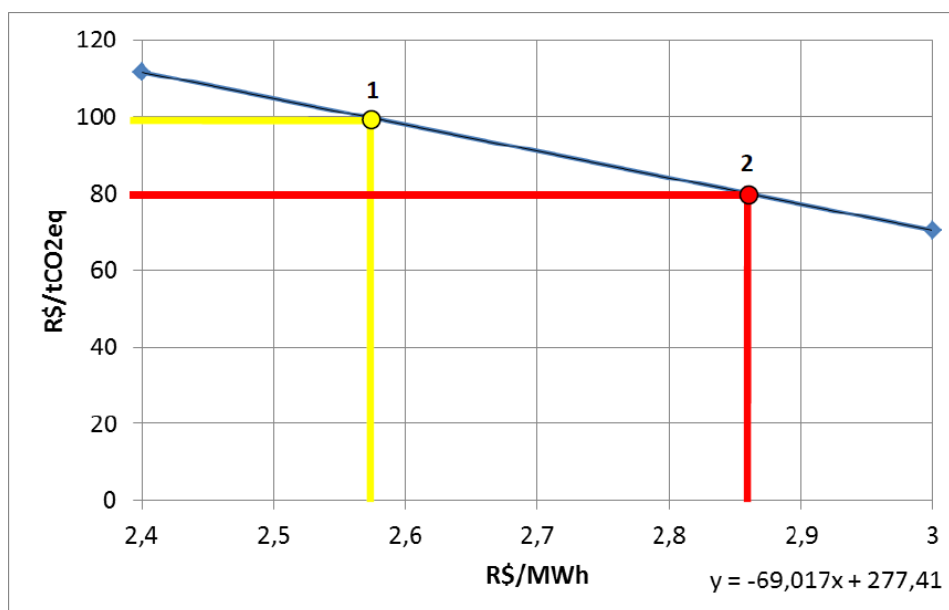


Figura 4.2 - Relação do preço da eletricidade e do CER para uma TIR=21%
Fonte: Adaptado de Poveda (2014)

Em função indica os valores que devem adquirir a variável para manter atrativo desde o ponto de vista econômico o uso veicular do biogás de vinhaça substituindo o diesel. Neste cenário, o preço do diesel na bomba deveria atingir valores no entorno de R\$2,7/l e um mercado de carbono registrando valores de

¹⁵ Caminhões utilizados para o transporte da cana-de-açúcar.

E30/t para criar um cenário no qual o investimento seria atrativo, como mostra a tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Variação em função do preço do diesel e do CER.		
Investimento inicial	R\$28.500.000	
Custo anual O&M	R\$ 914.020/ano	
Vida útil	18 anos	
Taxa de desconto	15%	
TIR	21%	
Ponto da Figura 4.2	1	2
Preço do diesel	R\$2,57/l	R\$2,86/l
Preço da CER	R\$100/tCO ₂ eq	R\$80/tCO ₂ eq
VPL	R\$9.402.336	R\$9.402.336
<i>Payback</i> descontado	9 anos	9 anos

Fonte: Adaptado de Poveda (2014)

Como pode ser observado, o fator fundamental para a viabilização econômica do uso veicular do biogás é o preço do diesel. Na situação estudada por Poveda (2014), os incentivos para a diminuição de emissões de GEEs e para a melhora do balanço energético do etanol seriam fundamentais a implantação deste cenário.

5. CONCLUSÃO

Antes de discorrer sobre a conclusão a partir da avaliação deste trabalho, é importante ressaltar sobre alguns pontos de importância para o estudo realizado.

O primeiro diz respeito às mudanças estruturais pelas quais o setor sucroenergético vem passando desde o final do último milênio até os dias atuais. Iniciando por um cenário de crescimento e grandes investimentos entre os anos de 2000 e 2008, impulsionados pelos altos preços do etanol, passando pelo desaquecimento e falência de inúmeras empresas durante a crise mundial em 2008.

