

CARLOS GUSTAVO GEHRING

**ANÁLISE DA GERAÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO
BIOGÁS PRODUZIDO NA
FERMENTAÇÃO ANAERÓBICA DE
VINHAÇA.**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Escola de Engenharia de São
Carlos, da Universidade de São Paulo

Curso de Engenharia Elétrica com ênfase
em Sistemas de Energia e Automação

ORIENTADOR: Prof. Dr. José Carlos de Melo Vieira Júnior

São Carlos
2014

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTA TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

G311a Gehring, Carlos Gustavo
Análise da geração de energia elétrica a partir do
biogás produzido na fermentação anaeróbica de vinhaça /
Carlos Gustavo Gehring; orientador José Carlos de Melo
Vieira Júnior. São Carlos, 2014.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com
ênfase em Sistemas de Energia e Automação) -- Escola de
Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,
2014.

1. Biogás. 2. Geração Distribuída. 3. Fontes de
Energia Alternativa. 4. Estudo de Viabilidade Técnica e
Econômica. 5. Vinhaça. 6. Geração de Energia Elétrica.
7. Biodigestão. 8. Biodigestores. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Carlos Gustavo Gehring

Título: “Análise da geração de energia elétrica a partir do biogás gerado na fermentação anaeróbica de vinhaça”

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado
em 24 / 11 / 2014,

com NOTA 10,0 (dez , zero), pela Comissão Julgadora:

Prof. Dr. José Carlos de Melo Vieira Júnior - (Orientador - SEL/EESC/USP)

Prof. Dr. Rogério Andrade Flauzino - (SEL/EESC/USP)

Mestre Oureste Elias Batista - (Doutorando - SEL/EESC/USP)

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:
Prof. Associado Homero Schiabel

Dedicatória

Dedico

Aos meus pais, Antonio e Neusa,
meu irmão Rodolfo, minha irmã Mariana
e a toda minha família.

“O amor e o desejo são as asas do espírito das grandes façanhas”

Johan Woflgang von Goethe

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais, Antonio e Neusa, por todo o apoio, compreensão, ajuda e carinho em todos estes anos. Ao meu irmão Rodolfo e minha irmã Mariana. A meu avô Carlos e minha avó Natalina.

Ao professor José Carlos de Melo Vieira Júnior, pela atenção e paciência ao me orientar na elaboração deste trabalho.

A todos os professores e profissionais do Departamento de Engenharia Elétrica que de alguma forma contribuíram com minha formação e aprendizado.

Aos meus amigos de turma Julio Druzina, Gustavo Siqueira, Lucas Nishioka, Gabriel Faustino, Bhruno Ribeiro, Jefferson Amadeu, João Ricardo Bordim, Oureste Batista, Guilerme Fuzato, Lauro Ito, Rodrigo Sampaio, Hanna Schutzer, Laís Kanegae, Natalia Passone, entre tantos outros que não consegui me lembrar no momento.

Aos meus companheiros de república, que foram como uma família em São Carlos, Rodolfo Moraes, Pedro Medeiros, Oswaldo Neto, Vinicius Anselmo, João Victor Rosa, Ianco Rodrigues, Fernando Coelho, dentre todos que algum dia moraram comigo e me apoiaram em momentos difíceis.

Aos meus grandes amigos de Londrina que mantiveram contato mesmo com a distância, Cauê Zortea, Fernando Casaroli e Thyago Machado.

Aos meus primos, tios e toda minha família.

A Deus.

Sumário

Lista de tabelas	12
Lista de figuras	14
Resumo.....	15
Abstract	16
1 – Introdução.....	17
1.1 – Objetivo geral.....	18
1.2 – Objetivos específicos	18
1.3 Estrutura organizacional.	19
2 – Vinhaça – Resíduo da destilação do álcool.	21
2.1 Composição.	22
2.2 Aplicações e técnicas para aproveitar a vinhaça.	23
2.2.1 Aplicação “in natura” ao solo.....	23
2.2.2 Concentração.....	24
2.2.3 Produção de metano.....	24
3 – Biogás.....	27
3.1 Propriedades químicas.....	27
3.2 Microbiologia e bioquímica na formação do biogás.	30
3.2.1 Hidrólise.....	31
3.2.2 Acidogênese.	32
3.2.3 Acetogênese.	32
3.2.4 Metanogênese.....	32
3.2.5 Bactérias Sulfetogênicas.	33
3.3 Fatores que influenciam na digestão anaeróbica.....	33
3.3.1 Temperatura.	34
3.3.2 pH.	34
3.3.3 Composição e concentrações do afluente.	36
3.3.4 Tempo de retenção.....	37
3.4 Purificação do biogás.	37
3.4.1 Remoção da umidade.....	39
3.4.2 Remoção de dióxido de carbono.	40
3.4.3 Remoção de sulfato (H ₂ S).....	42
3.4.4 Lavagem com Genosorb.	45
4 – Reatores Anaeróbicos e biodigestores.....	47
4.1 Características e diferenciação das técnicas.....	48
4.2 Tipos de biodigestores e reatores	50

4.2.1 Reator anaeróbico de manta de lodo e fluxo ascendente.	50
4.2.2 Biodigestor de mistura completa.	52
4.2.3 Biodigestor de fluxo pistonado.....	53
4.2.4 Biodigestor modelo Indiano.	54
4.2.5 Biodigestor modelo Chinês.	55
4.2.6 Biodigestor a batelada.....	56
5 – Conversões energéticas do biogás.....	57
5.1 Principais tecnologias de aproveitamento do biogás.	58
5.1.1 Motores a combustão interna.	58
5.1.2 Motores Stirling.....	61
5.1.3 Turbinas a gás.....	62
5.1.4 Turbinas a vapor.	63
5.1.5 Microturbinas.	65
5.2 Cogeração.	65
5.2.1 Tipos de Cogeração.	66
5.2.2 Ciclos de cogeração a Ciclos Otto e Diesel.....	66
5.2.3 Ciclos de cogeração a Ciclo Brayton.	67
5.2.4 Ciclo de cogeração a Ciclo Rankine.	67
5.2.5 Ciclo Combinado.....	67
5.3 Comparação entre as tecnologias.	67
6 – Estudo de caso – Viabilidade da geração de energia elétrica a partir da vinhaça.	69
6.1 Escopo do projeto.....	69
6.2 Ambiente regulatório de Geração Distribuída.	69
6.3 Comercialização da energia.	71
6.4 Barreiras.....	73
6.4.1 Econômicas.	73
6.4.2 Tecnológicas.	75
6.4.3 Políticas.....	75
6.4.4 Cultural (Setor Sucroalcooleiro), Social e Ambiental.	76
7 – Avaliação técnica.	77
7.1 Características da produção de vinhaça.	77
7.2 Parâmetros do Reator Anaeróbico de Fluxo Ascendente e Produção de Biogás.	78
7.2.1 Volume do reator.	78
7.2.2 Eficiência de remoção de Matéria Orgânica.	81
7.2.3 Produção de biogás.	83
7.2.4 Aspectos construtivos	85
7.3 Geração de energia elétrica.....	86
7.3.1 Determinação de potencial elétrico e estimativa de produção.	86

7.3.2 Especificação técnica do grupo motor gerador.....	88
7.3.3 Subestação, controle e proteção dos geradores.	89
7.4 Demais sistemas.	90
7.4.1 Galpão dos geradores.....	90
7.4.2 Tubulações	90
7.4.3 Lavador de gases	91
8- Avaliação financeira	93
8.1 Métodos de análise	93
8.2 Premissas econômicas e comerciais	96
8.2.1 Custos de investimento	96
8.2.2 Custos com operação e manutenção	103
8.2.3 Receitas	104
8.2.4 Resultado financeiro anual	105
8.3 Estudo aplicado	106
8.3.1 Cálculo e análise dos parâmetros de análise de viabilidade	106
8.3.2 Considerações e análise dos parâmetros.	110
8.4 Análise dos resultados financeiros com isenção do ICMS.	112
9 – Conclusões.....	115
Referências Bibliográficas	119

Lista de tabelas

Tabela 2. 1 Características da vinhaça segundo o mosto utilizado como matéria prima.....	22
Tabela 3.1 Poder calorífico versus concentração de metano no Biogás.....	28
Tabela 3.2 Poder calorífico de fontes energéticas.....	29
Tabela 3.3 Propriedades mínimas de um gás combustível com presença relativa de oxigênio 5%.	38
Tabela 3.4 Técnicas para purificação de impurezas do biogás	39
Tabela 3.5 Comparações entre os métodos de purificação do metano.....	42
Tabela 3.6 Processos de Dessulfurização.....	45
Tabela 4.1 Classificação das técnicas de geração de biogás conforme critérios..	48
Tabela 5.1 Comparação entre grupos geradores a ciclos Otto e Diesel.	61
Tabela 5.2 Comparação entre as diferentes tecnologias compatíveis com o biogás.	68
Tabela 6.1 Principais regras de comercialização de energia elétrica.	73
Tabela 7.1 Dados gerais usina, cenário de baixa produção de etanol anual.	77
Tabela 7.2 Características da vinhaça.	78
Tabela 7. 3 Tempos de detenção hidráulica em reatores UASB.....	79
Tabela 7.4 Volume do reator por tempo de detenção.	80
Tabela 7.5 Volume por carga orgânica volumétrica.	81
Tabela 7.6 Parâmetros finais de volume do reator	81
Tabela 7.7 Resultados experimentais obtidos em reatores UASB para tratamento da vinhaça...	82
Tabela 7.8 – Eficiência estimada para o reator UASB proposto. Considerando vazões mínima, média e máxima.....	83
Tabela 7.9 Produção diária e anual de biogás do projeto.	85
Tabela 7.10 Potências elétricas máxima e média.....	87
Tabela 7.11 Especificações do grupo de motores e geradores (simplificado).	87
Tabela 7.12 Características do grupo motor-gerador.	89
Tabela 7.13 Dimensionamento de tubulações e válvulas.....	91
Tabela 8.1 Pontos de decisão VPL	95
Tabela 8.2 Plano orçamentário para construção de reator de 1.750 m ³	97
Tabela 8.3 Plano orçamentário para montagem de tubulações, válvulas, dormentes e praça de bombas (incluso custos com CCM)	98
Tabela 8.4 Plano orçamentário para instalação de 3 secadores de gás e 1 dessulfurizador.....	99
Tabela 8.5 Plano orçamentário para construção de um barracão com 1050 m ² e piso para suporte dos geradores.	99
Tabela 8.6 Plano orçamentário para montagem de moto geradores e transformadores e instalação elétrica do conjunto com painéis de proteção, sincronismo e excitação. 1: Somatória	

dos itens de 5.1.1 a 5.1.9, multiplicado por 8. Itens de 5.1.1 a 5.1.9 referentes à um conjunto gerador e subestação.	101
Tabela 8.7 Investimento para a Usina Termoeletrica a Biogás proposta.	102
Tabela 8.8 Custo de mão de obra para operação da UTE - Biogás.....	104
Tabela 8.9 Custos e despesas com operação e manutenção fixas e variáveis anual.	105
Tabela 8.10 Resultado financeiro do anual. Preço energia: 104,03 R\$/kWh e ICMS: 18%.	106
Tabela 8.11 Fluxo de caixa com valores futuros e venda no mercado regulado.	107
Tabela 8.12 Fluxo de caixa com valores presentes e venda no mercado regulado.	108
Tabela 8.13 Fluxo de caixa com valores presentes e venda no mercado livre.	109
Tabela 8.14 Resultado financeiro do anual. Preço energia: 170,40 R\$/kWh e ICMS: 18%.	110
Tabela 8.15 Resultado financeiro do anual. Preço energia: 104,03 R\$/kWh e ICMS: 0% (Isento).	112
Tabela 8.16 Fluxo de caixa com valores presentes, com venda no mercado regulado e isenção de ICMS.....	113
Tabela 8.17 Resultado financeiro do anual. Preço energia: 138,57 R\$/kWh e ICMS: 0%(Isento).	114

Lista de figuras

Figura 3.1 Fases da biodigestão.	31
Figura 3.2 Conjunto de tratamento de Biogás com Genosorb.	46
Figura 4.1 Biodigestor com reservatório de biofertilizantes aberto.	49
Figura 4.2 Biodigestor com reservatório de biofertilizantes fechado	49
Figura 4.3 Corte lateral de um Reator UASB. Características de funcionamento.	52
Figura 4.4 Corte lateral de um Reator de Mistura Completa com agitação por hélice.	53
Figura 4.5 Corte lateral de um Biodigestor modelo Indiano	54
Figura 4.6 Corte lateral de um Biodigestor modelo Chinês.	56
Figura 5.1 Ciclos térmicos de um motor de combustão interna de 4 tempos.	59
Figura 5.2 Diagrama p.v do ciclo térmico de Otto.	59
Figura 5.3 Curva do rendimento pela taxa de compressão. Do ciclo Otto.	60
Figura 5.4 Curva do rendimento pela taxa de compressão do ciclo Diesel.	60
Figura 5.5 Diagrama de processo de uma turbina a gás.	63
Figura 5.6 Diagrama de processo de uma turbina a vapor.	64
Figura 5.7 Diagramas representando ciclo “bottoming” (esquerda) e ciclo “topping” (direita)..	66
Figura 8.1 Diagrama de fluxo de caixa.	93
Figura 8.2 Código NCM para os motos geradores.	100
Figura 8.3 Grupo NCM e custo com taxas de importação do grupo moto gerador.	101

Resumo

GEHRING, C. G. *Análise da geração de energia elétrica a partir do biogás produzido na fermentação anaeróbica de vinhaça*. São Carlos, 2014. 124 p. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia Elétrica de São Carlos, Universidade de São Paulo.

O presente trabalho teve como objetivo primordial a avaliação tecnológica e financeira de projetos de geração de energia elétrica a partir do biogás gerado na fermentação anaeróbica da vinhaça, com o objeto de estudo uma usina de tamanho médio localizada na cidade de Araraquara, interior de São Paulo.

A vinhaça é o principal resíduo da destilação do vinho fermentado da cana de açúcar, ele é produzido em largas escalas e possui tanto características nutritivas e poluentes. A vinhaça apresenta alta carga orgânica, carga esta que é fermentada em biodigestores e reatores anaeróbicos.

A biodigestão que é a fermentação de cargas orgânicas em ambientes anaeróbicos produz um gás rico em metano. O biogás produzido no processo pode ser recuperado através de câmaras e sistemas de tubulações que encaminham o gás para lavagem e posterior uso em máquinas térmicas.

A análise técnica do trabalho visa dimensionar e qualificar instrumentos, máquinas e reatores necessários para que a biodigestão ocorra de maneira eficiente e que produza biogás com metano o suficiente para a alimentação de motores de combustão interna.

A viabilidade financeira é totalmente dependente da análise técnica e mercadológica do projeto, todas as postulações aqui definidas são baseadas nos dimensionamentos técnicos realizados. São discutidas as previsões orçamentárias de investimento, operação e manutenção conforme análise de mercado e da literatura e são calculados índices financeiros utilizados para o estudo de projetos.

Por fim, as considerações sobre a viabilidade do projeto e as expectativas para o avanço da tecnologia no setor sucroenergético são apresentados, com uma proposta final para incentivo nessa fonte de energia.

Palavras-chaves: vinhaça, biogás, biodigestão, biodigestores, reatores anaeróbicos, geração de energia, fontes de energia alternativas, técnica, financeira.

Abstract

GEHRING, C. G. *Analysis of power generation from the biogas produced in anaerobic fermentation of the vinasse*. São Carlos, 2014. 124 p. Undergraduate Final Work (Electrical Engineering) – Escola de Engenharia Elétrica de São Carlos, Universidade de São Paulo.

This study had as its primary goal the technological and financial assessment of projects of power generation from biogas generated in anaerobic fermentation of the vinasse, with the object of study a plant of medium size located in the city of Araraquara, São Paulo.

The vinasse is the main hazardous wastewater of the distillation of fermented sugarcane wine, it is produced in large scales and has nutritional and pollutants characteristics. The vinasse has a high organic load, this load is fermented in anaerobic digesters and reactors.

The digestion, fermentation, of organic loads in anaerobic environments produces a gas rich in methane. The biogas produced in the process can be recovered through chambers and pipes systems to deliver the gas for cleaning and further use in thermal machines.

The technical analysis work aims to measure and qualify instruments, machines and reactors needed for the digestion occurs in an efficient form and produce biogas with methane enough to power internal combustion engines.

The financial viability is entirely dependent on technical and marketing analysis of the project, all postulations defined here are based on the technical dimensioning performed. The budgetary estimates for investment, operation and maintain were prepared in accordance to market and literature analysis, and some financial indices are calculated to study of the project.

Finally, this work discusses the feasibility of the project and the expectations for the advancement of the technology in sugar cane business, with a final proposal for stimulation of that energy source.

Keywords: vinasse, biogas, digestion, digesters, anaerobic reactors, power generation, alternative energy sources, technical, financial.

1 – Introdução

As últimas décadas foram marcadas pelos discursos sobre a temática da renovação de nossas fontes energéticas. A alta recorrência de eventos prejudiciais ao meio ambiente trouxe a tona discussões sobre o preço pago pela energia, seja este preço econômico ou ambiental. As análises que surgem destas discussões podem determinar se o rumo que deve ser tomado deve ou não deve incluir fontes de energia originadas por combustíveis fósseis e nucleares.

Diversas alternativas foram propostas, cada uma com suas particularidades e desafios, sejam elas renováveis ou não renováveis. Tecnologias foram criadas e evoluíram com o passar dos anos, métodos e novos mercados emergiram neste novo mundo de geração de energia.

Dentre as mais aclamadas estão as fontes conhecidas como energias renováveis, marcadas por serem geradas por fontes abundantes e naturais, por se renovarem naturalmente e por não causarem grandes impactos em nosso meio de vida. As mais diversas formas de energia que fluem naturalmente no mundo estão sendo estudadas como fontes, o vento é capaz de produzir a energia eólica, a luz do sol, o movimento das ondas e das marés, a força de grandes rios e a decomposição de matérias orgânicas pode nos gerar energia.

Após muito pensar e discutir, devemos nos propor a implementar e a realizar estes projetos. Em um cenário global o Brasil se destaca pelo seu gigantesco potencial energético, destacando o hidráulico já muito utilizado.

As altas cargas orgânicas contidas nos efluentes produzidos em nossas cidades e indústrias representam um desperdício de energia limpa, barata e distribuída que perdemos anualmente. A falta de investimentos e até de conhecimento sobre esta fonte nos leva ao desperdício de energia próxima de nossos centros consumidores.

O efluente orgânico após um tratamento adequado produz o biogás através de um processo conhecido como biodigestão. Este processo acontece naturalmente com toda matéria orgânica e é utilizado no tratamento de efluentes urbanos. Para realizarmos este processo de forma controlada e eficiente utilizamos os biodigestores, reatores anaeróbicos, para criar o ambiente ideal para que este processo se realize rapidamente e com a eficiência que demandamos.

Composto por uma grande concentração de metano, entre 40% e 60%, o biogás é gerado naturalmente pela decomposição do material orgânico. O não controle deste processo faz com que todo o metano digerido seja lançado ao ar junto de outros gases, como o sulfúrico, causando um impacto no meio ambiente.

Acontece que este metano, se capturado do processo, pode ser utilizado em máquinas térmicas e gerar energia. A combustão do biogás é capaz de produzir energia o suficiente para a que valha o investimento de se interligar na rede de distribuição e transmissão.

A indústria da cana de açúcar era marcada pelo retrocesso tecnológico e baixa eficiência produtiva, uma indústria marcada pelos desperdícios. Desperdícios no manejo da cana de açúcar, na má gestão de recursos, na falta de investimentos de reaproveitamento energéticos e no mau controle de seus armazéns.

Porém, na última década houve uma mudança na cultura de alguns empresários e empreendedores. Esta mudança trouxe avanços significantes para a eficiência global das usinas. Alterações na gestão de recursos e estoques com investimentos realizados a fim de se diminuir os desperdícios, avanços no controle das colheitas e transporte da cana de açúcar e por fim na maximização energética da cana de açúcar.

O início da revolução energética da cana de açúcar se deu com a produção do etanol hidratado, combustível para veículos leves. O etanol anidro, outro produto da cana de açúcar, é misturado à gasolina para reduzir o impacto financeiro e ambiental dos derivados do petróleo. Na última década mais um avanço no balanço energético da cana de açúcar, a cogeração com a queima do bagaço de cana de açúcar.

O biogás pode representar mais uma revolução energética da cana de açúcar, e aumentar o já positivo balanço energético da cana de açúcar.

O benefício ambiental ocorre com a estabilização da vinhaça, importante resíduo com alta capacidade de poluição de rios, lagos e bacias hídricas e com a redução das emissões dos gases causadores do efeito estufa e chuva ácida.

Vale destacar que o aumento da eficiência da indústria sucroenergética aumenta a competitividade do álcool Brasileiro no mercado exterior e que dá fôlego a um mercado que sofre com a competição com os combustíveis derivados da gasolina.

1.1 – Objetivo geral

O foco deste trabalho é analisar os aspectos técnicos e econômicos atuais para a implementação da vinhaça como matéria prima para gerar energia elétrica.

1.2 – Objetivos específicos

Caracterizar as tecnologias hoje presentes no mercado para a biodigestão da vinhaça em reatores anaeróbicos e produzir biogás o suficiente para viabilizar seu uso em geradores elétricos, de forma a demonstrar ao que o valor presente do projeto e a taxa interna de retorno esperada pelo projeto.

Para atingir o objetivo geral deste trabalho, os seguintes objetivos específicos foram propostos:

- Caracterizar o biogás;
- Identificar a fonte geradora, vinhaça, e suas características intrínsecas;

- Identificar as tecnologias acessíveis no mercado para a biodigestão, filtragem e conversão elétrica;
- Analisar ambiente mercadológico;
- Levantar custos de investimento e operação;
- Avaliar viabilidade técnica e financeira através de indicadores;

1.3 Estrutura organizacional.

Os capítulos 2, 3, 4 e 5 formam a revisão bibliográfica sobre o assunto. Nestes capítulos é apresentada toda a estrutura teórica do trabalho. Todo o conhecimento expresso nestes capítulos é baseado em literatura especializada e aceita pelo meio acadêmico.

O capítulo 2 trata de um estudo primário sobre a vinhaça, sua história, seu potencial poluente e suas características químicas intrínsecas. Há também uma breve discussão sobre os atuais usos deste resíduo.

Já o capítulo 3 aborda uma apresentação completa sobre o biogás. Apresenta detalhes sobre suas composições físico químicas, inclusive seus potenciais calóricos. Todo o processo de formação do biogás é tratado com detalhes nesse capítulo, desde os fatores que influenciam sua formação às bactérias que estão presentes em sua formação. No final são discutidos os métodos de lavagem e filtragem do biogases mais adotados no mercado.

Os meios produtores de biogás, biodigestores e reatores são tratados no capítulo 4. As técnicas associadas a diferentes meios de tratamento de efluentes e resíduos líquidos são tratados de maneira sucinta de forma que as noções de desempenho, eficácia e custos intrínsecos às tecnologias sejam perceptíveis.

O capítulo 5 trata das máquinas térmicas para reaproveitamento da energia do biogás. Neste capítulo estão descritas as diferentes técnicas para produção de energia elétrica e cogeração que utilizam vapores inflamáveis como combustíveis.