Outro fator importante diz respeito à busca mundial por fontes energéticas mais limpas e renováveis, visando, principalmente, a mitigação dos impactos ocasionados pelo aquecimento global. Neste modelo de produção energética, o Brasil encontra-se em destaque devido à alta participação das fontes renováveis de biomassa e hidrelétrica na matriz energética brasileira.

Além disso, conforme citado no Capítulo 2, o Governo Federal vem desenvolvendo políticas públicas (RenovaBio) para incentivar a produção de biocombustíveis (biogás) na matriz energética brasileira, assegurando assim, que acordos assumidos em compromissos internacionais sejam cumpridos, como é o caso da COP 21 realizada em Paris. Vale ressaltar que o setor sucroenergético terá grandes oportunidades em manter sua cadeia de produção cada vez mais autossustentável e agregar valores em seus produtos e subprodutos.

No Brasil são produzidos aproximadamente 30 milhões de litros de etanol, sendo que para cada 1 litro de etanol é produzido em média 11,5 litros de vinhaça, ou seja, o Brasil produz em média cerca de 345 milhões de m³ de vinhaça por safra e um potencial de produção de biogás de 5,5 trilhões de Nm³ por safra. Este efluente possui elevado teor de matéria orgânica, água e sais minerais, sendo utilizada pela grande maioria das usinas diretamente no sistema de fertirrigação, de acordo com as normas da CETESB, para o cultivo da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo.

As usinas de cana-de-açúcar, durante seu período de safra, são autossustentáveis com a queima do bagaço para a produção de energia, e com este trabalho, pode-se concluir que a vinhaça, rica em matéria orgânica, com grande

potencial para a produção do biogás/biometano, pode contribuir para aumentar ainda mais a oferta de energia no setor.

A partir dos resultados da planta piloto em operação na região de Piracicaba pode-se concluir que a tecnologia para o tratamento da vinhaça e consequentemente a produção de biogás está sendo satisfatória e economicamente viável para a implantação na escala industrial. Nos dois períodos de safra 16/17 e 17/18 de avaliação produziram em média 16,07 Nm³ de biogás/ m³ de vinhaça introduzida no sistema, sendo que as características da vinhaça introduzida no sistema tem como parâmetros médios para a produção de biogás a DQO = 34.375 mg/l de vinhaça e temperatura = 38,5 °C. O biogás produzido por esta tecnologia tem como composição média de 58% de CH₄, 40% de CO₂ e 25.625 ppm de H₂S. Destaca-se neste trabalho a importância do monitoramento dos parâmetros de temperatura, pH, nutrientes e tempo de retenção que são fundamentais para produção do biogás.

Para o estudo de viabilidade econômica do uso do biogás a partir da vinhaça foram utilizados dados financeiros do trabalho de Poveda (2014) uma vez que para a usina em análise encontram-se dados disponíveis apenas da planta piloto e não da escala industrial.

Para os cenários foi avaliada a hipótese de que existem tecnologias disponíveis que melhoram o desempenho ambiental da gestão de resíduos e, ao mesmo tempo, permitem um melhor aproveitamento da vinhaça e uma economia de energia. Pode-se concluir que atualmente a viabilidade econômica, para a biodigestão e produção de eletricidade e o uso veicular do biogás estão próximos da viabilidade econômica. Porém para a injeção do biometano na rede de gás natural deve-se detalhar melhor a localidade da usina produtora de biogás, os custos da implantação de redes conectoras na concessionária e preço de mercado do gás natural.

A possibilidade de usar o biogás/biometano como combustível veicular é mais conveniente para o setor sucroenergético do que a geração de energia elétrica a partir da queima do biogás, pois a substituição do diesel, na cadeia de logística do transporte da cana-de-açúcar, melhora consideravelmente o balanço energético do etanol.

Importante destacar que a viabilidade técnica e econômica para a concentração da vinhaça não foi avaliada para o estudo de caso, devido ao fato de que planta industrial estudada já possui um concentrador. Importante ressaltar que a viabilidade da instalação de concentradores de vinhaça não está relacionada na biodigestão da vinhaça, mas sim com as externalidades sobre os impactos ambientais causados pela aplicação da vinhaça como fertirrigação.