As análises do estudo de caso do trabalho são discutidas nos capítulos 6, 7, 8 e 9.

O capítulo 6 apresenta uma breve discussão sobre o ambiente ao qual o projeto está inserido. Este estudo apresenta aspectos que os empreendedores devem conhecer para o estudo de viabilidade. Nele também estão descritos o ambiente legislativo e as barreiras que existem para a aderência ao mercado.

O capítulo 7 apresenta um estudo técnico baseado nos conceitos estudados na revisão bibliográfica, onde são definidas as dimensões de reatores, lavadores de gás e dos grupos motores geradores.

No capítulo 8 são feitas estimativas orçamentárias para a construção, operação e manutenção da usina térmica a biogás. Os parâmetros financeiros de avaliação de projetos são aqui tratados e calculados de forma que se tenham indicadores confiáveis para a avaliação final.

O capítulo 9 apresenta as considerações finais do trabalho. São discutidas a conjuntura de meio ambiente, tecnologia e economia do projeto. A avaliação dos três capítulos anteriores é somada a estas considerações e por fim são apresentadas de forma a concluir o trabalho.

2 – Vinhaça – Resíduo da destilação do álcool.

A vinhaça é um resíduo da destilação alcoólica do vinho gerado em usinas produtoras de álcool. O vinho é um fermentado cujas matérias primas são o melaço e/ou o caldo da cana. Talvez o mais importante dos resíduos da fabricação do álcool, a vinhaça é produzida em grande quantidade e possui um enorme potencial poluidor.

Produzida em relação direta ao volume de álcool produzido na relação de 10,3 a 11,9 litros/ litros de álcool segundo Andrade (2009) a vinhaça apresenta características de baixo pH e elevada carga orgânica.

Preocupação desde o início da produção do álcool em grandes quantidades, a vinhaça possui um histórico de agressões ao meio ambiente devido à má destinação e descaso com seu manuseio. Na literatura especializada e em antigos jornais encontram-se inúmeros relatos de despejos indevidos do resíduo em cursos de água afetando populações e a economias locais. Os relatos mostram casos de desabastecimento de cidades por falta de água potável, mortandade maciça de peixes, mau odor, desestabilização de economias dependentes de rios, dentre outros. Como relatado pelo Ministério do Meio Ambiente (2008) de que um vazamento de grande quantidade de vinhaça provocou a morte de milhares de peixes no córrego Guarani. Acidente causado por esquecimento de um funcionário da empresa, que deixou o sistema de irrigação aberto durante várias horas.

De acordo com Corazza (2006) em 1984 um acidente com o colapso de uma barragem de contenção de vinhaça no município de Curaçá contaminou o Riacho Tourão, afluente do Rio São Francisco. No acidente foram despejados 45 000 m³ de vinhaça o que ocasionou na morte de 300 toneladas de peixe. O caso é considerado até hoje como o pior acidente do Rio São Francisco.

A preocupação com os impactos ambientais levaram a criações de leis que proíbem os lançamentos da vinhaça em rios, lagos e cursos de água, em 1967 foi criado o Decreto de Lei nº 303 que proibiu os lançamentos em rios e cursos de água e em 1978 a Portaria nº 323 publicada pela Secretaria Especial do Meio Ambiente proibiu o lançamento direto ou indireto em qualquer coleção hidráulica, conforme Cruz (2011) apresenta em seu trabalho.

Assim as usinas foram obrigadas a buscarem meios de tratamento e/ou utilização da vinhaça, em vez de liberarem ela sem controle. A princípio foram utilizadas as áreas de inundações, onde os grandes volumes de vinhaça eram despejados para infiltração natural no solo. Estas áreas eram sacrificadas para a inundação e não eram mais produtivas. Com o aumento do volume produzido de álcool, as práticas de despejo em áreas de inundação se tornaram inviáveis devido ao volume gigantesco de vinhaça gerada a cada safra. Diferentes meios de uso da vinhaça começaram a ser estudados, desde a irrigação com vinhaça diluída na proporção de 1:10 que demandaria de uma quantia ainda maior de água e que em épocas

chuvosas seria prejudicial até a, ainda hoje utilizada, aplicação “in natura” descrita mais a frente.

2.1 Composição.

A vinhaça pode ser considerada uma suspensão de sólidos orgânicos e minerais do vinho não destilados. Sua composição é determinada em função da natureza e composição do mosto (caldo de cana e/ou melaço), teor alcoólico do vinho e do sistema de aquecimento do vinho na destilaria.

Possui um teor de sólidos em torno de 7%, todos sólidos orgânicos voláteis, característica que conferem a vinhaça um alto fator de Demanda Biológica de Oxigênio (DBO) e Demanda Química de Oxigênio (DQO) e a torna altamente poluente. É uma solução com pH baixo em torno de 4,3, corrosiva, com alto teor de potássio e quantidades significantes de nitrogênio, fósforo, sulfatos e cloretos. A vinhaça é produzida a alta temperatura, que aliado ao baixo pH confere um alto poder de corrosão.

A composição química da vinhaça varia entre largos limites dependentes dos fatores antes listados. Há na literatura especializada inúmeras pesquisas demonstrando as composições e concentrações de nutrientes na solução. A tabela 2.1 apresentada a seguir mostra os largos limites observados nas mais diversas composições de vinhaça.

Parâmetro	Melaço	Caldo	Misto
pH	4,2 – 5	3,7 - 4,6	4,4 - 4,6
Temperatura	80 – 100	80 - 100	80 - 100
DBO (mg/IO ₂)	25000	6000 - 16500	19800
DQO (mg/IO ₂)	65000	15000 - 33000	45000
Sólidos totais (mg/l)	81500	23700	52700
Sólidos voláteis (mg/l)	60000	20000	40000
Sólidos fixos (mg/l)	21500	3700	12700
Nitrogênio (mg/lN)	450 – 1600	150 - 700	480 - 710
Fósforo (mg/lP ₂ O ₅)	100 – 290	10 - 210	9 - 200
Potássio (mg/lK ₂ O)	3740 – 7380	1200 - 2100	3340 - 4600
Cálcio (mg/lCaO)	450 – 5180	130 - 1540	1330 - 4570
Magnésio (mg/lMgO)	420 – 1520	200 - 490	580 - 700
Sulfato (mg/lSO ₄ ⁻)	6400	600 - 760	3700 - 3730
Carbono (mg/lC)	11200 – 22900	5700 - 13400	8700 - 12100
Relação C/N	16 - 16,27	19,7 - 21,07	16,4 - 16,43
Matéria Orgânica (mg/l)	63400	19500	38000
Substâncias Redutoras (mg/l)	9500	7900	8300

Tabela 2.1 Características da vinhaça segundo o mosto utilizado como matéria prima.
Fonte: Sopral, 1986

A tabela 3.1 demonstra os altos índices de DBO e DQO da vinhaça que a tornam tão poluente e tão atrativa para a produção de metano ao mesmo tempo. Os níveis de Nitrogênio,

Fósforo, Potássio, Cálcio e Magnésio conferem à vinhaça uma característica importante: graças a estes nutrientes esta substância pode ser usada como fertilizante.

O processo de digestão reduz os níveis de DBO e DQO e produz como subproduto o biofertilizante que pode ser aplicado diretamente na terra, angariando resultados superiores à aplicação direta da vinhaça.

2.2 Aplicações e técnicas para aproveitar a vinhaça.

Existem algumas técnicas difundidas e praticadas pela indústria em geral para o aproveitamento da vinhaça como subproduto e não como resíduo. Existem na literatura especializada diversas aplicações, algumas amplamente utilizadas outras apenas discutidas e pouco aproveitadas. Em geral podem ser citadas as seguintes técnicas:

- Aplicação “in natura” ao solo;
- Concentração;
- Produção de metano;
- Tratamento físico-químico;
- Complemento de ração animal;
- Produção de proteína celular;

O presente trabalho estuda a técnica de produção de metano para geração de energia elétrica. As técnicas de aplicação “in natura” ao solo, concentração e produção de metano serão discutidas a seguir enquanto as aplicações tratamento físico-químico, complemento de ração animal e produção de proteína celular não serão discutidos devido a sua pouca utilização.

2.2.1 Aplicação “in natura” ao solo.

A aplicação de vinhaça na cultura da cana de açúcar é de longe o método mais utilizado para o aproveitamento da vinhaça, sendo uma prática comum na indústria de açúcar e álcool. Esta técnica é utilizada há décadas e sua disseminação entre as usinas se deu após a descoberta que a vinhaça corrigia o pH do solo apesar de ser uma solução ácida.

Esta técnica possui dois objetivos, fornecer nutrientes e água à cultura, que contribuem para fertilização e irrigação, prática também conhecida como fertirrigação. Em geral o que ocorre com as aplicações é um aumento nos nutrientes que a cana de açúcar mais demanda, a correção do pH levando a neutralidade e alcalinidade do solo e aumento na microflora do solo, características que colaboram com as condições de que o cultivo necessita. Segundo Andrade (2009) a alta concentração de potássio (4 kg por m³) desse subproduto associado a demanda de 185 kg por hectare deste nutriente por parte da cultura da cana, fez com que a Cooperativa de Produtores de Cana, Açúcar e Álcool do Estado de São Paulo (COPERSUCAR) adotasse no ano de 1978 o uso da vinhaça como fertilizante.

Na literatura é consenso, e a prática comum desta técnica comprova, que há um aumento na produtividade agrícola e no manejo do solo. Esta solução não apresenta metais que podem ocasionar prejuízo ao solo e nenhum contaminante que prejudique seu uso agrícola. Mas é de conhecimento que o abuso na concentração da aplicação por hectare é danoso ao ambiente e pode levar desde a um desbalanço de nutrientes à contaminação de lençóis freáticos.

No estado de São Paulo a CETESB estabeleceu critérios para o armazenamento, transporte e aplicação da vinhaça no solo com a razão de diminuir abusos do setor. Dentre os critérios pode se destacar o limite imposto à dosagem máxima permitida de vinhaça por hectare. A aplicação de alta dosagem de vinhaça é prejudicial à qualidade da cana de açúcar, causa atraso na maturação, diminuição do teor da sacarose aparente (pol), aumento no teor de cinzas e elevação no nível de potássio e amido do caldo. A dosagem varia conforme características específicas do solo onde será aplicada, mas é recomendada como taxa adequada valores inferiores a 300 m³/ha.

2.2.2 Concentração.

A concentração da vinhaça basicamente consiste em desidratar a solução. Tem como objetivo reduzir o volume final do subproduto colaborando com custos com logística, armazenagem e aplicação final. Outro fator importante desta técnica é o reuso da água retirada da vinhaça no processo industrial, possibilitando aumento na produção sem causar maiores impactos ao meio onde está situada a destilaria. Esta técnica, além de reduzir o volume final da vinhaça, também produz um concentrado de vinhaça com aplicação em ração animal, combustível para caldeiras especiais com a geração de cinzas potássicas e aplicação ao solo.

Esta técnica é conhecida há tempos, porém seu uso era inviável devido ao alto custo energético que a concentração demanda. Existem diferentes técnicas aplicadas à concentração, porém todas demandam energia para gerar calor para a desidratação da solução. Hoje com o avanço da cogeração, esta técnica está sendo implementada em usinas que investem em eficiência e redução de custos. Há processos que utilizam o vapor gerado nas caldeiras para os concentradores sem reduzirem a eficiência energética do sistema de cogeração.

2.2.3 Produção de metano.

A produção do metano se origina da digestão da matéria orgânica presente na vinhaça. Trabalhando em conjunto, um grupo de bactérias anaeróbicas degrada a matéria orgânica em um gás conhecido como biogás. Este gás possui alta concentração de metano e possui grande valor energético.

O tratamento anaeróbico para reduzir a carga orgânica de efluentes e resíduos urbanos e industriais é prática comum, utilizado inclusive no tratamento de esgoto urbano. Este tratamento ocorre em meios propícios às bactérias anaeróbicas, tais como os biodigestores para o tratamento de resíduos agrícolas e os reatores anaeróbicos que são utilizados para o tratamento

de resíduos urbanos e industriais. Dentre os reatores anaeróbicos destaca-se o Reator Anaeróbico de Fluxo Ascendente ou RALF, muito conhecido por seu nome em inglês UASB, que possui grande eficiência na redução da carga orgânica com baixos tempos de retenção.

O biogás formado pelo RALF pode ser utilizado em geradores, como microturbinas, para a geração de energia elétrica. É um processo simples de operar e não demanda muita energia e mão de obra, o que o torna uma fonte alternativa às fontes convencionais de energia que além de serem caras, são poluidoras ou de longo tempo de implementação.

O uso desta técnica aumenta o balanço energético da cana de açúcar e a competitividade da indústria sucroalcooleira, reduz as emissões de gases do efeito estufa e reduz a necessidade de grandes obras para infraestrutura energética. Os próximos capítulos discutem as tecnologias existentes no mercado e propõe um estudo de viabilidade técnica e econômica da implementação desta técnica.

3 – Biogás.

O gás descoberto no século XVIII por Alexandre Volta foi tratado como um gás residual sem muita utilidade para grandes centros industriais e urbanos. Inicialmente utilizado em áreas rurais da China e Índia para fins domésticos, o biogás vem se tornando uma fonte interessante de energia nos meios industriais e urbanos.

Uma característica importante do biogás são suas fontes geradoras. Este gás é formado pela decomposição natural da matéria orgânica presente nos mais diversos resíduos gerados pela atividade humana, seja em grandes centros populacionais, seja em indústrias e em áreas rurais.

Um ponto interessante sobre o biogás, é que para sua geração basta apenas existir resíduo orgânico. Ou seja, para sua produção não são necessários grandes lotes de terra, desmatamento e nenhum outro impacto gerado por outras fontes de energia. Resíduos sólidos destinados a aterros sanitários, resíduos de abatedouros, resíduos industriais (setores sucro-alcooleiros, cervejeiros, cítricos) e em agronegócios são exemplos de geradores de resíduo que podem ser utilizados para a geração de biogás sem nenhum impacto ao meio-ambiente.

As maneiras de estabilizar estes resíduos antes de devolvê-los ao ambiente são também formas de se obter o biogás. O uso de reatores anaeróbicos no tratamento de efluentes urbanos e industriais e aterros sanitários são exemplos de processamento de resíduos onde se produz o biogás como subproduto.

Este subproduto, em muitos casos não em sua totalidade, não é utilizado para a geração de energia elétrica. O biogás que é produzido pela digestão anaeróbica da matéria orgânica é queimado em queimadores, onde é feita a estabilização do metano. Embora a prática de aproveitamento energético do biogás vem se tornando conhecida em aterros sanitários.

3.1 Propriedades químicas.

O biogás é composto por diversos gases. Apresenta grande concentração de metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), e em menores concentrações o gás nitrogênio (N_2). Sua composição varia em função de fatores como o biodigestor e a fonte orgânica.

Em síntese, o biogás é composto pelos seguintes gases (Alves, 2000):

- Metano (CH_4): de 50 a 90% vol;
- Gás Carbônico (CO_2): de 10 a 50% vol;
- Outros gases de menores concentrações:
 - Hidrogênio (H_2): de 0 a 1% vol;
 - Gás Sulfídrico (H_2S): de 0 a 3% vol;
 - Oxigênio (O_2) + Nitrogênio (N_2): de 0 a 1% vol;

Como se trata de um gás inflamável que se pretende utilizar como combustível deve-se aprofundar o estudo do biogás para além de sua composição. Os estudos de vapores e líquidos combustíveis envolvem áreas de conhecimento que vão além de sua composição química. Tal conhecimento contribui para o aprimoramento e otimização da implementação e operação eficiente, limpa e segura de uma planta geradora de energia que utiliza o biogás.

O primeiro fator a ser considerado em relação ao gás combustível é o seu poder calorífico. O poder calorífico de um combustível é a quantidade de energia liberada pela combustão completa de uma quantidade do mesmo, podendo esta ser medida em unidade de massa ou volume (HALOUA *et al*, 2012 apud OKAMURA, 2013).

O poder calorífico de combustão divide-se em Poder Calorífico Inferior (PCI) e Poder Calorífico Superior (PCS). O processo de combustão gera alguns subprodutos como a água, devido ao hidrogênio presente no combustível. O Poder Calorífico Superior considera o calor latente da condensação da água, ou seja, quando obtemos a condensação da água produzida, temos um poder calorífico maior. Isto ocorre porque a energia gerada na condensação do vapor presente na combustão é recuperada na reação de combustão.

Já quando não há condensação da água, onde não há recuperação desta energia da condensação temos um Poder Calorífico Inferior, PCI. Para combustíveis que não possuam hidrogênio em sua composição o PCS é igual ao PCI.

Na falta da presença de água condensada, somente no estado gasoso, o poder calorífico é o inferior atingido na combustão, poder calorífico inferior (PCI).

Para se operar com gases e líquidos combustíveis é importante conhecer os limites de concentrações e de explosividade. A falta de conhecimento deles pode ser determinante para uma operação insegura e ineficiente.

A Tabela 3.1 mostra o poder calorífico do biogás para determinadas concentrações de metano no Biogás.

Composição Químicas do Biogás	Peso Específico	Poder Calorífico Inferior (PCI)
	(kg/nm ³)	(kcal/kg)
10%CH ₄ , 90%CO ₂	1,8393	465,43
50%CH ₄ , 50%CO ₂	1,4643	2.338,52
60%CH ₄ , 40%CO ₂	1,2143	4.229,98
65%CH ₄ , 35%CO ₂	1,1518	4.831,14
75%CH ₄ , 25%CO ₂	1,0268	6.253,01
95%CH ₄ , 05%CO ₂	0,7768	10.469,60
99%CH ₄ , 01%CO ₂	0,7268	11.661,02

Tabela 3.1 Poder calorífico versus concentração de metano no Biogás.

Fonte: Avellar, 2001 apud Costa, 2006

Em todo estudo de viabilidade técnica de um combustível faz-se a comparação com outras fontes energéticas. Com esta informação já se pode ter ideia do valor energético final gerado pela fonte. A Tabela 3.2 compara o Biogás com as fontes energéticas mais comuns.

O biogás é um gás de baixa densidade, ele apresenta densidade inferior a do ar atmosférico, o que dificulta sua liquefação. Este gás é de difícil armazenamento por apresentar um grande volume e ser de difícil liquefação.

Combustível	Massa Específica (kg/nm ³)	Poder calorífico	
		Inferior (kcal/kg)	Superior (kcal/kg)
Biogás (60%CH ₄)	1,2143	4.230	
Petróleo	867	10.200	10.900
Carvão vapor	Não definido	4.000	4.460
Carvão metalúrgico	Não definido	7.425	7.700
Lenha	390	2.530	3.300
Cana de açúcar	Não definido	917	1.030
Óleo diesel	851	10.180	10.750
Óleo combustível	999	9.547	10.900
Gasolina	738	10.556	11.230
GLP	552(liq.) 2,29(gás)	11.026	11.750
Nafta	704	10.462	11.320
Querosene	787	10.396	11.090
Gás canalizado	Não definido	4.230	4.700
Gás de coqueira	Não definido	4.400	4.500
Coque de carvão mineral	Não definido	6.900	7.300
Lixívia	2100		3.030
Carvão vegetal	250	6.115	6.800
Álcool anidro	791	6.400	7.090
Álcool hidratado	809	5.950	6.650
Bagaço de cana	Não definido	1.777	2.257
Gás de refinaria	0,78	8.272	8.800
Gás natural	Não definido	8.554	9.400

Tabela 3.2 Poder calorífico de fontes energéticas.

Fonte: Alves (2000)

A dificuldade em comprimir e liquefazer o biogás o faz inadequado à estocagem e um problema logístico devido ao grande volume produzido, caso seja estudada a concentração dele em centrais de distribuição. Uma vez que este apresentará grandes volumes a ser transportado.

Porém, o fato de o biogás se dispersar facilmente e de não se acumular em espaços confinados concede a ele uma vantagem operacional no trato de líquidos e gases inflamáveis. Os riscos de incidentes e emergências com explosões e incêndios são menores com gases e vapores combustíveis de densidade baixa (inferior à do ar atmosférico).

Outra vantagem operacional do biogás é sua baixa concentração de CO, inferior a 0,1%. O monóxido de carbono é um gás tóxico, e até em baixas concentrações é extremamente prejudicial. Há gases com concentração de monóxidos de carbono superior a 20% como o chamado gás da cidade, considerado letal.

O H₂S impõe ao biogás uma característica corrosiva a ele, o manuseio dele deve ser feito por equipamentos próprios a materiais corrosivos.

3.2 Microbiologia e bioquímica na formação do biogás.

O gás produzido pela degradação da matéria orgânica é conhecido desde 1776, quando Alessandro Volta descobriu o “ar combustível” formado em sedimentos em fundos de lagos e rios. A formação do metano, presente no biogás, é um fenômeno natural presente em reações biológicas em ambientes anaeróbicos. Este fenômeno acontece graças às bactérias metanogênicas, presentes em ambientes anaeróbicos. São conhecidas nove espécies diferentes de bactérias formadoras de metano, as quais incluem bastonetes, cocos e micrococos (COMASTRI, 1981). Estas bactérias somente existem em ambientes anaeróbicos e apresentam desenvolvimento lento. São extremamente sensíveis a variações em temperatura, variações por deveras bruscas podem interromper a biodigestão.

Este fenômeno é chamado de digestão anaeróbica e consiste em degradar o material orgânico produzindo como subprodutos metano, gases inorgânicos e estáveis e o biofertilizante. É o processo da natureza de recompor suas fontes de nutrientes. Ocorre em ecossistemas ricos em bactérias metanogênicas e matéria orgânica. É usado pelo ser humano para o tratamento de efluentes urbanos e industriais como forma de controlar a carga orgânica e reduzir microrganismos patogênicos.

Os reatores anaeróbicos são os ecossistemas criados para se controlar e otimizar este processo de digestão. Eles são herméticos, garantindo um ambiente anaeróbico, e possuem capacidade térmica que ameniza as variações de temperatura no ecossistema biológico dentro do reator, criando um ambiente ideal para as bactérias metanogênicas. Com as condições próprias, os diversos grupos de microrganismos trabalham em reações bioquímicas para a conversão do material orgânico em biogás. Esta reação bioquímica pode ser dividida em quatro etapas, caracterizadas por seus grupos de microrganismos presentes: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese, conforme é apresentado no trabalho de Salomon (2007, p.11).

O fluxograma da figura 3.1 mostra as etapas do processo de degradação do material orgânico em ambiente anaeróbico resultando no subproduto metano.

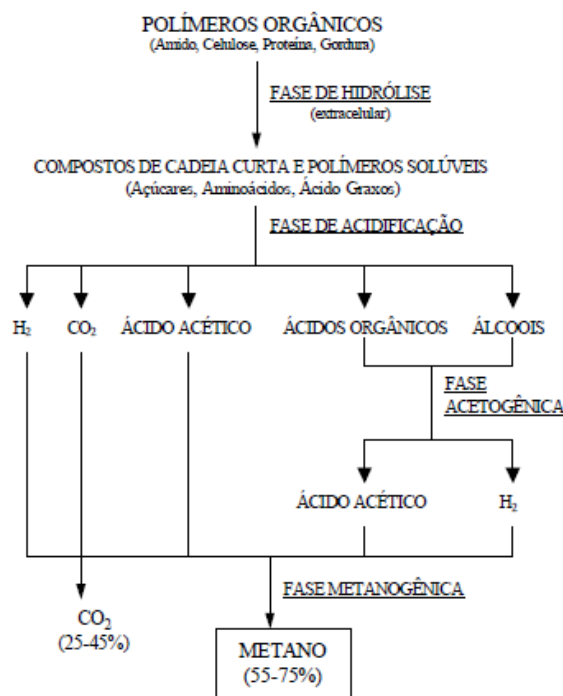


Figura 3.1 Fases da biodigestão.
Fonte: CNI (1984) apud Pinto (1999)

3.2.1 Hidrólise.

A carga orgânica a ser degradada é constituída por moléculas complexas de proteínas, amidos, lipídios e celulosas. Estes compostos complexos não são absorvidos pelas bactérias diretamente, pois são grandes e complexos demais.

As bactérias ao se alimentarem de compostos complexos realizam um processo de quebra da matéria orgânica formando compostos simples. Este é o processo da hidrólise, processo que reduz o tamanho e complexidade dos compostos orgânicos para pequenas moléculas que podem ser aproveitadas pela bactéria.

Esta é a primeira etapa na degradação da matéria orgânica para o metano, ela é importante pois quebra as proteínas, amidos, lipídios e celulosas em compostos de açúcares, ácidos orgânicos, aminoácidos, etc. O processo de hidrólise ocorre com a liberação de enzimas extracelulares liberadas externamente pelas bactérias fermentativas hidrofílicas. Esta etapa é lenta, e segundo Lema et al (1997) é ela que limita o processo de digestão anaeróbica. Esta etapa é afetada por temperatura, pH, tempo de retenção e pela superfície de contato das partículas, sendo que para otimizar esta etapa as condições mais propícias são de pH levemente ácido, temperatura levemente alta e com partículas finamente divididas.

3.2.2 Acidogênese.

Nesta fase a dinâmica do processo é rápida. Nela as bactérias heterogêneas incorporam os compostos simples gerados na hidrólise e os fermentam. Dentre estas bactérias presentes nesta etapa estão as bactérias acidogênicas, elas incorporam os compostos simples e os convertem em ácidos graxos voláteis (ácido acético, propiônico, butírico) , álcoois, hidrogênio e amônia após degradarem os compostos antes listados.

Estas bactérias possuem tempo de duplicação de 30 minutos (Mussati et al, 1998) e podem ser tanto anaeróbicas quanto facultativas. As facultativas consomem o oxigênio dissolvido no substrato, o oxigênio é fatal às bactérias anaeróbicas presentes na digestão.

3.2.3 Acetogênese.

Na Acetogênese as bactérias produtoras de hidrogênio transformam os subprodutos da etapa anterior, monômeros (ácidos graxos voláteis, álcoois, amino ácidos e carboidratos), em acetatos, H_2 e CO_2 .

São dois os mecanismos que participam desta etapa. O mecanismo acetogênese de hidrogenação, realizada pelas bactérias homoacetogênicas, produz o acetato a partir do dióxido de carbono e do hidrogênio.

E o segundo mecanismo chamado de acetogênese de desidrogenação, realizado pelas bactérias acetogênicas formadoras de hidrogênio. Neste mecanismo os monômeros produzidos na etapa anterior são oxidados a acetato, formando também dióxido de carbono e hidrogênio.

Estes grupos de bactérias apresentam baixo crescimento, sua duplicação ocorre no intervalo de tempo de 1,4 a 4 dias (Mussati et al, 1998). Os produtos gerados nesta etapa são apropriados à metanogênese, as bactérias metanogênicas apenas assimilam o acetato e o dióxido de carbono produzidos em todas as etapas anteriores.

3.2.4 Metanogênese.

Última etapa do processo de degradação anaeróbica do material orgânico, esta etapa apresenta em seu subproduto o metano e o dióxido de carbono. Esta etapa é realizada pelas Árqueas Metanogênicas, microrganismos estritamente anaeróbicos que se alimentam de dióxido de carbono e acetato. O acetato é o maior responsável pela produção do metano, aproximadamente 70% do produto final produzido provem do acetato. O restante do metano produzido é gerado por H_2 e CO_2 .

São dois os mecanismos presentes na metanogênese, eles são caracterizados pelo subproduto que utilizam para gerar o metano.

O primeiro utiliza dióxido de carbono e hidrogênio, H_2 (doador de elétrons) e CO_2 (receptor de elétrons), como fonte. Este mecanismo é realizado pelas árqueas hidrogenotróficas, e produz moléculas de metano e água. As árqueas hidrogenotróficas se desenvolvem em alta velocidade, levando um tempo mínimo de 6 horas para se duplicarem.

O segundo mecanismo é realizado pelas áruqueas acetoclásticas que utilizam o subproduto acetato para a produção do metano. Estas áruqueas são de lento desenvolvimento e alteram o pH do ambiente pois consome o acetato e produzem o dióxido de carbono.

A metenogênese é a etapa mais sensível do processo, sua eficiência depende de quais condições as bactérias metanogênicas estão submetidas. Condições de pH, temperatura, nutrientes e tempo de retenção influenciam nesta etapa e na quantidade de metano como produto final.

3.2.5 Bactérias Sulfetogênicas.

A presença de compostos com a presença de enxofre cria uma concorrência pela matéria orgânica no substrato.

A redução de sulfato ocorre com as presenças das bactérias sulfetogênicas, ocorre como uma segunda etapa da metanogênese. Esta redução ocorre com o acetato produzido na acetogênese. Segundo Visser (1995) a ocorrência da redução do sulfato possui suas vantagens e desvantagens, sendo as desvantagens:

- Uma parte do material orgânico será utilizada na redução de sulfato e não na produção de metano. Reduzindo a capacidade de geração energética do biogás;
- Parte do sulfato estará presente no efluente do reator anaeróbico;
- Sulfeto é um componente inibidor às bactérias anaeróbicas, sejam as metanogênicas, acetogênicas e sulfetogênicas. Acumulação de sulfeto pode inibir o sistema digestor, podendo interrompê-lo em casos mais severos;
- A produção do sulfeto no biogás pode causar odor, similar a ovo podre, e danificar equipamentos do sistema, como tubulações e geradores. Investimentos maiores são necessários para operar com o sulfeto.

E as vantagens são as seguintes:

- A redução de formas mais agressivas do sulfeto, presentes no afluente, em uma forma menos agressiva do sulfeto;
- Precipitação de metais pesados presentes no afluente serão removidos. Reduz o potencial de toxicidade dos metais pesados ao sistema anaeróbico.

A ocorrência da redução de sulfeto durante a digestão anaeróbica é considerada indesejada devido aos problemas que causa ao processo (VISSER, 1995).

3.3 Fatores que influenciam na digestão anaeróbica.

As características do ambiente e da matéria-prima utilizada no processo de digestão anaeróbica são determinantes para a eficiência na produção do biogás e do metano. A escassez de uma destas características pode levar à falência total do processo.

Os seguintes tópicos apresentam variáveis controláveis para a operação e variáveis incontroláveis. Ambas as variáveis devem ser acompanhadas para se manter um processo eficiente.

3.3.1 Temperatura.

A temperatura é um fator importante para as reações enzimáticas envolvidas na digestão. Temperaturas maiores tendem a influenciar positivamente a eficiência na produção do metano. Influência direta na fermentação, a temperatura do processo pode variar segundo suas faixas de classificação, definidas como:

- a) Faixa psicrófila: de 0 a aproximadamente 20°C;
- b) Faixa mesófila: de 20 a aproximadamente 45°C;
- c) Faixa termófila: de 45 a aproximadamente 65°C;

Na faixa psicrófila encontram-se os processos mais lentos e ineficientes. Processos com temperatura inferiores a 15°C pouco produzem o metano abaixo de 10°C não são recomendados por sua ineficiência na produção do gás. Nestas temperaturas a produção do metano pode até ser cessada.

As duas outras faixas são classificadas pelos grupos de arqueas metanogênicas que melhor se desenvolvem e processam a matéria orgânica na faixa de temperatura determinada. Segundo Soares e Hirata (1997 apud Salomon, 2007, p. 18) as arqueas mesófilas operam na faixa de 20 a 45°C, ponto de maior eficiência é 35°C, e as arqueas termófilas na faixa de 45 a 65°C, ponto de maior eficiência em 55°C. Quando o processo ocorre na faixa de 35 a 37°C a produção de metano é altamente acelerado.

A faixa termófila é altamente instável e de difícil controle, além de que para se operar nesta faixa de temperatura muitas vezes é necessário o aporte de energia para se atingir as altas temperaturas da faixa. As bactérias da metanogênese são muito sensíveis às variações térmicas, portanto é importante trabalhar em uma faixa de temperatura controlável que não demande manutenção contínua e de interrupções no atendimento. Uma técnica para o controle de temperatura para digestores que operem na faixa mesófila é construir o digestor enterrado, uma vez que as reações enzimáticas do processo são exotérmicas e geram calor.

O projeto do digestor deve levar em conta a faixa de operação do sistema. Fatores como operação e manutenção também serão afetados pela faixa de temperatura do sistema.

3.3.2 pH.

A condição de acidez ou alcalinidade, medida pelo pH, de um meio configura se o mesmo é um meio propício para seres vivo ou não. Com as bactérias envolvidas na digestão anaeróbica a regra não muda. Meios muito ácidos ou muito alcalinos são determinantes para a sobrevivência dos microrganismos neles presentes, alterações no pH do meio podem levar à interrupção do desenvolvimento microbiótico do meio chegando até a total falência do mesmo.

O pH é um índice que determina o quão ácido ou quão alcalino o meio é. Valores abaixo de 7 indicam um meio mais ácido e acima de 7, um meio alcalino. Existem medidores manuais e automáticos que podem medir o pH de um meio, o uso destes medidores é importante para se controlar a operação do processo.

Segundo Lema (1997) o pH ideal ótimo dependerá da variedades de bactérias que estão envolvidas e são participativas no processo. A faixa de pH entre 6,0 e 8,0 é considerada operacional, em que a produção de metano é ainda alta. Meios onde o pH extrapolam a faixa citada apresenta baixa produção podendo cessar abaixo de 6,0.

A influência do pH depende das etapas e de suas bactérias. Para a conversão de proteínas a aminoácidos a faixa de operação é de 7,0 a 7,5. Já na conversão do aminoácido em ácidos o pH deve ser mais ácido com índice 6,3 ideal.

As arqueas metanogênicas operam dentro de uma faixa de neutralidade, sendo que o ideal para se trabalhar com estas bactérias é manter o pH entre a faixa de 6,5 a 7,5. Valores diferentes a esta faixa vão comprometer a produção de metano pelas arqueas. As bactérias produtoras de ácido possuem uma tolerância maior a meios ácidos e possuem maior desenvolvimento na faixa entre 5,0 e 6,0. Quando a hidrólise ocorre mais rápida que a metanogênese há uma acumulação de ácidos graxos no meio, isso reduz o pH do sistema levando ao fim do processo de produção de metano. O baixo pH do meio pode acelerar as bactérias formadoras de ácido e reduzir a ação das arqueas metanogênicas levando ao processo citado acima.

Como a digestão anaeróbica ocorre devido a um consórcio de bactérias deve-se buscar uma faixa de pH que proporcione o melhor desenvolvimento do grupo celular, deve-se manter o equilíbrio para que o desenvolvimento de um grupo bacteriano não possa atrapalhar o desenvolvimento do outro ao alterar as condições de pH do meio.

Os meios de se controlar o pH dos digestores dependem da acidez e alcalinidade, do tamanho do reator e da operação que está sendo realizada. Para corrigir meios ácidos pode-se usar um método de interromper por alguns dias a alimentação do digestor para que ele se corrija através das reações realizadas internamente, quando na operação é possível acumular o resíduo.

Existe também a prática de adicionar aditivos ao reator com o objetivo de se obterem reações que neutralizem o pH. Para meios deveras ácidos recomenda-se cal, carbonato de sódio, bicarbonato de sódio e aditivos fornecidos pelo mercado. Para meios com alta alcalinidade pode-se utilizar ácido acético, acetato de sódio e aditivos fornecidos pelo mercado para este fim.

O manuseio destes produtos deve ser feito por pessoa treinada, pois algumas das substâncias utilizadas para a correção são perigosas à saúde. Estes tipos de operação devem ser realizados sob supervisão apropriada e todas as medidas de segurança descritas na Ficha de Informação de Segurança do Produto Químico devem ser adotadas. Não se recomenda o uso de

soda cáustica e de amônia para as correções devido ao grande risco envolvidos em seu manuseio e estoque.

3.3.3 Composição e concentrações do afluente.

A composição do resíduo que será processado na digestão anaeróbica é determinante no resultante final do sistema. Algumas substâncias são necessárias, algumas são suplementares e outras até prejudicam as reações. Conhecer a gama de componentes químicos e suas implicações sobre a digestão é importante para se determinar a capacidade de produção de metano.

A concentração de sólidos voláteis, sólidos orgânicos contidos no resíduo, associados à presença de nitratos, fosfato e sulfatos se relacionam diretamente a produção de biogás que pode ser produzido. Os sólidos voláteis são fermentados para produzir o biogás.

A capacidade de geração de metano no biogás dependerá da demanda química de oxigênio (DQO), unidade que mede a concentração de sólidos voláteis formadores de metano. Quanto maior for a DQO do resíduo maior será o potencial gerador de metano.

Os elementos químicos normalmente presentes na matéria orgânica e indispensáveis na digestão são: carbono, oxigênio, nitrogênio, fósforo e enxofre. O nitrogênio presente em proteínas é importante para regular o pH do meio, já o enxofre em grandes concentrações aumenta a produção de H_2S e redução no metano presente no biogás (redução de sulfato). O carbono essencial para a formação do metano é fornecido por moléculas de CO_2 e das cargas orgânicas.

Alguns micronutrientes (Co, Cu, Mn, Mo, Zu, Ni, Se) são importantes para as reações enzimáticas e íons como o K^+ , Na^+ , Ca^{+2} , NH_4^+ , Fe^+ e Mg^{+2} em baixas concentrações favorecem o metabolismo celular acelerando o processo, e quando em altas concentrações inibem o metabolismo.

Alguns destes dados são raramente conhecidos, e portanto para muitos resíduos eles são desconhecidos e não é possível se prever alguns controles para ajustar o resíduo. Um dado básico que deve ser estudado é o DQO, uma vez que este se relaciona diretamente com a produção de metano. De acordo com Chernicharo (1997) a relação usualmente desejada no tratamento de efluentes é:

$$DQO:N:P = 350:5:1$$

Deve-se atentar a nutrientes e substâncias tóxicas ao processo, pois as bactérias metanogênicas são facilmente inibidas por substâncias tóxicas e afeta a viabilidade da aplicação do digestor anaeróbico.

Os grupos de substâncias tóxicas e seus efeitos são:

- Amônia:

A presença de amônia na composição do resíduo pode ser benéfica ou maléfica, o bicarbonato de amônia é uma fonte importante de nitrogênio e regula o pH do processo. Porém quantidades elevadas do íon de amônia e de amônia livre levam a redução e até inibição da produção de metano. Speece (1995, apud Salomon, 2007, p.22) mostra que a adição de resíduo com grande concentração de amônia faz com que a produção de metano decair gradativamente a zero. O estudo realizado também mostrou que após dias da inserção de grande concentração de amônia o sistema voltou a produzir o metano, o que indica que a amônia não é bactericida.

- **Sulfato:**

O composto de sulfeto de hidrogênio, H_2S , é tanto necessário à digestão quanto tóxico a ela. Em associação a água o sulfeto de hidrogênio se desassocia em íons livres que alteram o pH do meio. Segundo Lettinga e Rinzema (1985) concentrações acima de 145 mg S/l inibem o processo.

- **Metais pesados:**

Os metais pesados, como os elementos e compostos químicos formados por arsênico, cobre, cromatos, cromo, cianeto, níquel, dentre outros, são tóxicos à digestão anaeróbica. A taxa de concentração admissível no sistema dependerá da concentração de sulfetos, pois o sulfeto reage com os metais formando os sais de sulfeto. Estes sais de sulfeto são insolúveis e não são tóxicos à digestão anaeróbica, portanto a capacidade máxima admissível de metais no processo dependerá da quantidade de sulfetos disponível para neutralizar o metal. Em meios onde é difícil controlar a quantidade de metal presente no resíduo é importante controlar a quantidade de sulfeto presente.

3.3.4 Tempo de retenção.

Tempo de permanência do resíduo dentro do reator, digestor. Seja em reatores contínuos ou em reatores em bateladas o tempo de retenção possui os mesmos parâmetros, ele representa o tempo em que o efluente adentra o reator até o momento onde o afluente sai do reator.

Este tempo é determinado pelo tamanho do digestor, pela carga aplicada a ele, pela eficiência do reator e pela demanda geral de biogás necessária. Em digestores rurais o tempo de retenção pode atingir longos períodos, chegando a 50 dias, e em reatores industriais e de saneamento o tempo de retenção é de horas. O tipo de operação utilizado, contínuo ou batelada, também influi no tempo de retenção.

3.4 Purificação do biogás.

O biogás é composto por uma gama de diferentes gases, o metano inclusive. Alguns destes gases são indesejáveis para as aplicações e usos do biogás e é necessária a limpeza do

mesmo através de purificadores. Os sistemas de purificação são projetados de acordo com a necessidade e especificações técnicas demandadas pela operação posterior do biogás.

Na composição do biogás há esscstâncias que prejudicam a combustão completa e reduzem seu poder calorífico. A presença de água e dióxido de carbono na combustão reduz a produção de calor, pois há absorção de parte da energia, havendo então uma redução do poder calorífico e da reação em cadeia que ocorre nas combustões. A tabela 3.3 apresenta as propriedades mínimas que um gás deve possuir para ser considerado um combustível.

O ácido sulfídrico é outra substância que se deve eliminar do biogás, ele reduz o pH do biogás e o torna um gás corrosivo. Deve-se ficar atento, pois para operar com um gás corrosivo será necessário um investimento maior em equipamentos e manutenções e por isso deve-se purificar o gás e eliminar o H_2S . Há também a presença de nitrogênio e hidrogênio na composição do biogás.

Os fabricantes de equipamentos de cogeração determinam padrões mínimos para as propriedades de um gás combustível, as propriedades da combustão devem ser mantidas a fim de prevenir danos às máquinas. Estes padrões também se aplicam ao biogás.

Propriedade	Medida	Módulo
Poder Calorífico Inferior (PCI)	H_u	$\geq 4 \text{ kWh/m}^3$
Conteúdo total de sulfato	S	$\leq 2,2 \text{ g/m}^3 \text{ CH}_4$
ou conteúdo de H_2S	H_2S	$\leq 0,15 \text{ Vol. - \%}$
Conteúdo total de Cloro	Cl	$\leq 100 \text{ mg/m}^3 \text{ CH}_4$
Conteúdo total de Flúor	F	$\leq 50 \text{ mg/m}^3 \text{ CH}_4$
Combinação de Cloro e Flúor	(Cl + F)	$\leq 100 \text{ mg/m}^3 \text{ CH}_4$
Partículas (3 ... 10 μm)		$\leq 10 \text{ mg/m}^3 \text{ CH}_4$
Humidade relativa (teor na menor temperatura de tomada de ar, i.e. condensação na tubulação de entrada)	ϕ	$< 90 \%$
Pressão do gás antes de entrar no sistema de controle do gás	P	20 ... 100 mBar
Variação da pressão do gás		$< \pm 10 \%$ do valor padrão
Temperatura do gás	T	10 ... 50 $^{\circ}\text{C}$
Hidrocarbonetos		$< 0,4 \text{ mg/m}^3 \text{ CH}_4$
Silício	Si	$< 10 \text{ mg/m}^3 \text{ CH}_4$
Metano (Biogás é aprox. 135)	MZ	> 135

Tabela 3.3 Propriedades mínimas de um gás combustível com presença relativa de oxigênio 5%.

Fonte: Seadi et al., 2008

Existem diversas maneiras de se purificar o biogás que variam conforme a necessidade e opções tecnológicas presentes no mercado. Os modos como são eliminados os compostos indesejáveis são definidos de acordo com impurezas, como a tabela 3.4 mostra.

O processo de purificação do biogás possui a finalidade de isolar o metano de impurezas para aumentar seu potencial energético e reduzir emissões de gases indesejáveis e danos a equipamentos.

Impurezas	Descrição Geral	Detalhes
Água	Adsorção	Silica Gel
		Peneira molecular
		Alumina
	Absorção	Etileno Glicol
		Temperatura -6,7°C
		Selexol
	Refrigeração	Resfriamento a 2°C
		Carvão ativado
		Óleo Leve
Hidrocarbonetos	Adsorção	Etileno Glicol
		Selexol
		Temperaturas entre -6,7°C e -33,9°C
	Combinação	Refrigeração com etileno glicol e absorção em carvão ativado
		Solventes orgânicos
		Selexol
	Absorção	Flúor
		Rectisol
		Soluções de sais alcalinos
CO ₂ e H ₂ S		Potássio quente e potássio quente inibido
		Alcalonaminas
		Mono, di - tri - etanol – amina
		Deglicolamina
		Ucarsol-CR
	Adsorção	Peneira molecular
		Carvão ativado
		Separção por membranas
		Membrana de fibra ocas

Tabela 3.4 Técnicas para purificação de impurezas do biogás.

Fontes: ALVES, 2000;

A seguir uma breve discussão de algumas destas técnicas.

3.4.1 Remoção da umidade.

Como visto anteriormente, a umidade do gás pode reduzir o poder calorífico do biogás ao absorver parte do calor gerado na combustão.

O grau de umidade aceito irá depender do posterior uso do mesmo e dos resultados finais esperados. Para remover a umidade de um gás são utilizados dois métodos, o primeiro onde se utiliza um material que retenha a água presente no gás, como a sílica gel ou glicol. Um segundo método é refrigerar o gás para condensar a umidade em água que é coletada antes de se reaquecer o gás.

3.4.2 Remoção de dióxido de carbono.

Existem no mercado inúmeros métodos para a remoção do dióxido de carbono de gases, como o gás natural por exemplo. Dentre as técnicas existentes podemos destacar a absorção, a adsorção e separação por membranas.

Segundo o Ministério da Nutrição, Agricultura e Defesa do Consumidor da Alemanha (2010) “tanto na Alemanha como nos demais países europeus, os processos de tratamento mais utilizados são a lavagem com água sob pressão e os equipamentos de adsorção com modulação de pressão, seguidos pela lavagem química”.