A viabilidade estratégica de injeção do biometano na rede de gás natural é difícil de ser avaliada no momento, uma vez que dados financeiros não foram possíveis de serem levantados durante este trabalho. Importante destacar que esta análise deve ser cautelosa devido aos custos para interligação na rede do gás natural. Faz-se necessária uma avaliação preliminar do local onde a usina está instalada para avaliar se há alguma concessionária¹⁶ de gás natural próxima ao local. Conforme a Figura 5.1, no Estado de São Paulo, há uma subdivisão em 3 (três) áreas de Concessão para os serviços de distribuição do gás natural (Gasbrasiliانو, Gás Natural SPS e Comgas).



Figura 5.1 - Rede de concessão do gás natural no estado de São Paulo
Fonte: <http://www.gasbrasiliانو.com.br/a-empresa/> . Acesso em 06/08/2017.

¹⁶ Em 1988 o serviço de distribuição de gás canalizado foi transferido do âmbito federal para o estadual. O serviço de distribuição de gás natural passou a ser executado pelos Estados, através de empresas concessionárias.

Além das preocupações territoriais da rede de gás natural, as empresas que planejem avaliar técnica e economicamente esta alternativa devem levar em consideração a Resolução ANP nº08 de 2015. Nesta resolução, a ANP estabelece as especificações técnicas do biometano para injeção na rede de gás natural.

Devido ao potencial significativo que a vinhaça possui como fonte de geração de energia e com a possível introdução de novas políticas públicas para a produção de biocombustíveis no cenário brasileiro, recomenda-se dar continuidade a estas pesquisas, visando vencer as dificuldades encontradas neste trabalho para análise da viabilidade econômica dos processos avaliados, uma vez que a produção em reatores anaeróbios já é uma realidade factível para a produção do biogás.

O presente trabalho não avalia todas as possibilidades de tratamento e de processamento da vinhaça, pois existem outras tecnologias que não foram aqui, como por exemplos os reatores UASB e as lagoas anaeróbias. Além disso, faz-se necessário avaliar as características físico/químicas dos lodos presentes nos reatores e a sua influência para a produção eficaz do biogás.

Não foram avaliados todos os usos do biogás de vinhaça, sendo necessários estudos adicionais para avaliar outras possibilidades, bem como seu impacto no balanço energético e no balanço de carbono¹⁷ da produção do etanol da cana-de-açúcar.

¹⁷ Redução de Gases do Efeito Estufa

6. REFERÊNCIAS

ALVES, J.W.S., (2000), **“Diagnóstico Técnico Institucional da Recuperação e Uso Energético do Biogás Gerado pela Digestão Anaeróbica de Resíduos”**, Dissertação de Mestrado, PIPGE/USP, São Paulo.

BHATTACHARYA, S. K., UBEROI, V. e DRONAMRAJU, M. M. (1996). **“Interaction between acetate fed sulfate reducers and methanogens”**. Water. Research. 30 (10), pp 2239-2246.

BISWAS, T.D, KARTHA, A.R.S, PUNDARIKAKHADU, R., (1977), **“Removal of carbon dioxide from biogás”**. Proceedings of national symposium on biogás technology and uses. New Delhi: IARI.

BNDES, CGEE (2008) **“Bioetanol de cana-de-açúcar: energia para o desenvolvimento sustentável”**. 1 ed. Rio de Janeiro, BNDES.

BREURE, A. E VAN ANDEL, J. G. (1984). **“Hydrolysis and acidogenic fermentation of a protein gelatin in anaerobic conditions culture”**. Applied Microbiology and Biotechnology. 20, pp 40-45.

BORIS, F.(1995), **História do Brasil**, São Paulo, Edusp.

CAPSTONE MICROTURBINE PERFORMANCE SPECIFICATIONS –“Renewable CR65 & CR65-ICHP”, Disponível em <http://www.microturbine.com/_docs/BiogásSellSheetwRenCR65&CR65_ICHP_4R1.pdf>, Acesso 2017.