- Absorção física: Há dois tipos de absorção utilizados, a absorção física e a absorção química. Ambos os métodos são bastantes eficazes mesmo se tratando de baixas quantidades de biogás produzido, isso faz deste método bastante conhecido. A absorção física utiliza a água como absorvente físico do CO₂. Neste método o biogás comprimido é lançado ao fundo de uma torre de purificação e ascende ao topo da mesma onde é pulverizado um jato de água pressurizada na direção oposta ao fluxo do gás. Neste processo o CO₂ é absorvido e a água acumulada é retirada no fundo da torre junto do dióxido de carbono absorvido no processo. A eficiência da remoção depende de fatores como: dimensões do purificador, pressão do gás, pureza e vazão da água. Bhattacharya et. al., (1988 apud, Salmon, 2007, p. 42), demonstra um sistema capaz de purificar o gás a 100% metano, relatos na literatura mostram que de 5-10% do CO₂ permanecem no biogás em purificadores utilizados na indústria. Este método consome grande quantidade de água e demanda alta pressão do gás.
- Absorção química: Há também a absorção química, onde substâncias químicas reagem ao CO₂. Nesta reação química, as moléculas de CO₂ sofrem ligações com os solventes químicos utilizados. Estas ligações entre as substâncias químicas e o CO₂ são reversíveis, e o solvente químico pode ser regenerado para reuso. Esta regeneração demanda de elevado consumo de energia. A tabela 4.4 mostra os reagentes mais utilizados para este fim, em destaque o uso do carbonato de potássio (K₂CO₃) que possui grande aceitação para a purificação de gases nas indústrias. O método é um pouco parecido com a absorção física, o gás é dispersado no fundo de uma torre e ascende ao topo onde a solução de água e do produto químico é injetado. O método de regeneração dependerá da solução química utilizada. Para o carbonato de potássio a

regeneração se dá numa coluna separada onde o CO_2 é liberado a atmosfera ao sofrer uma descompressão.

- Adsorção: A adsorção é a adesão de moléculas de um fluido, adsorvido, a uma superfície sólida. A eficiência da adsorção depende da temperatura, da pressão e da área de superfície de contato. É um processo simples de fácil operação, que porém causa queda de pressão do gás. Para este fim são utilizados sólidos porosos que aumentam a superfície de contato com o gás filtrado, aumentando a eficiência do processo.
- Separação por membranas: O processo de separação por membranas é relativamente novo na área de tratamento de biogás e ainda se encontra em desenvolvimento. O princípio é reter alguns componentes do biogás em uma membrana, o fluxo de componentes se dá por diferença de pressão e pela capacidade do componente de atravessar a membrana. Por causa do seu tamanho reduzido, a molécula de metano se difunde mais rapidamente pela maioria das membranas que o dióxido de carbono e o sulfeto de hidrogênio. O fluxo de gás aumenta conforme a diferença de pressão aumenta, e a pureza do gás pode ser ajustada pela superfície da membrana e a velocidade do fluxo, além do tipo de membrana e o número de estágios. O fluxo máximo suportado pela membrana deve ser levado em conta.

A tabela 3.5 compara através dos teores de metano concentrado possíveis de cada método, há uma variação de 96% a 99%. A determinação do método depende do volume e fluxo do gás a ser tratado e do grau de pureza esperado ao fim do processo. A determinação do método remoção de carbono deve levar em conta os processos de lavagem do sulfato e da secagem do biogás, uma vez que alguns métodos requerem que o gás seja previamente tratado.

Processo	Princípio de ação/ características	Teor de CH ₄ possível	Dados
Adsorção com modulação de pressão	Adsorção e dessorção físicas e alternadas por modulação de pressão	> 97 %	Grande número de projetos realizados, exige a dessulfurização e secagem prévias, equipamento permite baixo grau de regulação, elevado consumo de eletricidade, não exige calor, escape de metano elevado, não utiliza produtos químicos
Lavagem com água sob pressão.	Absorção física com água como solvente; regeneração por redução da pressão.	> 98 %	Grande número de projetos realizados, exige dessulfurização e secagem a montante, adapta-se ao fluxo volumétrico de gás, elevado consumo de eletricidade, não exige calor, escape de metano elevado, não utiliza produtos químicos.
Tratamento com aminas.	Absorção química por meio de soluções aquosas de aminas, regeneração por vapor d'água.	> 99 %	Alguns projetos realizados, indicado para pequenos fluxos de gás, baixo consumo de eletricidade (processo despressurizado), exige muito calor, escape de metano mínimo, utiliza grande quantidade de solução de lavagem.
Lavagem Genosorb.	Análoga à lavagem com água sob pressão, com Genosorb (ou Selexol) como solvente.	> 96 %	Poucos projetos realizados, proporciona economia em grandes usinas, não exige dessulfurização e secagem a montante, adaptação flexível ao fluxo volumétrico de gás, elevado consumo de eletricidade, exige pouco calor, escape de metano elevado.
Processo por separação por membranas.	Gradiente de pressão em membranas porosas para separação de gás; ou velocidade de difusão de gases.	> 96 %	Poucos projetos realizados, exige dessulfurização e secagem prévias, elevado consumo elétrico, não exige calor, escape de metano elevado, não utiliza produtos químicos.
Processo criogênico.	Liquefação de gases por retificação, separação em temperaturas criogênicas.	> 98 %	Projeto-piloto, exige dessulfurização e secagem prévias, grande consumo de energia elétrica, escape de metano muito reduzido, não utiliza produtos químicos.

Tabela 3.5 Comparações entre os métodos de purificação do metano.

Fonte: Ministério da Nutrição, Agricultura e Defesa do Consumidor da Alemanha (2010).

3.4.3 Remoção de sulfato (H₂S).

Dentre os malefícios causados pelo ácido sulfídrico (H₂S) estão a corrosão de equipamentos, como tubulações, tanques de armazenagem e ao sistema de conversão térmica, e a toxidade e perigo a saúde humana e ao meio ambiente local. Segundo os dados da tabela 3.3, os padrões mínimos que os fabricantes de sistemas de cogeração impõem são de quantidades de sulfato inferiores a 2,2 g/m³ CH₄.

A dessulfurização do biogás pode ser feita por inúmeros métodos, sejam eles biológicos, químicos ou físicos, e podem ser internas e externas ao biodigestor.

- Dessulfurização biológica interna ao biodigestor: Baseado no processo de introdução de oxigênio (2 – 6%) no interior do biodigestor, este processo é talvez o mais praticado na remoção de sulfato. Segundo Guia Prático do Biogás (2010), na presença de oxigênio, a bactéria *Sulfobacter oxydans* converte o sulfeto de hidrogênio em enxofre elementar, que em seguida é descarregado do reator pelos biofertilizantes. O ar pode ser introduzido aos biodigestores por pequenos compressores de ar, o que torna a técnica simples. Uma das vantagens esperada na utilização deste processo é a redução do custo do resíduo do lavador de sulfato, uma vez que o mesmo já se encontra no biofertilizante aumentando seu potencial nutritivo. Este tratamento não é adequado quando se busca qualidade de gás natural. Possui como vantagem sua simplicidade em maquinário e manutenção, o que a torna barata. Não exige aditivos químicos e o enxofre volta em forma de adubo. As desvantagens são a falta de controle sobre a qualidade do biogás produzido em relação às variações sofridas nos volumes produzidos de biogás e por não poder otimizar a redução do enxofre. Deve-se também considerar que o oxigênio pode levar o biogás a sua condição explosiva e que ele pode atrapalhar o processo anaeróbico.
- Dessulfurização biológica externa ao biodigestor: A fim de evitar os efeitos adversos causados pela introdução do oxigênio no interior do biodigestor, são fornecidos equipamentos que realizam o mesmo processo externamente. Estes equipamentos são os tanques ou colunas de dessulfurização, que permitem um controle sobre a efetividade da redução de enxofre pelo controle da quantidade de ar introduzido. Estes equipamentos são compostos por um reator com enchimento poroso que forma um leito fixo, onde se desenvolvem microrganismos, uma fossa, uma bomba e um bocal que permite a lavagem do enchimento. O enxofre do biogás é retido por processos biológicos realizados pelos microrganismos desenvolvidos nos poros e é transformado em compostos que são lavados pela água introduzida pelo bocal. Este processo depende da introdução a montante de pequenas quantias de oxigênio. Suas vantagens são referentes às desvantagens do método anterior. Este é um sistema controlável e otimizável cuja introdução de oxigênio não perturba o processo de metanogênese e possui tecnologia simples. Porém a adição de mais um componente ao sistema final eleva o custo em manutenção e operação além de demandar injeção de ar elevada no filtro percolato.
- Adsorção por carvão ativado ou óxidos de ferro: A adsorção por carvão ativado ou óxidos de ferro age por oxidação do ácido sulfídrico formando sulfetos de hidrogênio ou sulfetos de ferro. A reação ocorre quando o H_2S entra em contato com o agente catalisador do filtro, no caso o carvão ativado ou o óxido de ferro, acelerando o

processo de oxidação do enxofre. Os agentes catalisadores são dispostos de forma a aumentarem a superfície de contato com o gás a ser tratado. Estes processos são sensíveis à presença de água no biogás. Há compostos, como o iodeto de potássio e o permanganato de potássio, que ao serem impregnados ou dopados ao carvão ativado aumentam a performance conferindo maior velocidade de oxidação e aumento da capacidade de carga. O carvão dopado com permanganato de potássio apresenta ótima eficiência ao trabalhar com biogás com presença de água. É um método muito eficiente na remoção do enxofre do biogás, que porém possui custos com manutenção da regeneração e substituição dos catalisadores utilizados. O enxofre removido do biogás não é reaproveitado.

- Absorção física por lavagem bioquímica: Processo de dois estágios, um de lavagem física do gás e outro de tratamento do enxofre. No primeiro estágio, o biogás é introduzido em uma coluna de tratamento, onde é lavado por água. No processo de lavagem o enxofre contido no biogás é absorvido. A adição de soda cáustica, NaOH, ao solvente, água, aumenta a eficiência de remoção do enxofre. O segundo estágio envolve o tratamento da água residual da lavagem, ocorre em um biodigestor (regeneração da solução de lavagem com presença de oxigênio) e um separador de enxofre (remoção de enxofre elementar). Este método é interessante por não introduzir oxigênio ao biogás, o processo de tratamento biológico ocorre na regeneração separada ao processo de remoção do enxofre. Este processo consome muita água e demanda manutenção regular da solução utilizada. A utilização de soda cáustica representa risco à saúde e segurança do trabalho; seu uso aumenta a exposição ao risco. Como vantagem este método se difere dos anteriores por não haver necessidade de inserir oxigênio nem internamente ao biodigestor nem ao biogás.
- Absorção química – precipitação de sulfeto: Este processo acontece através da introdução de compostos de sais de ferros, como cloreto férrico ou cloreto ferroso, no biodigestor. O enxofre sofre ligações químicas no interior do biodigestor, formando precipitados de sulfeto e assim inibindo a produção de sulfetos de hidrogênio. Este método são mais indicados a biodigestores de pequeno porte ou de baixa carga de enxofre.

A tabela 3.6 mostra um comparativo entre os métodos propostos, relatando as vantagens e desvantagens ao tratar dos insumos energéticos, químicos e de introdução de oxigênio. Cada um dos métodos apresenta um potencial redutor próprio, e a escolha do processo de limpeza correto deve levar em conta fatores como fluxo de gás produzido, quantidade de sulfetos presentes, presença de água e facilidades operacionais desejadas.

Processo	Consumo energético		Insumos Indiretos		Injeção de ar	Pureza em ppmv	Problemas
	Elétrico	Térmico	Consumo	Eliminação			
Biodessulfurização no digestor	++	o	++	++	Sim	50-2.000	Falta de exatidão no controle do processo
Biodessulfurização externa	-	o	+	+	Sim	50-100	Falta de exatidão no controle do processo
Lavador biológico de gás	-	o	-	+	Não	50-100	Complexidade elevada
Precipitação de sulfeto	o	o	--	o	Não	50-100	Processo lento
Dessulfurização química interna	o	o	--	--	Sim	1-100	Efeito purificador reduzido drasticamente
Carvão ativado	o	o	--	-	Sim	< 5	Grandes quantidades eliminadas

Tabela 3.6 Processos de Dessulfurização.

Fonte: Ministério da Nutrição, Agricultura e Defesa do Consumidor da Alemanha (2010).

3.4.4 Lavagem com Genosorb.

Este método de lavagem do biogás é capaz de remover o dióxido de carbono, o sulfeto de hidrogênio e a água. A lavagem Genosorb é o único método capaz de remover os três componentes de uma só vez.

O processo é semelhante ao método de lavagem com água sob pressão, só que no lugar da água é utilizado uma solução de lavagem, o Genosorb, à pressão de 7 bar. Porém, por razões econômicas, o biogás deve ser pre secado e dessulrizado segundo o Ministério da Nutrição, Agricultura e Defesa do Consumidor da Alemanha (2010). A solução de lavagem é regenerada por despressurização gradual a 50 °C, seguida do jateamento com ar ambiente.

É um processo novo, e o fabricante aponta que o escape de metano é de 1 a 2 %. Este processo demanda altas quantidades de energia. A figura 3.2 é um exemplo de estação de lavagem de biogás com Genosorb na Alemanha.



Figura 3.2 Conjunto de tratamento de Biogás com Genosorb.

Fonte: Ministério da Nutrição, Agricultura e Defesa do Consumidor da Alemanha (2010).

4 – Reatores Anaeróbicos e biodigestores.

Os reatores e biodigestores anaeróbicos são recipientes, tanques, destinados à digestão anaeróbica. São fundamentalmente câmaras que proporcionam ao resíduo orgânico as condições desejáveis para uma digestão orgânica rápida e controlada.

A digestão da matéria orgânica e a produção do biogás são processos conhecidos há muito tempo, porém foi no século XX que as técnicas que utilizam esses processos foram desenvolvidas e praticadas. Na China da década de 50, durante o auge da Guerra Fria, o governo chinês adotou como estratégia a descentralização da produção de energia elétrica de áreas rurais e centros afastados. Nestes anos na China foi desenvolvido um dos biodigestores mais empregados no mundo e no Brasil. Estes biodigestores utilizam resíduos da atividade rural como fonte de matéria-prima e produzia o biogás em pequenas quantidades para atender a demandas locais e isoladas. Na China, um país que hoje possui mais de um bilhão de habitantes, a atividade rural é bem intensa e gera muito resíduo.

Na Índia outro modelo de biodigestor muito usual também fora desenvolvido. Em um país de grande miséria e insuficiente em produção de petróleo, o uso do biodigestor para a produção de metano foi amplamente praticada para abastecimento energético da população marginal e reduzir a demanda pelo petróleo. O modelo Indiano de biodigestor é alimentado com resíduo da atividade rural e produz o biogás e fertilizante que são reaproveitados nas atividades rurais.

Segundo Gaspar (2003), a utilização do biogás como fonte energética motivou a China a adotar a tecnologia a partir de 1958, onde, até 1972, já haviam sido instalados 7,2 milhões de biodigestores na região do Rio Amarelo. Tal localização não é acidental, pois as condições climáticas da região a tornam propícias para a produção de biogás.

A crise internacional do petróleo, crise energética de 1973, levou ao mundo o uso de biodigestores como alternativa ao consumo do petróleo. Países ricos e pobres adotaram esta prática, embora nenhum outro país tenha este método tão difundido como na China e na Índia.

Na Europa dos anos 80, a digestão anaeróbica foi aplicada para o tratamento de efluentes urbanos e industriais. A expansão da tecnologia pelo mundo, a tornou viável para o tratamento de efluentes. Em 1970, Lettinga e seu grupo de pesquisa estudaram o tratamento anaeróbico para despejos concentrados industriais e esgoto sanitário na Universidade de Wageningen na Holanda. Os resultados destes estudos deram início ao uso de reatores anaeróbicos, destacando o reator anaeróbico de manta de lodo e fluxo ascendente, ou RALF.

4.1 Características e diferenciação das técnicas.

Há um grande campo de técnicas para o processamento anaeróbico e produção de biogás disponíveis no mercado. O conjunto de técnicas determinará o tipo de reator ou biodigestor utilizado para o processo de digestão, a tabela 4.1 apresenta estas técnicas.

Critério	Tipo
Teor de matéria seca dos substratos	digestão úmida digestão seca
Tipo de alimentação	descontínua semicontínua contínua
Nº de fases do processo	uma fase duas fases
Temperatura do processo	psicrofílico mesofílico termofílico

Tabela 4.1 Classificação das técnicas de geração de biogás conforme critérios.

Fonte: Ministério da Nutrição, Agricultura e Defesa do Consumidor da Alemanha (2010).

O resíduo utilizado e as facilidades operacionais caracterizam a demanda pelas diferentes técnicas propostas.

- Teor de matéria seca:

A consistência do substrato a ser digerido é variável de acordo com o teor de matéria seca presente. Substratos com pouca matéria seca são considerados substratos úmidos e podem ser bombeados para os biodigestores. A fermentação a seco faz uso de substratos empilháveis.

O limite do teor de matéria seca que determina a técnica é de difícil compreensão, uma vez que há uma faixa onde existem substratos com matéria seca que podem ser classificadas como fermentação úmida e a seco. Os resíduos como cascas de frutas e legumes apresentam um teor de matéria seca de 12% e são classificados como fermentação a seco, porém há resíduos em que o teor chega a 20% e são classificadas como fermentação úmida.

A maioria dos processos de digestão é de fermentação úmida, embora com a busca por novas alternativas como fontes energéticas, o número de fermentação a seco vem aumentando.

- Tipos de alimentação:

A forma de alimentação do biodigestor é fator determinante na continuidade da produção e biogás e da geração de energia elétrica.

Basicamente há três formas de alimentação do biodigestor: a contínua, a semicontínua e a descontínua ou batelada.

A alimentação contínua é a forma mais usual de alimentação praticada, nesta técnica o resíduo é introduzido continuamente, ou várias vezes ao dia de trabalho, ao biodigestor. Esta prática consiste de um tanque de armazenamento de onde é retirado o substrato de alimentação do biodigestor e de um tanque posterior de armazenamento do biofertilizante.

No processo contínuo, toda a carga que alimenta o biodigestor é, posterior à digestão, repassada ao tanque de biofertilizante. O tanque do biodigestor somente é esvaziado por motivos de manutenção, em todo o processo o tanque deve ficar cheio. Devido a estas características a produção do biogás é uniforme, variando somente conforme as características do resíduo introduzido.

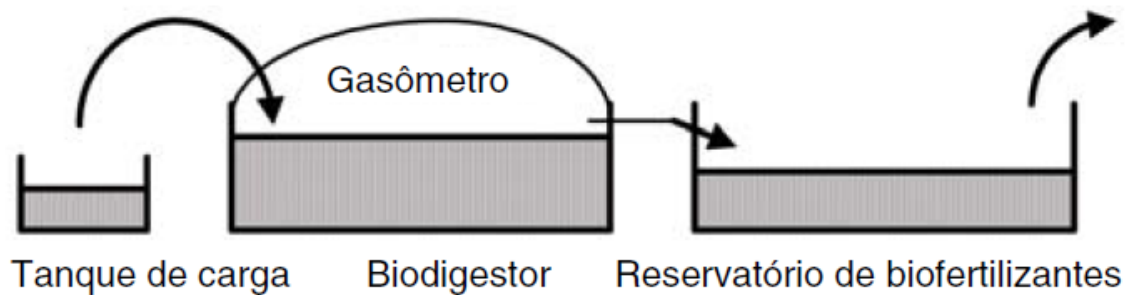


Figura 4.1 Biodigestor com reservatório de biofertilizantes aberto.

Fonte: Ministério da Nutrição, Agricultura e Defesa do Consumidor da Alemanha (2010).

O método da figura 4.1 apresenta o reservatório de biofertilizantes aberto, nesta situação há produção de metano no reservatório, e o metano produzido é liberado. Esta técnica aumenta os custos de investimento, que podem ser retornados com o máximo aproveitamento do biogás. A figura 4.2 mostra este processo.

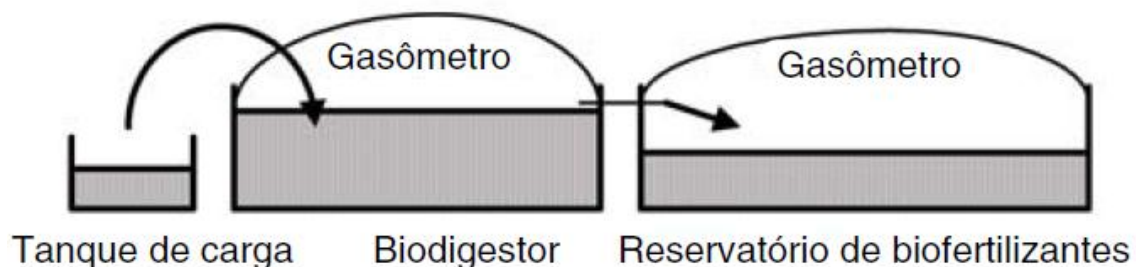


Figura 4.2 Biodigestor com reservatório de biofertilizantes fechado.

Fonte: Ministério da Nutrição, Agricultura e Defesa do Consumidor da Alemanha (2010).

Nos processos de alimentação contínua é possível acontecer um fenômeno chamado de curto circuito, onde a matéria introduzida pode ser evacuada do biodigestor sem ficar retida no tempo de retenção desejada.

Diferindo da alimentação contínua, a semicontínua é pouco usual. Nela as cargas de resíduo são alimentados no mínimo uma vez por dia de trabalho. Não há a interrupção do processo de fermentação no biodigestor, as cargas de matéria são introduzidas com baixa frequência ao biodigestor e não de maneira contínua. Esta prática elimina os efeitos de curto circuito no biodigestor, porém requer maiores investimentos no tanque de carga para armazenar maiores quantias de carga.

Por fim, na alimentação por batelada ou descontínua uma carga de resíduo é introduzida no biodigestor, que é hermeticamente isolado. Esta carga permanece confinada até que o tempo de retenção termine e que a DQO atinja níveis muito baixos. Após o tempo de retenção acabar praticamente toda a carga orgânica é retirada do biodigestor. É prática deixar um pouco de substrato para inocular a próxima batelada, e uma nova carga é introduzida.

Esta técnica é caracterizada pela produção irregular e descontínua do biogás, atingindo níveis de baixo e alto fluxos de gás produzidos. No início, após a introdução do resíduo, a produção de biogás é baixa, após alguns dias a fermentação atinge seu auge e a produção de biogás é máxima. Após o pico, a produção reduz gradualmente até cessar.

A fim de garantir qualidade no fornecimento de biogás, é possível utilizar biodigestores em paralelo com tempo de introdução diferentes. Esta técnica exige altos investimentos em tanques de armazenagem de carga.

- Número de fases do processo:

Há biodigestores que realizam a fermentação da matéria em uma ou duas fases.

Nos biodigestores de uma fase, todas as etapas de fermentação descritas no capítulo 4 ocorrem em um único tanque. Quando as etapas de hidrólise e metanogênese são realizadas em tanques diferentes, o processo é bifásico, duas fases.

4.2 Tipos de biodigestores e reatores

Dentre os biodigestores e reatores apresentados a seguir estão os mais usuais utilizados para a função de produção de biogás e tratamento de resíduos industriais.

4.2.1 Reator anaeróbico de manta de lodo e fluxo ascendente.

Conhecido por RALF, e consagrado mundialmente por sua nomenclatura original em inglês UASB (*upflow anaerobic sludge blanket*), nome dado por seu desenvolvedor Lettinga na Holanda. Estes reatores são de fermentação úmida, alimentados continuamente e são monofásicos.

O reator UASB é um importante avanço na tecnologia de biodigestores anaeróbicos, e é amplamente utilizado no tratamento de efluentes urbanos, esgotos sanitários, e industriais. Como todo equipamento, ele possui vantagens e desvantagens, no entanto a prática mostra que os resultados obtidos com o UASB são consideravelmente superiores em relação a demais reatores. O fato de este reator poder reter grandes cargas orgânicas volumétricas com tempo de retenção curto, em algumas horas, o torna superior aos demais quando se compara tamanho e eficiência de remoção da Demanda Química de Oxigênio. Outro ponto importante deste reator é a mistura do substrato que ocorre dentro de seu tanque de reação.

Dentre as vantagens associadas aos reatores UASB por Chernicharo (1997) estão:

- Sistema compacto, com baixa demanda de área.

- Baixo custo de implementação e operação.
- Baixa produção de lodo.
- Baixo consumo de energia (apenas para o sistema de bombeio de afluentes, quando for necessário).
- Satisfatória eficiência de remoção de DBO e de DQO, da ordem de 65% a 75%.
- Possibilidade de rápido reinício, mesmo após longas interrupções.
- Elevada concentração do lodo excedente.
- Boa desidratabilidade do lodo.

E as desvantagens:

- Possibilidades de emissão de odores.
- Baixa capacidade do sistema em tolerar cargas tóxicas.
- Elevado intervalo de tempo necessário para a partida do sistema.
- Necessidade de uma etapa de pós-tratamento.

O período de partida do sistema é elevado, sem a utilização de inóculos pode chegar a 4 ou 6 meses. Em situações relatadas por Chernicharo & Borges (1996 apud Chernicharo, 1997, p. 156), onde a carga de inóculos foi inferior a 4% do volume do reator, o tempo de partida foi reduzido para 3 semanas.

A necessidade de pós-tratamento é decorrente do tratamento de efluentes sanitários e alguns industriais, a qualidade do efluente produzido pelo reator não se enquadra nos padrões exigidos pela legislação ambiental. O reuso do efluente como biofertilizante, desde que livre de componentes tóxicos, não necessita de pós-tratamento.

Os projetos e montagem destes reatores são simples, não demandam de nenhum equipamento sofisticado. Porém, os parâmetros para a construção do mesmo devem ser bem claros, para o correto projeto das câmaras de reação, decantação e captura do gás.

Os reatores industriais são normalmente alimentados por distribuidores normalmente localizados nas bases dos reatores, nesta região da base do reator há a uma camada chamada de leito de lodo. No leito de lodo é onde se encontra a maior concentração de carga orgânica no reator. Acima do leito de lodo encontra-se a manta de lodo, com concentração de cargas orgânicas baixa. O sistema é automisturado devido ao fluxo ascendente do substrato e da ascensão das bolhas de biogás.

Por ser automisturado, o sistema não necessita de um misturador, o que implica em menores custos com investimento e manutenção, e menor tempo de parada para manutenção.

A remoção da carga orgânica ocorre em todo o reator, porém é no leito onde há uma remoção mais efetiva e pronunciada.

A figura 4.3 demonstra todas as fases do reator UASB. O leito de lodo onde é acumulada a carga orgânica, a manta de lodo fase intermediária do processo e o separador

trifásico que finaliza a transformação e captação do biogás. A figura 5.3 mostra a dinâmica interna do reator UASB, indicando os fluxos e fases distintas que envolvem o processo.

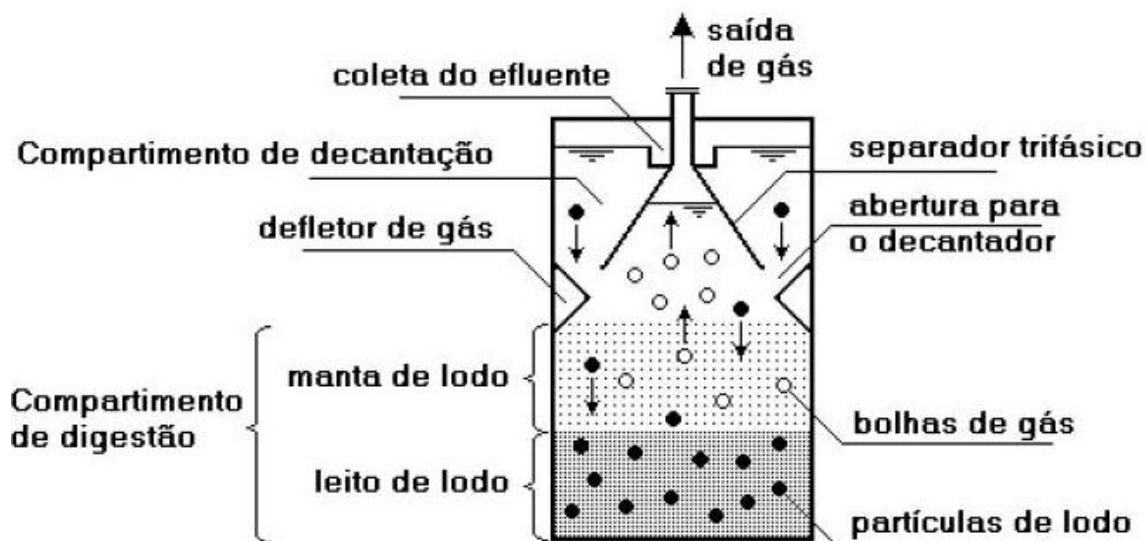


Figura 4.3 Corte lateral de um Reator UASB. Características de funcionamento.

O fluxo ascendente e as bolhas de biogás carregam sedimentos do lodo ao topo do reator, onde é necessária a instalação de um separador trifásico (gases, líquidos e sólidos). Este separador garante que o lodo carregado pelo fluxo ascendente retorne ao manto e leito do lodo. Acima do separador trifásico estão a câmara de captura do biogás e o canal de saída do efluente.

O separador trifásico é o que traz ao UASB um tempo de retenção do lodo elevado, muito superior ao tempo de retenção hidráulico. O tempo de retenção do lodo nestes sistemas são da ordem de dias, chegando a 30 dias, isso se traduz com uma alta capacidade de produção de biogás e proporciona ao lodo excedente, descartado do sistema, alto grau de estabilização.

4.2.2 Biodigestor de mistura completa.

Forma convencional de reatores anaeróbicos, esta técnica consiste de um tanque vertical com fundo de concreto e paredes de aço ou concreto armado. A posição do reservatório pode ser total, parcial ou não enterrado.

Nestes biodigestores o fluxo de entrada é constante, assim como o de saída. A reação ocorre totalmente dentro do reservatório, biodigestor monofásico, e é utilizado para fermentações úmidas.

Este reator demanda de uma fonte de agitação contínua, ou intermitente em alguns casos, que podem ser feitos por meios mecânicos ou pneumáticos. Estes agitadores possuem como objetivo a mistura completa do substrato e dos micro-organismos internos, conferindo uma concentração equilibrada em todo o volume do reator.

A figura 5.4 mostra um reator convencional de mistura completa com agitação mecânica. As características dos sistemas de mistura são diversas e variam conforme demanda do projeto.

Neste tipo de biodigestor o tempo de retenção hidráulica é igual ao tempo de retenção celular, o tempo de retenção da carga orgânica. Esta característica do biodigestor o torna lento, possuindo tempo de retenção hidráulica de 20 a 30 dias. A eficiência de remoção da DQO é considera alta, alcançando níveis de 80 a 95%, dependendo do TRH.

Esta técnica é utilizada para o processo de resíduos com alta carga orgânica, e normalmente apresentam grande volume para poder reter o substrato por longos períodos de tempo. Para o processamento de grandes volumes de resíduos, este biodigestor é inviável devido ao tamanho que ele deverá possuir.

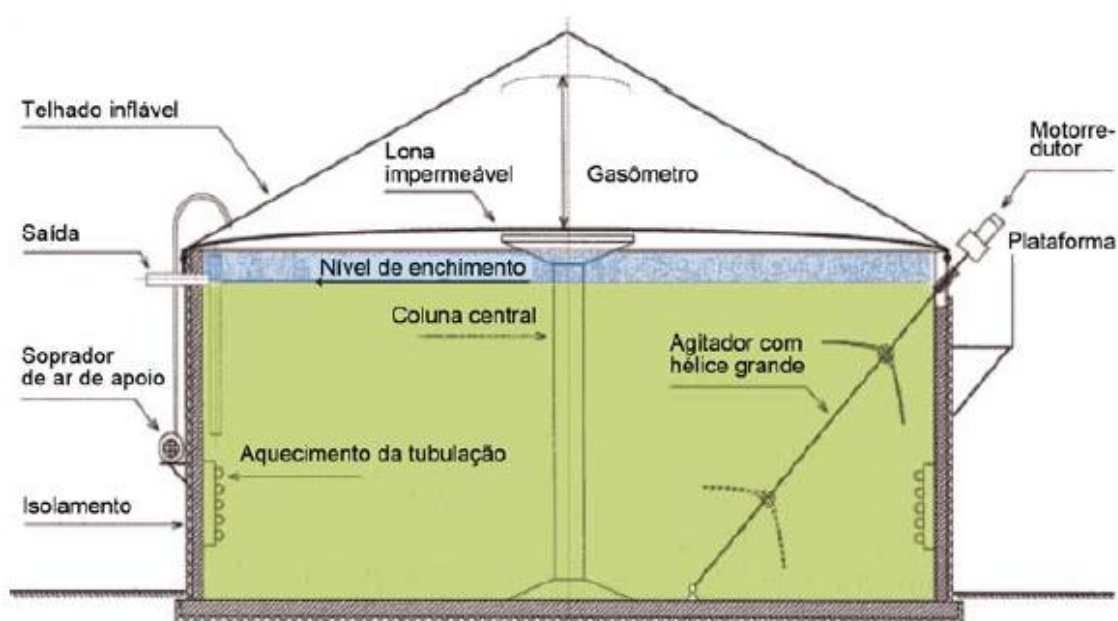


Figura 4.4 Corte lateral de um Reator de Mistura Completa com agitação por hélice.
Fonte: Ministério da Nutrição, Agricultura e Defesa do Consumidor da Alemanha (2010).

4.2.3 Biodigestor de fluxo pistonado.

Os reatores de fluxo pistonados são normalmente horizontais, e podem ser utilizados tanto nas fermentações úmidas quanto nas fermentações secas. Eles são operados de maneira contínua e são monofásicos.

O resíduo introduzido em uma das extremidades do reator funciona como pistão empurrando o restante do substrato ao lado oposto no sentido da saída do reator. A agitação do substrato é feita por palhetas dispostas ao longo do reator.

Em sistemas de fluxo pistonado, a taxa de remoção do substrato é constante, mas a concentração do material biodegradável diminui conforme o fluxo percorre o reator. (ARCEIVALA, 1981, apud MONTEIRO, 2009, p. 29)

Esta técnica reduz efeitos de curto circuito da carga, aumentando a qualidade do gás produzido, porém não é muito praticada para grandes volumes de resíduo.

4.2.4 Biodigestor modelo Indiano.

O modelo desenvolvido na Índia é um dos mais utilizados mundialmente para receber resíduos rurais. É utilizado para sistemas contínuos, monofásicos e fermentação úmida. A concentração de sólidos voláteis não pode ser maior que 8%, fator limitante do biodigestor para o tratamento de resíduos industriais.

É um biodigestor simples de construir e operar, não consome muita energia e demanda pouca mão-de-obra. Ele é ideal para ambientes rurais, devido a estas qualidades citadas.

Construído abaixo do nível do solo, praticamente todo enterrado, o biodigestor Indiano possui uma câmara de reação subdividida por uma parede central. A divisão da câmara em duas partes promove a circulação do substrato no interior do biodigestor, diminuindo efeitos de curtos circuitos e melhorando a agitação do substrato. Acima da câmara fica uma campânula que age como gasômetro.

A câmara de reação pode ser construída com concreto armado, alvenaria e aço-carbono e a campânula pode ser feita de metal ou fibra de vidro. Sempre ao utilizar metais, como o aço-carbono deve se atentar a corrosividade dos elementos contidos no processo.

A produção do biogás é contínua e a pressão constante, a campânula móvel garante pressão constante ao expandir o volume. A figura 4.5 demonstra o modelo.

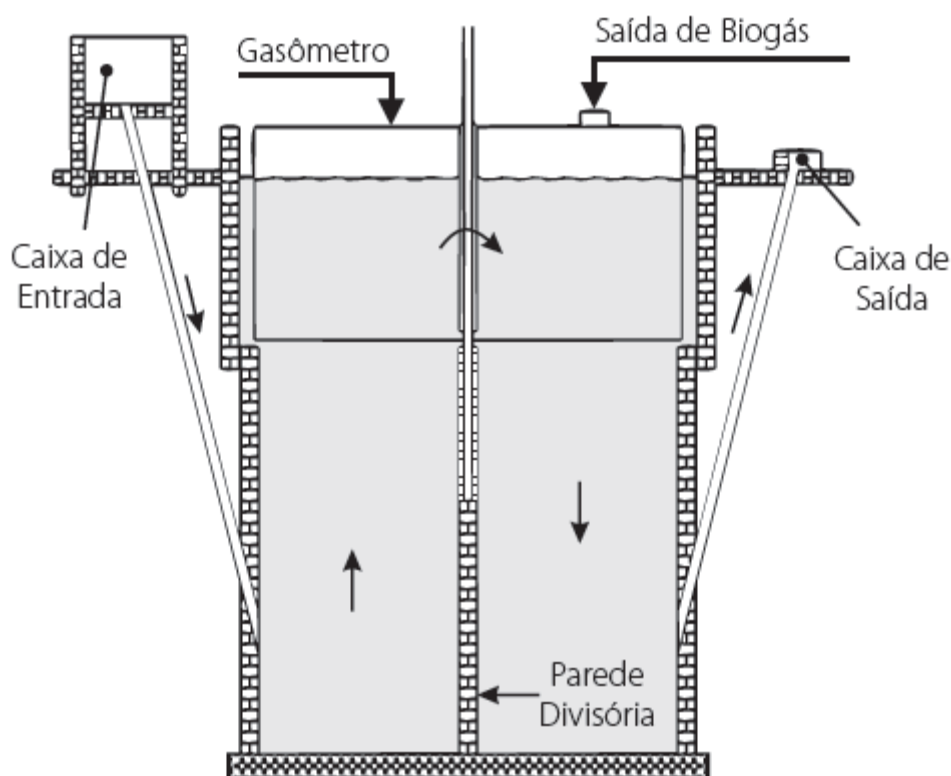


Figura 4.5 Corte lateral de um Biodigestor modelo Indiano

Fonte: Benincasa (1990, apud, Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, 2006, p. 153)

Onde,

H é a altura do nível de substrato.

Di é o diâmetro interno do biodigestor.

Dg é o diâmetro do gasômetro.

Ds é o diâmetro interno da parede superior.

h1 é a altura ociosa (reservatório de biogás).

h2 é a altura útil do gasômetro.

a é a altura da caixa de entrada.

e é a altura da entrada do cano com o efluente.

Nesse tipo de biodigestor o processo de fermentação acontece mais rápido, pois aproveita a temperatura do solo que é pouco variável, favorecendo a ação das bactérias. Ocupa ainda pouco espaço e a construção, por ser subterrânea, dispensa o uso de reforços, tais como cintas de concreto.

4.2.5 Biodigestor modelo Chinês.

É um biodigestor de alimentação e produção de biogás contínua. O modelo Chinês apresenta uma limitação igual a do modelo Indiano, é recomendado seu uso para resíduos com sólidos totais, limite de 8%, e para pouco volume a ser processado.

É formado por uma única câmara cilíndrica, sem subdivisões, onde o substrato é acumulado e fermentado. O teto é em forma de abóboda e é responsável por acumular o biogás produzido. Seu funcionamento é de uma prensa hidráulica, onde o aumento da pressão interna causada pela produção de biogás leva à movimentação do substrato dentro do biodigestor. A movimentação ocorre em dois sentidos: quando há um aumento na pressão o substrato é movimentado para a caixa de saída, já quando há uma queda na pressão interna o substrato é movimentado no sentido da câmara de fermentação.

Pode ser construído com alvenaria ou concreto armado, de forma totalmente enterrada. O teto em forma de abóboda é fixo, não possui partes móveis e não varia de volume conforme a produção do biogás. Na construção deste modelo deve se atentar para a vedação das paredes e do teto para minimizar o escape do biogás formado.

O biogás formado na caixa de saída do biodigestor é lançado na atmosfera sem tratamento ou reaproveitamento, reduzindo o potencial de aproveitamento do biogás produzido. A figura 5.6 demonstra a forma de construção do biodigestor, modelo simples de operar que apresenta baixíssimos custos de operação e manutenção, porém limitado a pequenos volumes de resíduos a serem processados.

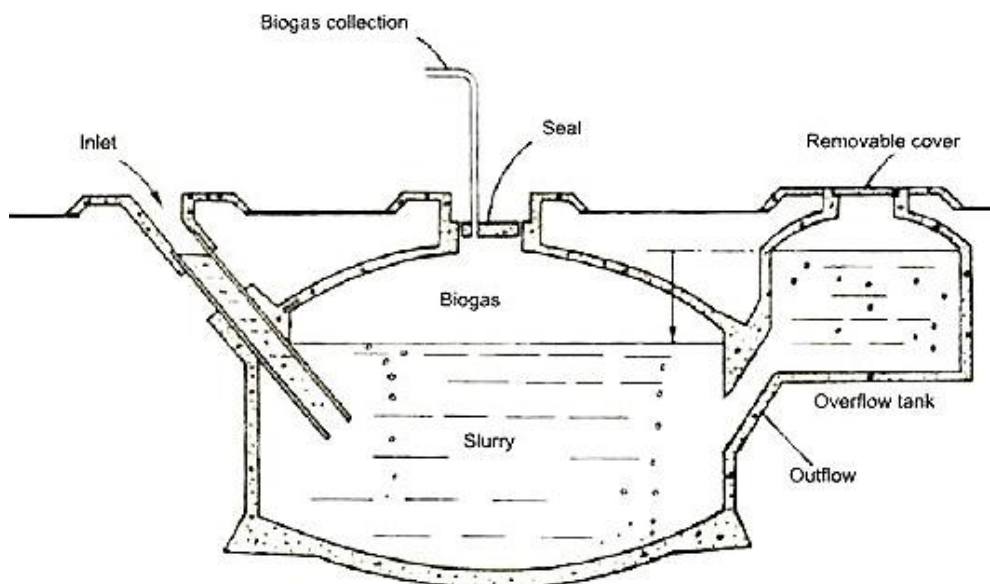


Figura 4.6 Corte lateral de um Biodigestor modelo Chinês.
Fonte: Oliveira (2009).

4.2.6 Biodigestor a batelada.

Único biodigestor apresentado neste trabalho com operação descontínua, os biodigestores que operam a batelada são alimentados uma única vez até que o resíduo complete o todo o tempo de retenção hidráulica planejado. Após este período de tempo, o substrato interno do biodigestor é removido a fim de se introduzir a próxima carga, é normal que se deixe uma pequena quantia de substrato para inocular a próxima carga do biodigestor.

Estes biodigestores podem assumir diversas formas e construções, podem trabalhar de maneira isolada ou em conjunto com outros biodigestores a batelada. Uma das formas mais utilizadas hoje é o biodigestor tubular, biodigestor canadense ou *plug-flow*, que são construções longas com uma base interna em forma trapezoidal que se estende horizontalmente. A câmara de gás é formada por uma lona que assume a forma cilíndrica com a pressão do biogás.

Outra forma muito usual é a construção de um tanque enterrado com uma peça móvel superior formando o gasômetro.

Estas estruturas possuem apenas uma saída para o biogás produzido e podem ser construídas de alvenaria, concreto armado ou plásticos de alta densidade (biodigestores tubulares). Devem ser totalmente herméticos e impermeáveis.

São ideais para aplicações onde não há uma geração constante de resíduos e onde o volume a ser tratado não é muito grande. O tempo de retenção hidráulica é elevadíssimo, porém durante todo este tempo há produção de biogás variante conforme a idade de retenção hidráulica.

5 – Conversões energéticas do biogás.

O estudo da conversão energética do biogás envolve uma pequena gama de tecnologias disponíveis para a conversão em diversos níveis. Primeiro converte-se a energia química do biogás, através da queima do metano, em energia térmica. Esta energia térmica pode ser utilizada diretamente com a cogeração ou então se convertida em energia cinética e energia elétrica.

A empresa Finlandesa Vaskiluodon Voima inaugurou em 2013 a maior usina a biogás do mundo, a usina fica na cidade de Vaasa e possui capacidade instalada de 140 MW de potência. A usina esta localizada adjacente a outra usina da empresa Vaskiluodon Voima, uma usina a carvão de 565 MW de potência. A usina a biogás opera com o biogás resultante da gaseificação de restos de madeira, e converte o biogás em energia a partir de caldeiras de carvão modificadas para trabalhar com o gás. A caldeira produz vapor utilizado em turbinas a vapor para gerar energia elétrica.

Na França a empresa Veolia Preprete possui uma planta de ciclo combinado a biogás que possuem 11 MW instalado para geração de energia com turbinas a gás e 6 MW instalados para a geração com turbinas a vapor, o sistema é alimentado com o biogás do tratamento de esgoto em uma região próxima a Paris. No Brasil os casos de sucesso com geração em grandes escala de energia a partir do biogás utilizam motores a combustão interna de ciclo Otto, como Coelho (2012) relata sobre as usinas a biogás que operam com o biogás produzido pelos aterros de Bandeirantes e São João em São Paulo. Cada usina conta com uma capacidade instalada de 20MW e 22 MW, respectivamente.

A conversão do biogás em energia elétrica é, além de uma fonte não usual de energia renovável e limpa, uma fonte estratégica de geração distribuída.

Segundo o Instituto Nacional de Eficiência Energética (2014), Geração Distribuída (GD) é uma expressão usada para designar a geração de energia elétrica realizada junto ou próximo do(s) consumidor(es), independente da potência, tecnologia e fonte de energia.

As vantagens esperadas ao se utilizar o biogás como fonte de energia, independente do efluente utilizado, são perceptíveis a níveis econômicos, estratégicos e ambientais:

- Econômicos: O biogás é uma fonte energética oriunda do tratamento de resíduos e efluentes normalmente ocasionadores de custos com tratamento e eliminação. O correto manejo pode além de realizar um tratamento adequado ao efluente como também produzir o biogás. É esperado ganho econômico com a receita da produção de energia elétrica e com o custeio do sistema de tratamento do efluente.
- Estratégico: Produzido próximo aos centros consumidores, centros produtores de resíduos, o uso energético do biogás não demanda investimentos em linhas de distribuição de energia elétrica. Há poucas perdas energéticas com a distribuição.

- Ambientais: O tratamento e as atuais práticas de uso dos resíduos passíveis de gerar o biogás já produzem gases prejudiciais à natureza. Ao serem utilizados como fonte energética ocorre a mesma dispersão de gases prejudiciais, porém com o ganho energético. Em alguns casos, como no uso do biogás produzido em aterro e em sistemas de tratamento de esgoto, a queima e consequente geração de energia elétrica é vantajosa para a natureza no sentido de que o metano queimado é 23 vezes mais poluente que o dióxido de carbono liberado na queima do combustível.

Esta fonte energética ainda não é muito praticada, por diversos fatores como falta de interesse de concessionárias e governo em reduzir o número de barreiras para sua alavancagem. A seguir algumas formas comerciais de se aproveitar energeticamente biogás.