CASTANÓN, N.J.B., (2002). **“Biogás, originado a partir dos rejeitos rurais, Trabalho apresentado na disciplina: Biomassa como Fonte de Energia - Conversão e utilização”**. Universidade de São Paulo, São Paulo.

CENBIO – Centro Nacional de Referência em Biomassa, Nota Técnica VII, disponível em <www.cenbio.com.br>. Acesso 2017.

CETESB (2015) Norma P4.231: **“Vinhaça – Critérios e procedimentos para aplicação no solo agrícola”**. São Paulo, CETESB.

CHERNICHARO, C. A. L. (1997). **“Princípios do tratamento biológico de águas residuárias”**, volume 5, 10 ed. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. UFMG. Belo Horizonte.

COELHO, S. T.; MARTINS, O. S.; ABRU, F. C. D. (2006) **“A conversão da fonte renovável biogás em energia. Políticas públicas para a Energia”**. In: V CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO. Desafios para o próximo quadriênio. Brasília/DF. 31 de maio a 02 de junho.

COELHO, S.T., V, S.M.S.G., MARTINS, O.S., COSTA, D.F., BASAGLIA, F., BACIC, A.C. K., (2004) **“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.

CUMMINS GAS ENGINES, INC. (1985). **Sources gas Applications**, Application Bulletin AB -2-85, El Paso, TX.

DIAS, M.O.S., MODESTO, M., ENSINAS, A.V., NEBRA, S.A., MACIEL FILHO, R., ROSSELL, C.E.V. (2011) **“Improving bioethanol production from sugarcane: evaluation of distillation, thermal integration and cogeneration systems”**. Energy 36, 3691–3703.

DIAS, M.O.S., JUNQUEIRA, T.L., CAVALETT, O., CUNHA, M.P., JESUS, C.D.F., ROSSELL, C.E.V., MACIEL FILHO, R., BONOMI, A. (2012) **“Integrated versus stand-alone second generation ethanol production from sugarcane bagasse and trash”**. Bioresour. Technol. 103,152–161

EEA – Empresa de Engenharia Ambiental Ltda. **“Curso de Tratamento de Esgoto”** – texto oferecido gratuitamente pela Empresa de Engenharia Ambiental – EEA. Divulgação neste site (www.comitepcj.sp.gov.br) por iniciativa da Câmara Técnica de Saneamento (CT-SA) dos Comitês PCJ.

ESPAÑA, G. E., MIJANGOS, C. J., BARAHONA, P. L., DOMINGUEZ, M. J., HERNANDEZ, Z. G., ALZATE, G. L. (2011) **“Vinasses: characterization and treatments. Waste Manage”**. Res. 29, 1235–1250.

FIGUEIREDO, P; CORTEZ, L. **“Breve história da cana-de-açúcar e do papel do instituto agrônomo no seu estabelecimento no Brasil”**. In: DINARDO, L. et al. **“Cana-de-açúcar”**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2008. P. 31-44

FNR – FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE. (2010) **“Guia Prático do Biogás. Geração e Utilização”**. Ministério da Nutrição, Agricultura e Defesa do Consumido da Alemanha. 5ª edição, Gulzow.

FUESS, L.T., GARCIA, M.L. (2014a) **“Anaerobic digestion of stillage to produce bioenergy in the sugarcane-to-ethanol industry”**. Environ. Technol. 35, 333–339.

FUESS, L.T., GARCIA, M.L. (2014b) **“Implications of stillage land disposal: a critical review on the impacts of fertigation”**. J. Environ. Manage. 145, 210–229.

HWU, C. (1998). **“Biosorption of long-chain fatty acids in UASB treatment process”**. Water Research. 32 (5), pp 1571-1579.

JORDÃO, E. P., PESSOA, C. A. (1995). **“Tratamento de esgotos domésticos”**, 3ª Edição, ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 720p.

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

KASS, D.L.,(1998), **“Biomass for renewable energy, fuels and chemicals”**, Academic Press, USA.