5.1 Principais tecnologias de aproveitamento do biogás.

5.1.1 Motores a combustão interna.

Tecnologia separada em dois grupos, os motores a ciclo Otto e os motores ciclo Diesel. Os motores de ciclo Diesel estão sendo pouco utilizados para os fins de produção de energia elétrica com o uso de gases combustíveis, já os motores ciclo Otto são os mais usuais nas aplicações e nos projetos atuais. Ambos não necessitam de óleo de ignição e divergem no funcionamento apenas nos ciclos de compressões.

- Motores Ciclo Otto:

O engenheiro alemão Nikolaus August Otto, na década XIX, projetou e desenvolveu um motor de 4 tempos eficiente e é considerado o pai dos motores a combustão interna com ignição por centelha. Os modelos de motores baseados no Ciclo Otto são os mais utilizados em automóveis hoje em dia.

Este motor pode trabalhar com combustíveis gasosos (gás natural, propano e biogás) e com combustíveis líquidos (gasolina, álcool, entre outros) junto com a admissão de ar na câmara de combustão. Seu funcionamento ocorre em 4 tempos, estágios, formando um ciclo termodinâmico fechado. A figura 5.1 mostra os 4 tempos envolvidos neste ciclo.

No primeiro tempo a mistura ar/combustível é admitida na câmara de combustão, via sucção realizada pela descompressão causada pela movimentação do pistão pelo cilindro. Após todo o percurso do pistão, o cilindro estará repleto da mistura inflamável, e neste momento a válvula de admissão fechará criando um ambiente hermético. No segundo tempo, o pistão se movimenta de forma a comprimir a mistura interna do cilindro. Ao atingir o final do percurso, o pistão terá comprimido a mistura combustível em uma razão de compressão " r_v ". A terceira etapa é iniciada tão logo a compressão seja máxima e a vela de ignição gere a centelha. Este momento de transição do segundo para o terceiro tempo é crítico, e a centelha não pode ser gerada antes da compressão máxima ser atingida e não pode demorar muito a acontecer.

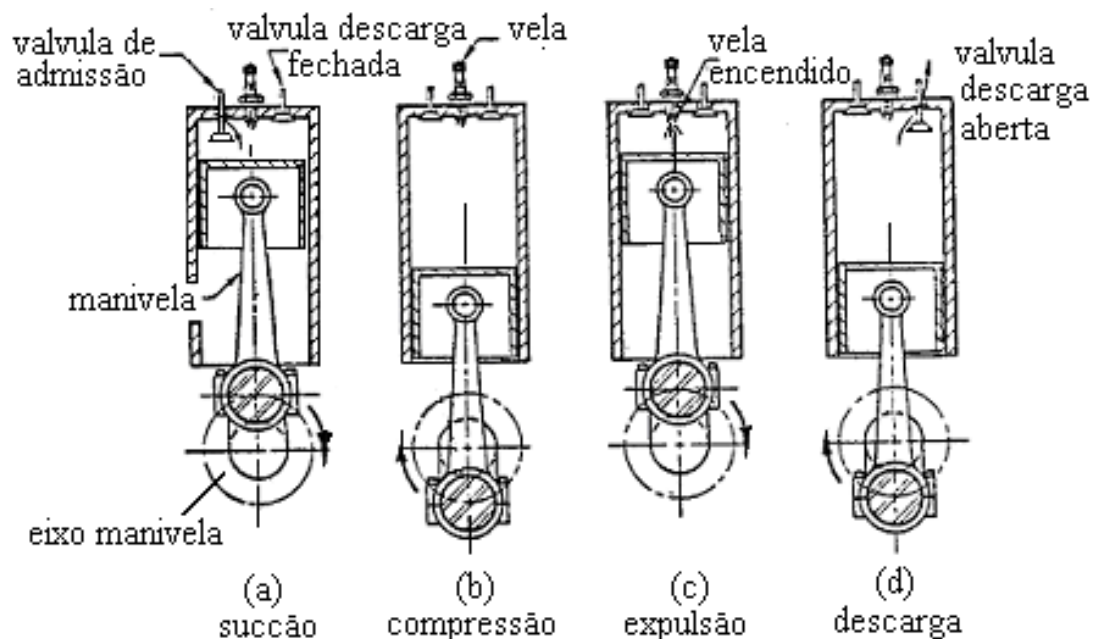


Figura 5.1 Ciclos térmicos de um motor de combustão interna de 4 tempos.

Como resultante da fonte de calor, a mistura inflamável sofre combustão liberando energia transmitida ao pistão e suas partes integrantes. O último tempo é a descarga dos gases internos do cilindro para liberação do mesmo para os próximos ciclos.

Os ciclos de Otto são aquecimento isométrico (1-2), expansão isentrópica (2-3), resfriamento isométrico (3-4) e compressão isentrópica (4-1). A figura 5.2 mostra os ciclos em um diagrama p.v e a figura 5.3 mostra o rendimento térmico segundo " r_v ".

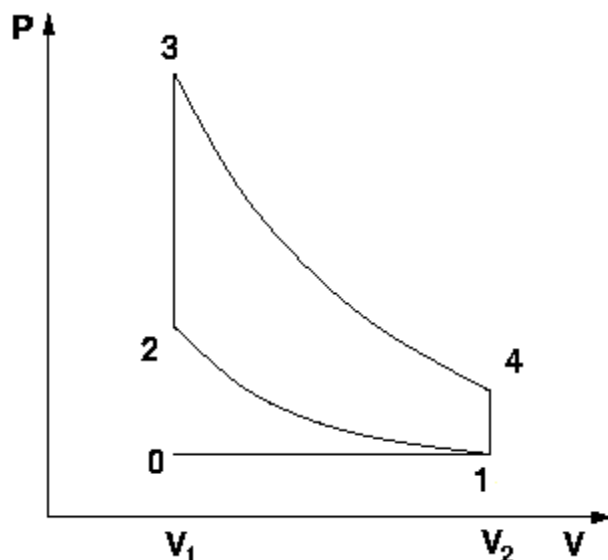


Figura 5.2 Diagrama p.v do ciclo térmico de Otto.

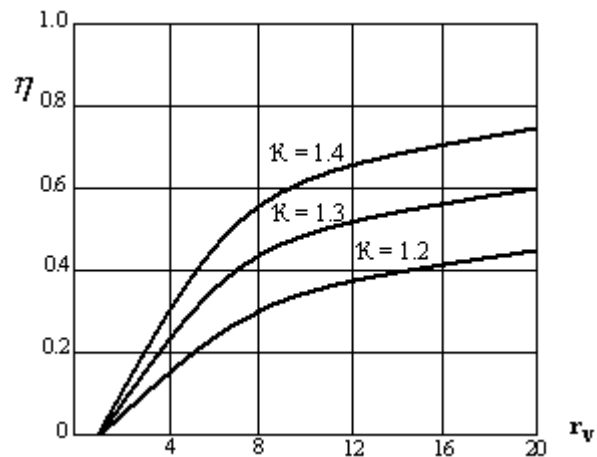


Figura 5.3 Curva do rendimento pela taxa de compressão. Do ciclo Otto.

- Motores de Ciclo Diesel:

Difere dos motores de Ciclo Otto no ciclo 1-2, nos motores diesel este ciclo é de aquecimento isobárico e não isométrico. Outra diferença significativa entre as tecnologias é em relação à fonte de ignição, em motores a diesel não é utilizada a ignição por centelha, mas ignição espontânea que ocorre devido ao aquecimento da mistura inflamável.

A relação de compressão “ r_v ” deve ser suficientemente alta para garantir a auto ignição no cilindro do motor, uma vez que o aquecimento do gás acontece devido à compressão do mesmo em um determinado ponto. A figura 5.4 mostra o rendimento do motor Ciclo Diesel.

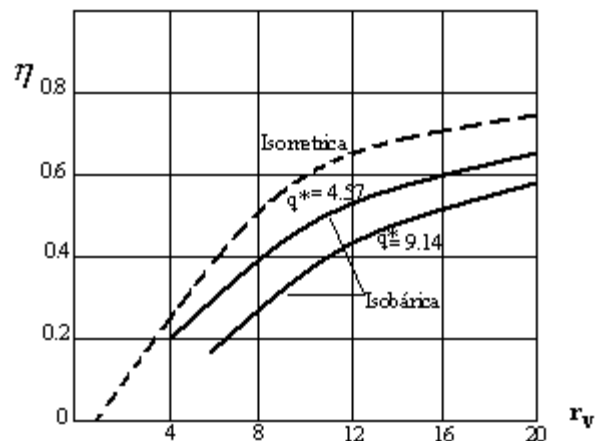


Figura 5.4 Curva do rendimento pela taxa de compressão do ciclo Diesel.

Os motores Ciclo Diesel foram desenvolvidos por Rudolf Diesel, no século XIX. Estes motores apresentam maior potência e custos com operação menor (custo do combustível) que os Ciclo Otto. Os motores Ciclo Diesel são normalmente utilizados para cargas que requerem grande força e apresentam vida útil longa.

- Geradores:

São utilizados geradores acoplados aos motores de combustão interna para a conversão eletromecânica de energia. Normalmente é utilizado um gerador síncrono, mas em aplicações inferiores a 100 kW pode se encontrar geradores assíncronos.

Estes motores de combustão interna são as tecnologias mais utilizadas para aplicações de geração distribuída para geração de baixo e médio porte. Existem grupos de moto-geradores com potência variando entre 1 kVA a 20 MVA. Os combustíveis aceitos por estes motores são muito variáveis, o que flexibiliza a operação do mesmo.

Comparando os motores Otto com os diesel, podem ser indicadas as características que levam a determinação do motor correto, conforme mostra a tabela 5.1.

	Otto	Diesel
Potência elétrica	> 1 MVA	< 340 kVA
Eficiência elétrica	34% - 42%	30% - 44%
Vida útil	60.000 horas	35.000 horas

Tabela 5.1 Comparação entre grupos geradores a ciclos Otto e Diesel.

Os motores Ciclo Otto possuem modelos fabricados para aplicações específicas com gases, entre eles o biogás; exigem pouca manutenção e apresentam eficiência de 42%. Porém, por serem fabricados em baixa escala, eles possuem um custo de aquisição superior aos de ciclo Diesel. Este motor é a melhor opção para aplicações com potências superiores a 1 MVA.

Já os motores a Ciclo Diesel, apresentam maior eficiência em potências baixas, por isso limitada a aplicações de até 300 a 400 kVA. Não há versões específicas para o biogás, o que implica em uso de motores Diesel comuns adaptados à aplicação do biogás. Estes motores são de baixo custo de aquisição e fáceis de encontrar no mercado.

Apresenta como grande desvantagem a necessidade do uso de óleo complementar para a ignição do sistema, além de possuir vida útil inferior ao Ciclo Otto.

5.1.2 Motores Stirling.

O motor Stirling é um motor de combustão externa, cujo nome possui origem no pastor Robert Stirling que o aperfeiçoou, foi desenvolvido como sucessor do motor a vapor no século XIX.

Este motor possui dois tempos divididos em quatro fases, compressão isotérmica, aquecimento isocórico, expansão isotérmica e resfriamento isocórico. O motor é composto por duas câmaras onde um gás é mantido hermeticamente.

A combustão externa aquece o gás interno do motor, o que o leva a expandir. Esta expansão do gás movimenta um pistão acoplado a um eixo, produzindo movimento mecânico.

Em razão de possuir fonte externa, este motor aceita qualquer fonte de gás ou líquido combustível.

Dentre as vantagens deste motor estão:

- Baixa poluição, pois opera com combustão contínua (polui menos que os motores de combustão interna).
- Pode ser utilizado por uma grande gama de combustíveis diferentes.
- Baixo nível de ruído.
- Dispensa pré-tratamento do biogás. O biogás pode possuir baixa concentração de metano.
- Baixo custo de manutenção.

E desvantagens:

- Baixa potência (<100 kVA)
- Lenta variação a cargas.
- Não muito presente no mercado.

5.1.3 Turbinas a gás.

Baseadas no Ciclo Brayton, as turbinas a gás são motores de combustão interna que transformam energia química em energia mecânica. As turbinas a gás são compostas por três grupos de elementos: os compressores, o combustor e as turbinas.

O compressor comprime o ar para dentro da câmara de combustão, onde o gás combustível é injetado. Dentro da câmara é formada uma mistura de gases em alta pressão explosiva. A queima deste gás, a pressão constante, eleva a temperatura da câmara e provoca uma reação em cadeia com as novas misturas de combustível e oxigênio injetados. A expansão dos gases liberados pela queima do combustível movimenta as turbinas, devido à diferença de pressão interna a externa. A energia mecânica gerada nas turbinas pode ser transformada em energia elétrica quando há um gerador acoplado a turbina.

A figura 5.5 é um diagrama que representa as etapas da turbina a gás. Na figura está detalhado o fluxo da turbina, da compressão, a combustão na câmara de combustão e a turbina.

Parte da energia captada nas turbinas é reaproveitada nos compressores, o que reduz o potencial final de geração de energia elétrica. Porém, os gases liberado pelas turbinas apresentam alta temperatura e podem ser reaproveitados em cogeração. Quando em cogeração, a eficiência energética das turbinas a gás se torna bastante elevada, atinge eficiência de até 80%.

Os combustíveis aceitos pelas turbinas são geralmente, gás natural, propano, querosene e o biogás. Como não é necessário o uso de nenhum fluido adicional intermediário, como o vapor, estas turbinas apresentam um tamanho relativamente pequeno.

Segundo Costa (2006), por razões de limitações de temperatura suportável pelos materiais utilizados na construção da turbina, a massa de ar injetada na câmara de combustão é muito superior à quantidade requerida para se estabelecer a reação estequiométrica da combustão.

A eficiência da turbina a gás é relacionada à temperatura e pressão dos gases introduzidos na câmara de combustão. A temperatura dos gases de exaustão é outro indicador de eficiência da turbina, quanto mais reduzida for a temperatura dos gases de exaustão, maior será a eficiência.

O gás combustível utilizado deve apresentar baixo teor de cinzas na combustão. As cinzas podem se acumular nas palhetas da turbina, e não devem conter compostos corrosivos que possam danificar a turbina.

Em meios industriais onde a necessidade de energia térmica e elétrica é muito elevada, o uso de turbinas a gás é bastante disseminado. O combustível normalmente utilizado é o gás natural.

As turbinas a gás possuem fácil manutenção e controle e seu rendimento é de aproximadamente 35%.

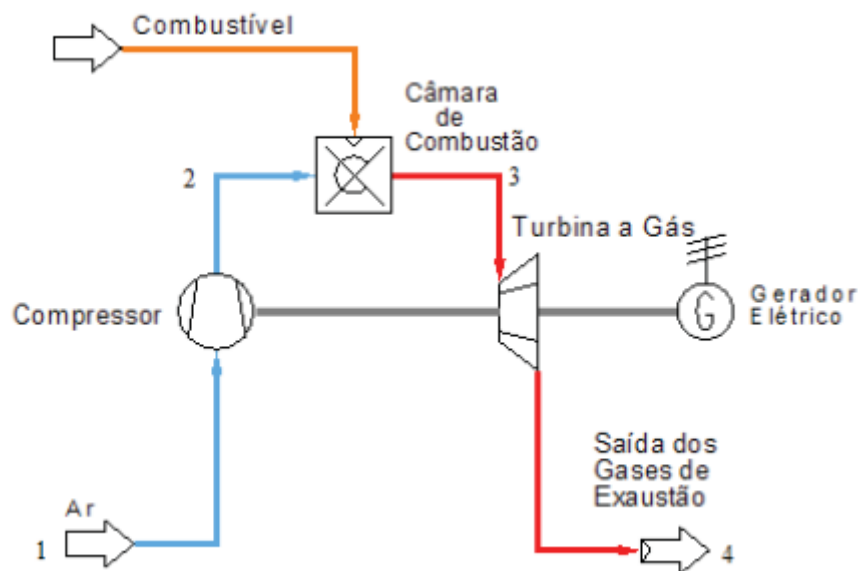


Figura 5.5 Diagrama de processo de uma turbina a gás.
Fonte: França Jr. (2008)

5.1.4 Turbinas a vapor.

As turbinas a vapor são motores de combustão externa, ou seja, a combustão não ocorre diretamente onde a energia mecânica é gerada. Estas máquinas térmicas são baseadas no Ciclo de Rankine, e utilizam a energia liberada pela combustão de um combustível dentro de uma caldeira para aquecer o fluido nas tubulações até que se transforme em vapor. O vapor em alta pressão e temperatura gerado pela caldeira movimenta as palhetas da turbina e desta forma a energia é transformada em energia mecânica. A energia cinética do vapor é dependente da pressão e temperatura de trabalho.

Esta tecnologia é amplamente utilizada em usinas de cogeração, e seus potenciais de geração de energia elétrica variam de unidades e dezenas de kW_e a centenas de MW_e. Por se

trata de um motor de combustão externa, há uma gama de combustíveis líquidos ou gasosos que podem ser utilizados. Diferente da turbina a gás, as turbinas a vapor podem utilizar combustíveis com alto teor de cinzas.

É uma tecnologia simples que pode ser concebida de diferentes maneiras específicas, variando de acordo com aplicação e complexidade desejadas. Paula (2004) aponta dois modelos amplamente difundidos. Segundo Paula (2004), a mais simples e mais aplicada em projetos de cogeração é a do tipo Contra-Pressão, modelo que expande o vapor superaquecido até uma pressão de saída do vapor superior à atmosférica.

O vapor exaurido pela turbina no modelo de Contra-Pressão não passa por resfriamento direto, este vapor pode ser reaproveitado em forma de calor em processos industriais ou então ser liberado direto na atmosfera.

O segundo modelo apontado por Paiva (2004) é a Turbina a Vapor por condensação. Neste modelo o vapor após ser exaurido pela turbina, estará a uma alta temperatura e em baixa pressão. Nesta última fase do ciclo, o vapor com baixa energia cinética é condensado e bombeado para a caldeira para reaproveitamento. Este modelo possui sua maior aplicação em usinas termelétricas convencionais ou nucleares. A figura 5.6 é um diagrama que mostra o fluxo de processo de uma Turbina a Vapor por condensação alimentada por uma caldeira, nesta figura 5.6 é demonstradas as etapas e dos ciclos térmicos desta máquina térmica.

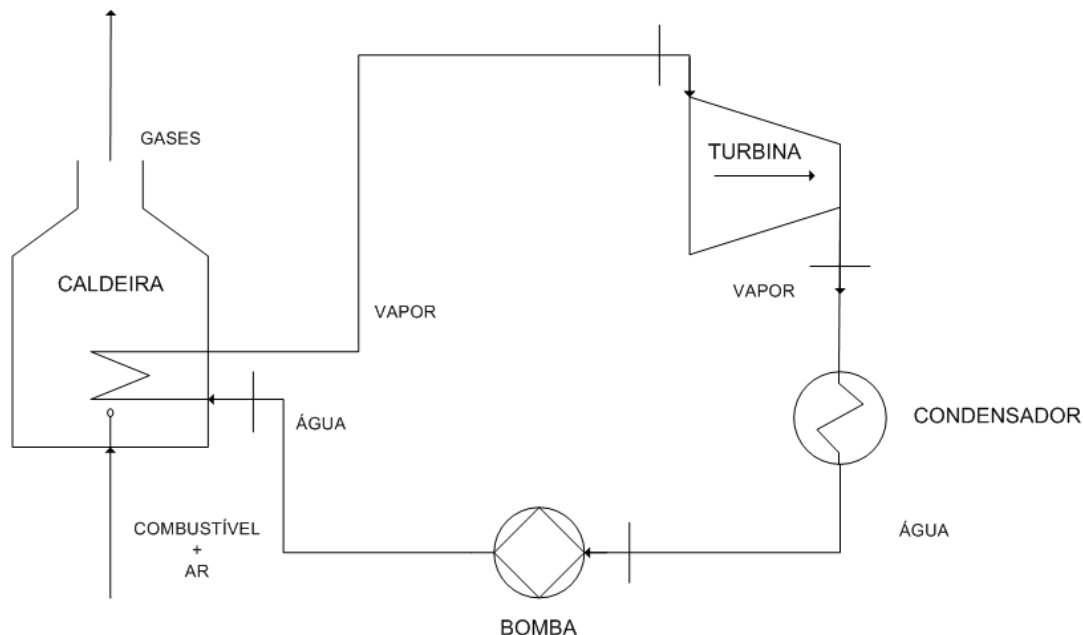


Figura 5.6 Diagrama de processo de uma turbina a vapor.

A eficiência elétrica da Turbina a Vapor é de aproximadamente 35%, quando combinada com a cogeração este índice sobe para até 85%.

5.1.5 Microturbinas.

As microturbinas são modelos diminutos das Turbinas a Gás e se baseiam nos Ciclos de Brayton. Originalmente foram desenvolvidas para fornecer energia a aeronaves quando estas estão com suas turbinas desligadas.

Montada da mesma forma que as Turbinas a Gás, as microturbinas funcionam com a admissão de ar atmosférico comprimido por compressores até a câmara de combustão. Na câmara de combustão o ar atmosférico é misturado com o vapor de combustível formando uma mistura inflamável. A combustão desta mistura produz gases em alta temperatura e pressão que são exauridos por microturbinas. A expansão dos gases da combustão movimentam as microturbinas e produzem energia mecânica nas mesmas, estas turbinas acopladas a geradores de energia elétrica produzem energia elétrica.

O potencial energético das microturbinas é baixo, produzem de 15 kW_e a 300 kW_e. Podem ser montadas em grupos com potencial de 1.000 kW_e. A recuperação do calor dos gases exauridos pela turbina é utilizado para o pré-aquecimento do combustível, o que aumenta a eficiência da máquina. O compressor, a turbina e o gerador elétrico são interligados por um eixo que distribui a energia gerada na turbina ao compressor e ao gerador. As microturbinas operam em alta rotação, de 96.000 RPM.

Para a utilização de biogás, é necessária uma série de adaptações às microturbinas convencionais que operam com gás natural. Há no mercado versões específicas para a operação de biogás. Apresentam a vantagem de serem pequenas, modulares, e possuem baixo custo de manutenção. Entretanto, os custos de aquisição e investimentos são elevados e o biogás deve ser tratado integralmente, com a remoção de água, sulfato e dióxido de carbono.

A eficiência das Microturbinas na geração de energia elétrica é de 30 – 33%, mas quando combinadas com um ciclo de cogeração elas podem atingir níveis de eficiência superiores a 70%. Apresentam vida útil em torno de 80.000 horas, muito superior aos motores de combustão interna ciclo Otto e Diesel.

5.2 Cogeração.

Cogeração pode ser definida como a geração coincidente de calor e potência elétrica e/ou mecânica, ou a recuperação de calor de processo rejeitado a altas temperaturas para a produção de potência (BAJAY, 1989, apud PAIVA, 2004, p. 66).

A energia térmica, calor, é utilizada em processos industriais e a energia mecânica é normalmente utilizada para a geração de energia elétrica.

No Brasil a cogeração é amplamente utilizada pela indústria de açúcar e álcool com a queima do bagaço da cana de açúcar, e vem se tornando uma fonte importante por apresentar altos índices de eficiência energética.

5.2.1 Tipos de Cogeração.

Podemos definir a cogeração em dois ciclos básicos, “*topping*” e “*bottoming*”. Esse tipo de classificação em dois grupos é baseado na dinâmica do processo, e a diferença entre as classificações é o fluxo de geração de energia (térmica e mecânica).

No ciclo “*topping*” a geração de energia mecânica, ou elétrica, acontece primeiro e apresenta maior consumo de vapor residual que é utilizado para o processo industrial ou para seu outro fim de destino.

Nos processos a ciclo “*bottoming*” a energia do vapor é utilizada primeiro nos processos industriais que demandam muito calor, e a energia residual do vapor é utilizada por uma máquina térmica para a produção de energia mecânica e elétrica.

A figura 5.7 ilustra estes ciclos de cogeração, a esquerda o ciclo “*bottoming*” e a direita o ciclo “*topping*”.

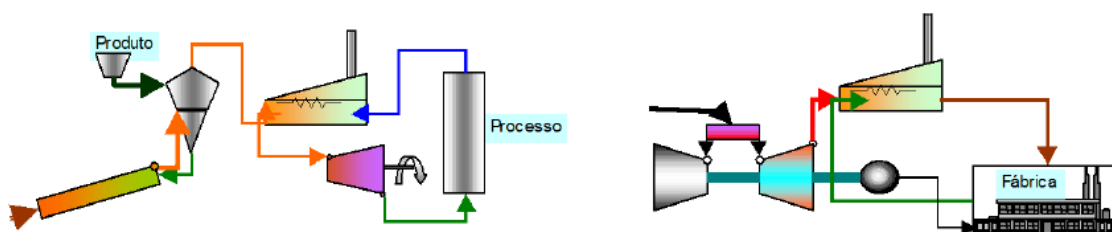


Figura 5.7 Diagramas representando ciclo “*bottoming*” (esquerda) e ciclo “*topping*” (direita).
Fonte: Oddone (2001)

A maioria das usinas à cogeração se baseiam nos ciclo “*topping*”, e as tecnologias de conversão envolvem as mais diversas máquinas térmicas apresentadas anteriormente.

Nos ciclos “*bottoming*” as aplicações são mais restritas às turbinas a vapor.

5.2.2 Ciclos de cogeração a Ciclos Otto e Diesel.

O reaproveitamento dos gases de exaustão dos motores a combustão interna ciclos Otto e Diesel e o calor do óleo lubrificante e do fluido de refrigeração do motor constituem a fonte de calor para a cogeração a ciclos Otto e Diesel.

São necessariamente do modelo de cogeração “*topping*”, e não são capazes de produzirem energia térmica em grande quantidade. Seu uso é limitado a aplicações que necessitam de pouca fonte de energia térmica.

As poucas usinas de cogeração que se baseiam nestes ciclos são de baixa e média potência.

5.2.3 Ciclos de cogeração a Ciclo Brayton.

Os gases de exaustão das turbinas a gás apresentam elevada temperatura, podem concentrar de 50 a 70 % da energia liberada pela combustão interna das turbinas a gás. Estas temperaturas podem atingir até 600°C.

A cogeração por Ciclo de Brayton consiste em reutilizar o calor proveniente dos gases de exaustão das turbinas a gás, e portanto são modelos de cogeração “*topping*”.

Os gases de alta temperatura são utilizados por caldeiras de reaproveitamento para a produção de vapor que será utilizado em processos industriais.

5.2.4 Ciclo de cogeração a Ciclo Rankine.

Este ciclo de cogeração utiliza o ciclo de Rankine, o vapor oriundo da queima do combustível nas caldeiras é utilizado pela turbina a vapor modelo de contra pressão para gerar energia mecânica e pelo processo industrial para a geração de energia térmica.

Este ciclo de cogeração pode ser projetado como “*topping*” ou como “*bottoming*”, dependendo da aplicação desejada. Em processos que demandam uma quantia enorme de energia térmica o processo “*bottoming*” é o indicado, já em processos onde a geração de energia elétrica é o foco, deve-se utilizar o modelo “*topping*”.

O fluido gerador de vapor pode ser condensado ao fim do ciclo para reuso ou pode ser dispersado diretamente a atmosfera.

5.2.5 Ciclo Combinado.

Segundo Oddone (2001), o ciclo combinado é o processo de produção de energia elétrica utilizando turbinas a gás e a vapor. Os gases de exaustão da turbina a gás podem ser reaproveitados com cogeração conforme os ciclos de cogeração a ciclos Brayton.

Simplificando, o ciclo combinado é definido como uma aplicação do calor proveniente dos gases exauridos pelas turbinas a gás em caldeiras que aquecem um fluido gerando vapor em alta temperatura e pressão que são utilizados em turbinas a vapor. Ou seja, é a combinação de turbinas a gás e a vapor em um mesmo ciclo térmico.

Ambas as turbinas acionam geradores para a produção de energia elétrica, única forma de energia produzida no processo.

Por concentrar e reaproveitar a energia “perdida” pela turbina a gás, os ciclos combinados atingem altos níveis de eficiência elétrica, atingindo 57% em grandes usinas termoeletricas.

5.3 Comparação entre as tecnologias.

Cada uma das tecnologias apresentadas anteriormente apresentam suas vantagens e desvantagens características. Embora todas sejam aplicáveis ao uso do biogás para geração de

energia elétrica há algumas particularidades que devem ser observadas ao realizar o estudo de aplicação das mesmas.

As diferenças entre potência instalada e possibilidade de cogeração diferem as tecnologias conforme sua aplicação e devem ser considerados no projeto da usina à biogás. A tabela 5.2 compara as tecnologias e os ciclos estudados neste capítulo, onde são expostas as potências típicas e as eficiências de cada técnica.

Os motores de combustão interna Ciclos Otto e Diesel apresentam elevada eficiência elétrica e são indicados às unidades em que a cogeração ou não seja primordial ou não seja necessária. Já as turbinas a gás e a vapor apresentam excelentes níveis de eficiência quando projetadas em conjunto da cogeração, quando em ciclos combinados podem apresentar eficiência de 88%.

As microturbinas são opções para usinas de baixa potência, apresentam níveis baixíssimos de emissões de gases tóxicos e baixa manutenção. Já as turbinas a gás e a vapor podem atingir potenciais energéticos altíssimos superando os motores de combustão interna.

Tecnologia de conversão	Potência	Eficiência Elétrica	Eficiência cogeração	Emissões de NO
Motores de combustão interna (Otto e Diesel)	30 kW - 20 MW	35 - 45%	60 - 80 %	250 ppm a 3000 ppm
Turbinas a Gás	500 kW - 150 MW	25 - 40 %	60 - 80 %	35 ppm - 50 ppm
Turbinas a Vapor	-	14 - 35 %	60 - 85 %	-
Ciclo combinado	500 kW – 150 MW	35 - 45 %	70 - 88 %	35 ppm - 50 ppm
Motor Stirling	< 100 kW	35 - 50 %	60 - 80 %	-
Microturbinas	30 kW - 100 kW	24 - 28 %	74,50%	> 9 ppm

Tabela 5.2 Comparação entre as diferentes tecnologias compatíveis com o biogás.

6 – Estudo de caso – Viabilidade da geração de energia elétrica a partir da vinhaça.

A partir deste capítulo serão tratados o estudo de viabilidade para a implantação de uma UTE de geração distribuída com combustível o biogás produzido pela biodigestão da vinhaça, em uma usina de açúcar e álcool localizada no interior do estado de São Paulo a 300 km da capital, na cidade de Araraquara.

A análise é distribuída em três capítulos e um último capítulo discursivo, sendo que este trata do escopo do projeto e da análise do ambiente regulatório e comercial envolvidos na comercialização da energia elétrica.

6.1 Escopo do projeto.

A usina analisada produz o álcool hidratado e anidro a partir do melaço da cana de açúcar. Devido à sua produção mediana de álcool, há uma quantidade elevada de produção de vinhaça diariamente.

O projeto é destinado ao aproveitamento da vinhaça produzida na usina em reatores anaeróbicos com a produção de biogás e consequente geração de energia elétrica.

Em razão da busca por maior competitividade do álcool no mercado Brasileiro o uso econômico da vinhaça como fonte de receitas é estratégica às usinas e grupos que competem em um mercado que vem passando algumas dificuldades. Apesar do baixo potencial energético final, esta aplicação é capaz de gerar significativas receitas em usinas que já possuem cogeração.

O estudo pretende determinar se a receita com a venda de energia elétrica é viável tecnicamente e se financeiramente é viável em relação ao custo oportunidade do setor de açúcar e álcool. A finalidade do projeto é a venda de energia para a concessionária local através da infraestrutura de transmissão instalada para o sistema de cogeração já existente na usina.

A usina trabalha no regime de safra e entressafra, períodos onde na safra é realizada a moagem da cana de açúcar e a produção de açúcar e álcool e na entressafra é realizada a manutenção geral da usina. A safra possui duração média de 271 dias ou 9 meses, e se inicia entre março e abril.

6.2 Ambiente regulatório de Geração Distribuída.

A partir da reestruturação do setor de energia elétrica busca-se a descentralização da produção de energia elétrica. Na década de 80 o Poder Legislativo brasileiro iniciou discussões sobre a cogeração no Brasil, e no final dos anos 90 foram elaborados decretos que regularizam a venda de energia excedente de autoprodutores para concessionárias.

Em seu trabalho Romagnoli (2005) apresenta uma linha do tempo com decretos e projetos de leis que regularizam a geração distribuída e a comercialização de energia elétrica de forma descentralizada.

- **Lei 9.074, de 20 de julho de 1995:** Caracteriza o Produtor Independente de Energia (PIE), também estipula os acessos aos sistemas de transmissão e distribuição.
- **Decreto nº 2003, de 10 de dezembro de 1966:** Regulamento da produção de energia por autoprodutores e produtores independentes de energia.
- **Lei nº 9.427, de 21 de dezembro de 1996:** Institui a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).
- **Decreto nº 2655 de 02/07/1998:** Regulamenta o Mercado Atacadista de Energia e o Operador Nacional do Sistema (ONS).
- **Resolução ANEEL nº 112, de 18 de maio de 1999:** Confere requisitos para implementação e expansão de centrais geradoras de energia elétrica e os atribui ao registro e autorizações.
- **Resoluções ANEEL nº 281, 282 e 286 de 01 de outubro de 1999:** Estabelece as condições e tarifas de uso dos sistemas de distribuição de energia.
- **Resolução ANEEL nº 371 de 29 de dezembro de 1999:** Regulamenta a comercialização de energia por autoprodutores a estabelecimentos conectados diretamente a suas instalações elétricas.
- **Resolução ANEEL nº 021, de 21 de janeiro de 2000:** Estabeleceu os requisitos necessários à qualificação das centrais cogeneradoras de energia.
- **Lei nº 10438, de 26 de abril de 2002:** Criado o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétricas (PROINFA) e a Conta de Desenvolvimento Energético (CDE).
- **Lei nº 10848 de 15 de março de 2004:** Primeira citação de Geração Distribuída.
- **Decreto nº 5163, de 30 de julho de 2004:** Regulamentação da comercialização de energia elétrica.

Segundo o decreto, Geração Distribuída é conceituada como:

“Art.14. Para os fins deste Decreto, considera-se geração distribuída a produção de energia elétrica proveniente de empreendimentos de agentes concessionários, permissionários ou autorizados, (...), conectados diretamente no sistema elétrico de distribuição do comprador, exceto aquele proveniente de empreendimento:

I - hidrelétrico com capacidade instalada superior a 30 MW; e;

II - termelétrico, inclusive de cogeração, com eficiência energética inferior a setenta e cinco por cento (...);

“Os empreendimentos elétricos que utilizam biomassa ou resíduos (...) não estarão limitados ao percentual de eficiência energética prevista no inciso II (...).””(BRASIL, 2004).

O Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica, PROINFA, foi um programa criado com o intuito de incentivar fontes de energia eólica, a biomassa e de pequenas centrais hidrelétricas com o objetivo de aumentar a participação destas fontes na matriz energética nacional. Assim aumentando a segurança de abastecimento de energia e a valorização de potenciais energéticos regionais e locais dos locais angariados com os incentivos.

Este programa estava previsto para término de suas inscrições em 2008, ou seja, finalizada a entrada de novos empreendimentos, ou até que fosse atingida a capacidade de 1.000 MW de potência instalada para cada fonte incentivada. Porém, a entrada no programa foi estendida até 2010 afim de se incentivar um número maior de empreendimentos.

6.3 Comercialização da energia.

A comercialização da energia elétrica pode ser realizada em diferentes ambientes, o mercado regulado, o mercado livre e o autoprodutor.

- Autoprodutor:

O mercado autoprodutor é o ambiente onde o cliente é o consumidor de energia, não há venda para terceiros. Neste cenário o preço da energia é o economizado pela não compra da energia antes fornecida. Embora não ocasione receitas extras com venda de produto, a redução de custos com a compra de energia pode ser superior à venda da energia ao mercado regulado ou livre.

- Mercado regulado:

O Ambiente de Contratação Regulada, ACR, é o ambiente de contratação onde o consumidor é protegido com tarifas reguladas, de forma que pequenos consumidores e consumidores que não procurem administrar os contratos com a compra de energia elétrica não estejam expostos a variações e altas tarifas.

A comercialização é normalmente feita por leilões, onde a energia é leiloadada pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. Os compradores e vendedores de energia participantes dos leilões e formalizam suas negociações por meio de contratos registrados. A comercialização da energia quando em geração distribuída é feita através dos Contratos de Geração Distribuída, em que o preço é negociado com as concessionárias de distribuição que administram as redes onde as usinas estão instaladas.

Através de chamadas públicas, as concessionárias acionam os geradores distribuídos para a venda de energia. Os produtores devem enviar à concessionária uma proposta de venda

com os termos comerciais e técnicos para apreciação, o preço é limitado ao Valor de Referência (VR), preço-teto, do ano vigente do contrato. O VR é calculado pela ANEEL anualmente.

Após um leilão realizado entre os proponentes, a venda de energia é realizada e então os contratos de comercialização são registrados, onde o proponente possui obrigação legal de vender a quantidade contratada e no preço leilado.

Os valores de referência divulgados pela ANEEL (2012) para os anos de 2013 e 2014 foram R\$ 129,51 / MW.h e R\$ 97,64 / MW.h, respectivamente. Os valores são corrigidos anualmente pelo índice IPCA. As distribuidoras não podem ultrapassar o total de 10% de sua energia distribuída de origem em geração distribuída.

- Mercado livre:

Ambiente de Contratação Livre é o mercado onde o produtor, caracterizado como Produtor Independente de Energia, negocia o preço diretamente com o consumidor final. Consumidor final pode ser caracterizado como Consumidor Livre ou Consumidor Livre Especial.

O Consumidor Livre é aquele cuja demanda seja superior á 3,0 MW, para consumidores com data de conexão ao sistema anterior a 07 de julho de 1995 a tensão de alimentação também deve ser superior a 69 kV. Demais consumidores que atendem ao requisito de potência instalada cuja data de conexão ao sistema seja posterior a 07 de julho de 1995 não precisam atender este requisito.

Este Consumidor Livre pode comprar energia de qualquer fonte energética, incluindo as grandes hidrelétricas.

Já o Consumidor Livre Especial deve atender ao requisito de potência mínima de 0,5 MW, sem requisitos para tensão de alimentação. Este Consumidor Livre Especial pode comprar somente energia de fontes de energia alternativas, como as fontes oriundas da biomassa. Estas fontes recebem desconto na Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição.

A negociação não é regulada diretamente por nenhum órgão, mas o contrato de venda e compra deve ser registrado na Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE). As fontes de geração de biogás e biomassa devem ser registradas nos Contratos de Compra de Energia Incentivada.

Neste ambiente, as taxas de uso dos sistemas de transmissão e distribuição serão cobrados pelo ONS e pelo agente distribuidor local. Neste mercado, o ICMS é aplicado diretamente.

A venda de energia a comercializadores é interessante a empresas que não possuam expertise na área de comercialização de energia elétrica e que queiram entrar no mercado livre. Embora sejam cobradas algumas taxas, a manutenção de mão de obra própria para a administração dos contratos e gestão da comercialização podem ser significantes para pequenos produtores.

A tabela 6.1 compara o ACR e o ACL.

	ACR	ACL
Compradores	Distribuidores (Consumidores cativos)	Consumidores Livres, Comercializadores e Exportadores.
Vendedores.	Autoprodutores, Importadores Geradores de Serviço Público, Produtores Independentes, Comercializadores.	Autoprodutores, Produtores Independentes e Importadores.
Preço.	Menor preço de leilão (leilão reverso-vendedor oferece o preço e os descontos) com abundância de oferta. Para ajuste de mercado as distribuidoras podem comprar de geração distribuída até 10% do seu mercado com limite de repasse ao VR através de chamada pública.	Preços livremente negociáveis.
Competição.	Na expansão da geração através de licitações por menor tarifa	É geral, ou seja, cada produtor busca seu cliente comercializando para os consumidores livres a sua energia disponível, limitada à energia assegurada (garantia física da planta) no sistema interligado.
Contratação.	Conjunta por todas as distribuidoras (visando suprir 100% do mercado), através de leilões pelo critério de menor tarifa. As contratações são realizadas por um prazo mínimo de 15 anos e máximo de 30 anos.	Contratos bilaterais.

Tabela 6.1 Principais regras de comercialização de energia elétrica.
Fonte: Tahan, 2013

6.4 Barreiras.

Como todo empreendimento, seu estudo de viabilidade e plano de negócio deve apresentar as barreiras existentes no ambiente econômico, tecnológico, social, ambiental, político e cultural. Conhecer estes ambientes pode prevenir o empreendedor do projeto a cometer erros e até a antecipar problemas futuros do empreendimento.

Antes de se dispor a assumir um risco de investir em um projeto, o empreendedor deve conhecer a fundo os fatores externos que podem impedir ou dificultar a entrada neste mercado e quais barreiras o impediriam de sair do mercado (caso o projeto não seja lucrativo como esperado).

6.4.1 Econômicas.

As barreiras econômicas são aspectos que podem impedir o empreendimento devido a fatores econômicos. Os projetos para geração de energia a partir do biogás gerado pela vinhaça apresentam elevado custo de investimento e o retorno não é bem conhecido, faltam casos

práticos para comprovar a rentabilidade das tecnologias. A seguir os fatores econômicos podem dificultar os projetos de geração de energia elétrica com o biogás.

- Importação de equipamentos:

Um fato importante que deve ser levado em conta é o uso de equipamentos importados. Além de possuírem elevados custos de aquisições aliadas a altas taxas de impostos, a variação cambial será determinante para o cálculo do fluxo de caixa. Para projetos onde a aquisição de materiais é feita em médio e longo prazo deve-se esperar que o câmbio varie, positivamente ou negativamente, e portanto deve ser feita uma análise com projeção da taxa cambial.

O acesso a equipamentos importados aumentam custos com materiais para manutenção e frete de maneira que, se não considerados na análise, podem reduzir os ganhos planejados com o empreendimento.

- Instituições de investimento:

A principal instituição de investimento para o setor de geração de energia elétrica é o Banco Nacional Desenvolvimento Econômico e Social, ou BNDES. Esta instituição financia grandes projetos de hidrelétricas e termelétricas, porém, ao se tratar de geração distribuída o financiamento não é tão simples de se obter. Portanto, o uso de capital próprio ou de fundos de investimentos podem ser alternativas ao uso do capital do BNDES.

As altas taxas de juros praticadas no Brasil podem tornar desinteressante e/ou inviável o projeto.

- Preço da energia:

A matriz de energia elétrica brasileira é composta por diversas fontes diferentes, predominando a hidráulica. A grande disponibilidade de energia hídrica com baixo custo impõe uma grande barreira às demais fontes energéticas.

Projetos de geração distribuída apresentam alto custo relativo de investimento e baixo custo de operação e transmissão, porém, levam desvantagem por não possuírem os mesmos padrões de financiamentos de grandes projetos de usinas hidrelétricas. A contrapartida deve ser ajustada pelo preço da energia para garantir ao investidor o retorno esperado no investimento.

Portanto, a concorrência com o preço da energia gerada por hidrelétricas é de fato uma grande barreira à geração de energia pelo biogás.

- Intervenção do governo:

Eventos recentes de interferência do governo sobre o preço final da energia elétrica podem refletir na confiança do investidor no mercado. Constantes intervenções no custo da energia elétrica podem gerar um mercado instável e um ambiente indesejável a investidores, principalmente ao se tratar de geração distribuída.

Práticas de subsídios a determinadas fontes e congelamento de preço são desestimulantes ao investidor e podem bloquear a entrada de novos empreendimentos.

6.4.2 Tecnológicas.

- Novas tecnologias:

As técnicas e tecnologias para a geração de energia elétrica a partir do biogás e da biodigestão da vinhaça são novas e não possuem elevada maturidade. Embora existam tecnologias com elevado nível de desenvolvimento disponível para estas aplicações, é esperado que haja uma grande evolução internacional tecnológica.

O acesso às melhores tecnologias ainda se dá por meio de importação, embora existam no mercado nacional alternativas para a geração de energia elétrica através do biogás.

- Qualidade da energia:

Ao interligar a unidade geradora à rede elétrica deve-se manter os padrões de qualidade de energia desejáveis, garantindo um benefício a rede elétrica. O controle do nível de tensão, frequência, potência reativa, frequência de interrupções, entre outros, são características da qualidade da energia medida nas concessionárias de distribuição. O gerador de energia ao vendê-la à concessionária tem como dever manter os indicadores antes mostrados em níveis adequados.

- Intermitência no fornecimento:

A variação da potência gerada por fontes de geração distribuída pode ser prejudicial à segurança do sistema. O biogás é de difícil armazenamento e transporte, assim ele deve ser utilizado para a geração de energia elétrica. Esta fonte é conhecida como não despachável, ou seja, fonte que não pode ser armazenada.

Uma forma de contornar esta barreira é conciliar o uso do biogás com o gás natural, atenuando as variações esperadas pelo biogás com o uso complementar do gás natural.

- Conexão ao sistema:

O ponto de conexão à rede interligada de energia pode ser determinante para viabilidade do projeto, pois gastos extras com uma subestação podem elevar consideravelmente o custo com investimento e operação da usina.

Unidades que já possuem cogeração e que vendam energia à rede não terão grandes problemas com esta barreira.

6.4.3 Políticas.

As principais barreiras políticas são:

- Tributação e encargos:

Para a elaboração do Estudo de Viabilidade Técnica e Econômica do projeto é necessária a apuração dos tributos incidentes nos ganhos obtidos com a venda da energia elétrica produzida. Os tributos federais IR, PIS/ CONFINS e CSLL mais o tributo estadual ICMS são aplicados sobre as receitas de geração de energia elétrica.

- Programas de incentivo:

O PROINFA é o único programa no mercado Brasileiro para incentivar fontes de energia alternativas, o programa teve sua primeira etapa concluída em 2010. Apesar de o programa ser de extrema importância no desenvolvimento de diferentes fontes de energia há uma certa carência de programas que incentivem o uso do biogás como fonte energética. O biogás produzido em aterros, estações de tratamento de efluentes urbanos e industriais e em biodigestores rurais não possuem nenhum programa específico de incentivo.

- Legislação e intervenções do governo:

A falta de conhecimento por parte de alguns investidores sobre a legislação específica para geração distribuída aliada a intervenções do estado sobre o mercado torna esta atividade obscura, falta esclarecimento por parte de governo e investidores sobre o assunto.