LEITE, R.(1985) **“Pró-Álcool: A Única Alternativa para o Futuro”**. Campinas: Disponível em: < <http://www.inovacao.unicamp.br/>>

LEMA, J.M.; MENDEZ, R., SOTO, M. (1997). **“Tratamento de anaeróbios para o tratamento de efluentes líquidos”**. In: Curso de digestão anaeróbia aplicada a resíduos sólidos e líquidos. Recife.

LETTINGA, G. e RINZEMA, A. (1985). **“Anaerobic treatment of sulfate containing wastewater”**. Bioenvironmental System.

LUZIO, E. (2011). **Finanças corporativas teoria e prática**. S.l: Cengage Learning.

MACEDO, I. C. *et al.* (2004). **“Balanço das emissões de gases do efeito estufa na produção e uso do etanol no Brasil”**. Governo do Estado de São Paulo, Secretaria do Meio Ambiente. Abril, São Paulo.

MANU, B., CHAUDHARI, S. (2001). **“Anaerobic decolorisation of simulated textile wastewater containing azo dyes”**. Bioresource Technology.

MARION, J. C.(1998), **“Contabilidade empresarial”**. 8^a. ed. São Paulo: Atlas.

MORAES, B.S., Zaiat, M., Bonomi, A. (2015) **“Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane ethanol production in Brazil: challenges and perspectives”**. Renew. Sustain. Energy Rev. 44, 888–903.

MOTTA, R. R., CALÔBA, G. M. (2002). **“Análise de investimentos: tomada de decisão em projetos industriais”**. São Paulo: Editora Atlas.

MUSSATI. M, AGUIRRE P., SCENNA, N. (1998). **“Modeling of real biological reactors for the treatment of complex substrates. dynamic simulation”**. Computers Chem. Engng. 22: S723-S726.

NANDY, T., SHASTRY, S., KAAUL, S.N. (2002). **“Wastewater management in a cane molasses distillery involving bioresource recovery”**. J. Environ. Manage. 65, 25–38.

PALACIO, J.C.E., ANGARITA, E.E.Y., LORA, E.E.S., VENTURINI, E.J. (2012) **“Cogeração a partir de resíduos na indústria de biocombustíveis: sucroalcooleira e de biodiesel”**. In: Lora, E.E.S., Venturini, O.J. (Coord.) Biocombustíveis. 1. ed. Rio de Janeiro, Interciência. pp. 811–895.

PALMISANO, A., BARLAZ, M. (2003) **“Anaerobic Digestion of Municipal Solid Wastes”**. apud PARDO, M. A. H., WANDURRAGA, H. J. L., (2004), **“Desarrollo de un modulo para 175 la simulación de digestores anaerobios acoplado al simulador hysys 3.1”**, Trabalho de Diploma para o Título de Engenheiro químico, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

PECORA, V. (2006). **“Implantação de uma Unidade Demonstrativa de Geração de Energia Elétrica a partir do Biogás de Tratamento do Esgoto Residencial da USP – Estudo de Caso”**. 152 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo – PIPGE.

POL, L.H.; REBAC, S.; KATO, M.; LIER, J.C. and LETTINGA, G. (1998). **“Anaerobic treatment of low-strength wastewater”**. In: V Latin-American Workshop/Seminar Wastewater Anaerobic Treatment. Vinã del Mar / Chile. p.27-30.

POLANCO, F. F. (2001). **“New process for simultaneous removal of nitrogen and sulphur under anaerobic conditions”**. Water Research. 35 (4), pp 1111-1114.

POMPERMAYER R. S., PAULA JR D.R. (2000), **“Estimativa do potencial brasileiro de produção de biogás através da biodigestão da vinhaça e comparação com outros energéticos”**. Anais 3. Encontro de Energia no Meio Rural, Setembro.

POVEDA, M.M.R. (2014) **“Análise econômica e ambiental do processamento da vinhaça com aproveitamento energético”**. São Paulo. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo.

RABELO, A. N. B.(1987). **“Manual de Preparação de Estudos de Viabilidade Industrial”**. São Paulo: Atlas.

RAMOS, J. B. (2004) **“Energia: desafios e alternativas para o século XXI”**. Informativo do Instituto Aqualung, Campinas.

REBELATTO, D. (2004). **“Projeto de Investimento”**. São Paulo: Manole.

RIZZO, A. C. L., LEITE, S. G. F., (2004), **“Produção de sulfeto em reator do tipo UASB e sua potencial aplicação na remoção de metais pesados de efluentes”**, - Rio de Janeiro: CETEM/MCT. 102 p. (Série Tecnologia Ambiental, 32)

ROCHA, J. D. (2012). **“Uso da Biomassa para Produção de Energia”**. Unicamp, São Paulo.

SALOMON, K. R. (2007). **“Avaliação Técnico-Econômica e Ambiental da Utilização do Biogás Proveniente da Biodigestão da Vinhaça em Tecnologias para Geração de Eletricidade”** – Tese de Doutorado, orientada por Electo Eduardo Silva Mora – Universidade Federal de Itajubá – MG. – Itajubá.

SÁNCHEZ, E., BORJA, R., WEILAND, P., TRAVIESO, L., MARTÍN, A. (2001). **“Effect of substrate concentration and temperature on the anaerobic digestion of piggery waste in a tropical climate”**. Process Biochemistry 37, pp 483–489.

SANTOS, A. H. M. (1999). **“Análise Econômico-Financeira de Centrais Termelétricas”**. Itajubá: Escola Federal de Engenharia de Itajubá.

SCAVINO, A. F. e SOUBES, M. (1997). **“Inhibition of Methanogens by heavy metals. The importance of Chromium to biological”**. Treatment of Tannery waste. Progress in Microbial Ecology. SBM. pp 533-541

SILVA, M.; GRIEBELER, N.; BORGES, L. (2006). **“Uso da vinhaça e impactos nas propriedades do solo e lençol freático”**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. Campina Grande, v.11, n.1, p. 108-114.

SOARES, H.M. (1990). **“Digestão anaeróbia de efluentes de fábricas de cervejas e refrigerantes em reator tipo fluxo ascendente com manta de lodo (UASB)”**. Dissertação (mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

SOARES, H. M. e HIRATA, T. S. (1997). **“Práticas de laboratório”**. Florianópolis. In: III “Curso de tratamento biológico de resíduos”. CBAB, MCT/CNPq,CPGEQ/UFSC, CDB, p.23.

SPEECE, R. E. (1995). **“Anarobic biotechnology for industrial wastewaters”**. Vanderbilt University. Published by Archae Press. United States of America.

SPEECE, R.E. (1996). **“Anaerobic biotechnology for industrial wastewaters”**. Vanderbilt University. Published by Archae Press. United States of America.

SPIEGEL, R.J, THORNELOE, S.A, TROCCIOLA, J.C.,PRESTON,J.L, (1999), **“Fuel cell operation on anaerobic digester gas: conceptual design and assessment”**, Waste Management, nº 19, USA, 389-399p.

STERLING, M. C., LACEY, R. E., ENGLER, C.R., RICKE, S.C. (2001). **“Effects of ammonia nitrogen on H₂ and CH₄ production during anaerobic digestion of dairy cattle manure.”** Bioresource Technology. 77, pp 9-18.

UNICA (2016) **“A bioeletricidade da cana em números”** – fevereiro de 2016. São Paulo/Brasília. Disponível em: <http://www.unica.com.br/download.php?idSecao=17&id=6703271> Acesso: 02 jul. 2017.

USEPA (1991) – United States Environment Protection Agency, **“Air Emission from Municipal Solids Waste Landfill”** – Background Information for Proposed Standards and Guidelines. Emission Standards Division. EPA-450/3-90-011a. USA, March.

VAN HAANDEL, A.C., LETTINGA, G. (1994). **“Tratamento anaeróbio de esgotos – um manual para regiões de clima quente”**. p.208. Editora Eppgraf.

WILKIE, A.C., RIEDESEL, K.J., Owens, J.M. (2000) **“Stillage characterization and anaerobic treatment of ethanol stillage from conventional and cellulosic feedstocks”**. Biomass Bioenergy 19, 63–102.