6.4.4 Cultural (Setor Sucroalcooleiro), Social e Ambiental.

Por fim as barreiras culturais do setor sucroalcooleiro que tendem a dificultar que o empreendedor invista no projeto proposto. Os itens aqui citados não são regras para o setor, traduzem apenas uma condição generalizada do setor.

- Falta de tradição e riscos inerentes a um novo negócio.
- Dificuldades do setor em obter financiamento devido ao endividamento e má atuação do mercado na economia.
- Investimento elevado em área que não possui conhecimento técnico bem estabelecido.
- Necessidade de comprometer-se contratualmente com valor definido de geração firme, requerendo, em contrapartida, a segurança do suprimento dos combustíveis. Em caso de falta de resíduos, teria de assumir o risco de complementar através da compra de outro combustível (gás natural) para complementar a geração.
- Demora na emissão de licenças ambientais.

7 – Avaliação técnica.

A análise técnica visa estudar a viabilidade técnica para a implementação do projeto, ou seja, aqui é discutido o dimensionamento e a presença de tecnologia no mercado que atenda à demanda do projeto.

Os dados aqui contidos serão utilizados para os cálculos de investimento e operação da planta proposta.

7.1 Características da produção de vinhaça.

O álcool produzido na usina em questão é de origem do melaço e do caldo da cana de açúcar, no volume de aproximadamente 10,3 litros de vinhaça para cada litro de álcool produzido. Seu destino final ainda é a aplicação “in natura” para a fertirrigação nas culturas de cana de açúcar. A tabela 7.1 apresenta os dados de produção de álcool e vinhaça da usina estudada.

Dado	Valor	Unidade
Safra	271	dias
Produção estimada de Etanol:	72.000,00	m ³ /ano
Produção média de Etanol:	370,00	m ³ /dia
Produção máxima de Etanol:	450,00	m ³ /dia
Produção estimada de Vinhaça:	741.600,00	m ³ /ano
Produção média de Vinhaça:	3.811,00	m ³ /dia
Produção máxima de Vinhaça:	4.635,00	m ³ /dia

Tabela 7.1 Dados gerais usina, cenário de baixa produção de etanol anual.

Nota importante sobre a média diária de etanol é que este valor é baseado em dias em que há produção de etanol. Não é uma média temporal dos 271 dias de safra, mas sim uma média dos dias em que o etanol é produzido. Em períodos muito chuvosos a moagem de cana de açúcar pode ser interrompida devido às péssimas condições do tempo para a colheita.

Para o projeto estudado as características físico-químicas da vinhaça consideradas são apresentadas na tabela 7.2. O valor é referente à literatura, conforme apresentado no capítulo 3, para vinhaça oriunda de produção de etanol do melaço da cana de açúcar.

A vinhaça é produzida em alta temperatura, em torno de 85°C, mas parte de sua energia é liberada em resfriadores e/ou reaproveitadas como fonte de calor. A temperatura final da vinhaça é inferior a 55°C.

Parâmetro	Misto
pH	4,4 - 4,6
Temperatura	< 55
DBO (mg/IO ₂)	19800
DQO (mg/IO ₂)	45000
Sólidos totais (mg/l)	52700
Sólidos voláteis (mg/l)	40000
Sólidos fixos (mg/l)	12700
Nitrogênio	480 - 710
Fósforo	9 - 200
Potássio	3340 - 4600
Cálcio	1330 - 4570
Magnésio	580 - 700
Sulfato	3700 - 3730
Carbono	8700 - 12100
Relação Carbono/Nitrogênio	16,4 - 16,43
Matéria Orgânica (mg/l)	38000
Substâncias Redutoras (mg/l)	8300

Tabela 7.2 Características da vinhaça.

7.2 Parâmetros do Reator Anaeróbico de Fluxo Ascendente e Produção de Biogás.

O dimensionamento e projeto de um reator UASB pode ser realizado conforme passos descritos por Chernicharo (2007). O dimensionamento do reator não é um projeto executivo do mesmo, ele apenas caracteriza as propriedades necessárias para que a reação ocorra adequadamente. Os projetos estruturais do tanque do reator e dos separadores trifásicos devem ser realizados por profissionais capacitados para a tarefa.

7.2.1 Volume do reator.

O volume do reator é determinado por duas regras baseadas em índices calculados conforme as características do projeto. Para determinar o volume do reator é importante conhecer os índices de carga hidráulica volumétrica, o tempo de detenção volumétrico e a carga orgânica volumétrica.

A carga hidráulica volumétrica é a quantidade (volume) de resíduo aplicado diariamente ao reator, por unidade de volume do mesmo. Já o tempo de detenção hidráulica é o inverso da carga hidráulica volumétrica (CHERNICHARO, 1997).

A tabela 7.3 apresenta algumas diretrizes para a determinação do tempo de detenção hidráulica segundo a temperatura do resíduo a ser tratado. A mesma é uma adaptação feita por Chernicharo da literatura de Lettinga & Hulshoff Pol (1991, apud, Chernicharo, 1997, p. 165).

Temperatura do resíduo (C°)	Tempo de detenção hidráulica (h)	
	Média diária	Mínimo (durante 4 a 6 h)
16 - 19	> 10 - 14	> 7 - 9
20 - 26	> 6 - 9	> 4 - 6
> 26	> 6	> 4

Tabela 7.3 Tempos de detenção hidráulica em reatores UASB.

Fonte: Chernicharo (1997).

Já a carga orgânica volumétrica é a carga orgânica que o reator recebe por unidade de volume e por unidade de tempo. Este índice é expresso em kg·DQO/m³dia. Em instalações-piloto há cargas orgânicas volumétricas aplicadas com sucesso a estes reatores e chegam a 45 kg·DQO/m³d, que é um valor considerado elevado. Em projetos de reatores para tratamento de esgoto, onde a temperatura do processo é baixa, são adotados valores inferiores a 15 kg·DQO/m³.d.

A aplicação destes reatores para fins industriais, em que a temperatura é alta ou pode ser controlada, adota-se 30 kg·DQO/m³d como teto máximo para projeto.

$$CHV = \frac{Q}{V} \quad (1)$$

$$\theta_h = \frac{V}{Q} \quad (2)$$

$$COV = \frac{Q \cdot S}{V} \quad (3)$$

Onde,

CHV: Carga Hidráulica Volumétrica.

Q: Vazão.

V: Volume total do reator.

θ_h : Tempo de detenção hidráulica.

COV: Carga Orgânica Volumétrica.

S: Concentração do substrato afluente.

As equações 1, 2 e 3 mostram que há dois métodos para o cálculo do volume do reator UASB. Para determinar qual dos modelos deve ser utilizado, deve ser observar a COV. Em reatores em que a COV seja inferior a 15 kg·DQO/m³d, o tempo de detenção hidráulico é utilizado como base para o cálculo do volume e a seu valor é obtido pela equação 2, respeitando o tempo indicado de acordo com a temperatura do resíduo. Porém para valores de COV superiores a 15 kg·DQO/m³d o volume do reator será calculado pela equação 4:

$$V = \frac{Q \cdot S}{COV} \quad (4)$$

Onde a COV será prefixada em no máximo 30 kg·DQO/m³.d. O valor escolhido determinará a Carga Orgânica Volumétrica do reator. Quanto maior a COV, menor o reator, porém a possibilidade de curtos circuitos da carga orgânica serão maiores e a eficiência do reator será reduzida.

A tabela 7.4 é o volume calculado através da equação 2 para os tempos de detenção médio e mínimo considerando-se vazão média e máxima. O cálculo adotou como premissas o tempo de detenção hidráulico mínimo de 4 horas e médio superior a 6 horas para a aplicação da vinhaça, pois a mesma será processada em temperaturas superiores a 26 °C.

Produção		Tempo de detenção hidráulico (h d)	Volume
Vazão (m³/dia)			mínimo (m³)
Média	3.811	6 0,250	952,75
Máxima	4.635	4 0,167	772,5

Tabela 7.4 Volume do reator por tempo de detenção.

A tabela 7.4 apresenta volumes calculados com base no tempo de detenção hidráulico considerando uma COV inferior a 15 kg·DQO/m³.d, porém calculando o COV através da equação 3 para os volumes de 952,75 m³ e 772,5 m³ teremos o COV iguais a 180 kg·DQO/m³.d e 270 kg·DQO/m³.d, respectivamente. As equações 5 e 6 apresentam os cálculos realizados para determinar as COVs para os volumes propostos na tabela 8.4.

$$COV_{952,75m^3} = \frac{3.811 \frac{m^3}{d} * 45 \text{ kgDQO}/m^3}{952,75 m^3} = 180 \text{ kg} \cdot \frac{DQO}{m^3 \cdot d} \quad (5)$$

$$COV_{772,5m^3} = \frac{4.635 \frac{m^3}{d} * 45 \text{ kgDQO}/m^3}{772,5 m^3} = 270 \text{ kg} \cdot \frac{DQO}{m^3 \cdot d} \quad (6)$$

Portanto, como estes valores de COV são superiores aos 15 kg·DQO/m³.d aceitáveis para se realizar o dimensionamento a partir da equação 2 deve se adotar o método de cálculo da equação 4 para se determinar o volume do reator.

Assumindo como valor máximo para a COV em 30 kg·DQO/m³.dia, onde a mesma será atingida quando em vazão máxima diária de vinhaça, tem-se então os valores calculados pelas equações 7 e 8.

$$V_{vazao\ media} = \frac{3.811 \frac{m^3}{d} * 45 \text{ kgDQO}/m^3}{30 \text{ kg} \cdot \frac{DQO}{m^3 \cdot d}} = 5.716 m^3 \quad (7)$$

$$V_{vazao\ máxima} = \frac{4.635 \frac{m^3}{d} * 45\ kgDQO/m^3}{30\ kg \cdot \frac{DQO}{m^3} \cdot d} = 6.952\ m^3 \quad (8)$$

A tabela 7.5 apresenta os resultados aproximados das equações 7 e 8.

Produção		Volume		
		Carga Orgânica Volumétrica	mínimo	Tempo de detenção
	Vazão (m³/dia)	(kg·DQO/m³d)	(m³)	hidráulico (h d)
Média	3811	30	5.800	36 1,5
Máxima	4635	30	7.000	36 1,5

Tabela 7.5 Volume por carga orgânica volumétrica.

A tabela 7.6 apresenta os valores finais considerados no projeto, considerando-se que o reator deve possuir a capacidade de 7.000 m³ para poder atender a COV de 30 kg·DQO/m³dia em situação de vazão máxima. Os outros parâmetros foram calculados a partir dos dados gerais de produção de vinhaça, vazão mínima, média e máxima, e pelas equações 2 e 3.

Parâmetro	Valor	Medida
Volume do reator.	7.000	m³.
θ_h mínimo.	70	Horas.
θ_h mínimo.	2,91	Dias.
θ_h médio.	44	Horas.
θ_h médio.	1,84	Dias.
θ_h máximo.	36	Horas.
θ_h máximo.	1,51	Dias.
COV médio.	24	kg·DQO/m³d
COV máximo.	30	kg·DQO/m³d

Tabela 7.6 Parâmetros finais de volume do reator

7.2.2 Eficiência de remoção de Matéria Orgânica.

A eficiência na remoção da matéria orgânica e redução da DQO em reatores UABS são geralmente estimadas por meio de relações empíricas, principalmente em se tratando de reações em faixa termofílica. Os reatores utilizados para tratamento de esgotos são projetados para operação na faixa mesofílica e não na faixa termofílica, fato que contribui fortemente para a falta de estudos sobre a eficiência da remoção da DQO nesta faixa de temperatura.

Chernicharo (1997) apresenta um modelo matemático capaz de estimar a eficiência da remoção de DQO em reatores que operam na faixa mesofílica, que embora diferente da faixa de operação do reator projetado espera-se que reatores operando na faixa termofílica possuam desempenho superior a reatores operando na faixa mesofílica. A equação 9 é o modelo matemático apresentado por Chernicharo.

$$E_{DQO} = 100 \cdot (1 - 0,68 \cdot \theta_h^{-0,35}) \quad (9)$$

Onde,

E_{DQO} : Eficiência em termos de redução de DQO (%).

θ_h : Tempo de detenção hidráulica (h).

Viana (2006) apresenta um estudo sobre o tratamento da vinhaça em reatores UASB operando em temperatura na faixa termofílica submetidos a altas cargas orgânicas. Nesse trabalho há relatos de experimentos conduzidos na década de 90 que mostram eficiências variadas com diferentes cargas orgânicas volumétricas e tempos de detenção hidráulico resultantes em diferentes coeficientes de remoção da DQO.

Na tabela 7.7 fica evidente que em reatores de maiores escalas a eficiência de remoção é alta, acima de 72%, apenas o reator de Harada obteve eficiência reduzida.

Referência	Reator (m³)	Temperatura (°C)	COV (kg·DQO/m³d)	TDH (d)	Eficiência de remoção DQO (%)
Souza et al. (1992)	75	55	22	2,2	72
Vlissidis e Zouboulis (1993)	2000	55	6,57	10	86
Driessen et al. (1994)	1500	55	22	6	88
Harada et al. (1996)	0,14	55	23,5	2,55	40

Tabela 7.7 Resultados experimentais obtidos em reatores UASB para tratamento da vinhaça.

Fonte: WILKIE et al., 2000 apud VIANA, 2006.

O gráfico 7.1 é uma curva de eficiência obtida através dos dados da tabela 8.7, onde a curva representa a evolução da eficiência de remoção de DQO de reatores operando com altas COV, superiores a 15 kg·DQO/m³, e em temperatura elevada, superiores a 50°C. Utilizando a ferramenta Excel a equação 10 foi obtida com o objetivo de estimar a eficiência destes reatores.

$$E_{DQO} = 66,229 \cdot \theta_h^{0,1288} \quad (10)$$

E_{DQO} : Eficiência em termos de redução de DQO (%).

θ_h : Tempo de detenção hidráulica (d).

Então calculando a equação 9 com as variáveis θ_h mínimo igual a 2,91 dias, θ_h médio igual a 1,84 dias e θ_h máximo igual a 1,51 dias teremos que a eficiência de remoção de DQO estará dentro dos limites de 69,7 a 75,9 %. Já se baseando na equação 8 de Chernicharo a eficiência de remoção estará dentro da faixa de 80,6 a 84,6 %. Como a equação 9 de Chernicharo é recomendada para estimar a eficiência na remoção de DQO em reatores com COV inferior a 15 kg·DQO/m³ o resultado da equação 9 será utilizado para estimar a produção de biogás para a aplicação estudada.

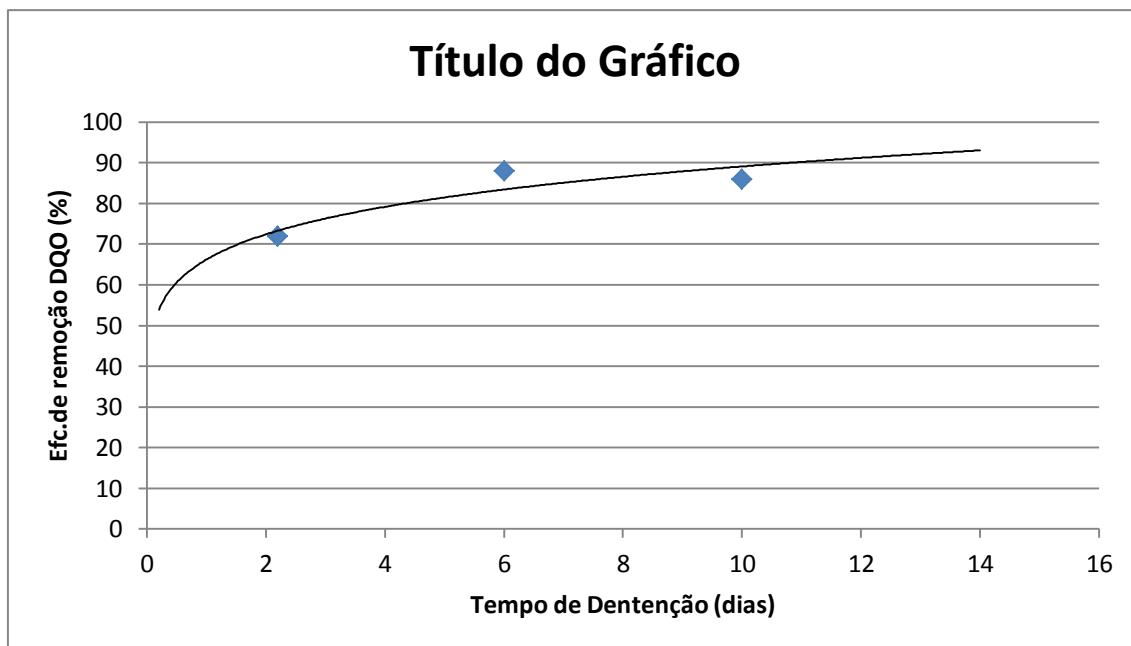


Gráfico 7.1 – Eficiências observadas em reatores UASB tratando vinhaça na faixa de temperatura termofílica.
Fonte: Autor.

A tabela 7.8 consolida os resultados discutidos no parágrafo anterior.

Reator (m³)	Temperatura (°C)	COV (kg·DQO/m³d)	TDH (d)	Eficiência de remoção DQO (%)
7.000	55	30	1,51	69,5 – 75,9

Tabela 7.8 – Eficiência estimada para o reator UASB proposto. Considerando vazões mínima, média e máxima.

7.2.3 Produção de biogás.

A produção de biogás pode ser determinada pela redução total de matéria orgânica do resíduo tratado pelo reator. Através da queda estimada da DQO é possível estimar a produção de biogás gerado no sistema, a equação 11 mostra o processo.

$$DQO_{CH_4} = Q \cdot (S_0 - S) - Y_{obs} \cdot Q \cdot S_0 \quad (11)$$

Onde,

DQO_{CH_4} : carga orgânica convertida em metano (kg DQO_{CH_4} /d).

Q: Vazão de resíduo (m³/d).

S_0 : Concentração de DQO afluente (kgDQO/m³).

S: Concentração de DQO efluente (kgDQO/m³).

Y_{obs} : coeficiente de produção de sólidos no sistema, (0,23 kgDQO_{lodo}/kgDQO_{apl}).

A conversão da carga de DQO transformada em metano em volume:

$$Q_{CH_4} = \frac{DQO_{CH_4}}{K(t)} \quad (12)$$

E,

$$K(t) = \frac{P \cdot K}{R \cdot (273 + t)} \quad (13)$$

Onde,

Q_{CH_4} : Produção volumétrica de metano (m^3/dia).

$K(t)$: Fator de correção para a temperatura operacional do reator ($kg \cdot DQO/m^3$).

P : Pressão atmosférica (1 atm).

K : DQO correspondente a um mol de CH_4 ($64gDQO/mol$).

R : Constante dos gases ($0,08206 \text{ atm} \cdot L/mol \cdot ^\circ K$).

t : Temperatura operacional do reator.

Das equações 11, 12 e 13 é possível estimar as expectativas de geração de biogás da planta de geração de energia. As estimativas sobre a produção total de biogás não são exatas, pois dependem da temperatura, que pode variar conforme o tempo, da vazão média e máxima, dos tempos de detenção hidráulico e da eficiência de remoção de DQO.

Como visto no capítulo 4, a eficiência de remoção de matéria orgânica e a produção de biogás dependem de alguns outros parâmetros químicos pertencentes à vinhaça e ao substrato interno do reator. Por isso, o controle de pH, temperatura de substâncias tóxicas na vinhaça deve ser controlado a fim de se otimizar o processo em geral.

Calculando a equação 13 temos:

$$K(t) = \frac{1 \text{ atm} \cdot 64gDQO/mol}{0,08206 \text{ atm} \cdot \frac{L}{mol \cdot ^\circ K} \cdot (273 + 55^\circ C)} = 2,37 \quad (14)$$

Agora utilizando as equações 11 e 12 para estimar a produção de biogás diária e anual. Para os cálculos foram consideradas como variável “Q” os valores de vazões média diária, máxima diária, iguais a $3.811 m^3/dia$ e $4.635 m^3/dia$ respectivamente, e a vazão anual de vinhaça, $741.600 m^3/ano$. A concentração de DQO inicial é de $45 kgDQO/m^3$ e as eficiências de remoção de DQO em vazão máxima e em vazão média são $69,50\%$ e $71,61\%$, respectivamente.

$$Q_{CH_4} = \frac{3.811 \frac{m^3}{d} \cdot \left(45 \frac{kgDQO}{m^3} - \frac{12,77kgDQO}{m^3} \right) - 0,23 \frac{kgDQOlodo}{kgDQOapl} \cdot 3.811 m^3/d \cdot 45kgDQO/m^3}{2,37} \quad (15)$$

$$Q_{CH_4} = \frac{4.635 \frac{m^3}{d} \cdot \left(45 \frac{kgDQO}{m^3} - \frac{13,72kgDQO}{m^3} \right) - 0,23 \frac{kgDQOlodo}{kgDQOapl} \cdot 4.635 m^3/d \cdot 45kgDQO/m^3}{2,37} \quad (16)$$

$$Q_{CH_4} = \frac{741,6 k \frac{m^3}{d} \cdot \left(45 \frac{kgDQO}{m^3} - \frac{12,77kgDQO}{m^3} \right) - 0,23 \frac{kgDQOlodo}{kgDQOapl} \cdot 741,6 km^3/d \cdot 45kgDQO/m^3}{2,37} \quad (17)$$

Os resultados das equações 15, 16 e 17 foram respectivamente $35.080,87 m^3CH_4$, $40.788,77 m^3CH_4$ e $6.826.548,55 m^3CH_4$. Estes valores representam apenas o volume de metano produzido, não o volume de biogás. A relação de metano no biogás gerado pela biodigestão

anaeróbica da vinhaça é de 60%, ou seja, 60% do volume do biogás é metano. Assim, calculando os volumes estimados para produção de biogás teremos as equações 18.19 e 20.

$$Q_{Biogás} = \frac{35.080,87 \text{ m}^3 CH_4}{60\%} = 58.469 \text{ m}^3 \text{ biogás} \quad (18)$$

$$Q_{Biogás} = \frac{40.788,77 \text{ m}^3 CH_4}{60\%} = 67.982 \text{ m}^3 \text{ biogás} \quad (19)$$

$$Q_{Biogás} = \frac{6.826.548,55 \text{ m}^3 CH_4}{60\%} = 11.377.5814 \text{ m}^3 \text{ biogás} \quad (20)$$

A tabela 7.9 demonstra os valores esperados para a produção de biogás com concentração de metano em 60% do volume total do gás. Os valores de rendimento de produção de metros cúbicos de biogás por quilograma de DQO removida estão dentro dos experimentos listados por Viana (2006). Nesse trabalho estão expostos os resultados das experiências de Vlissidis e Zouboulis que apresentam rendimento de 0,43 m³ por kg DQO removido e os experimentos de Driessen com rendimento de 0,5 m³ por kg DQO removido.

Produção	Vazão (m³/unidade de tempo)	Eficiência de remoção de DQO (%)	Biogás produzido (m³)	Rendimento m³ por kgDQO removido
Diária				
Máxima	4.635,00	69,50	67.982,00	0,47
Média	3.811,00	71,64	58.469,00	0,48
Anual				
Média	741.600,00	71,64	11.377.581,00	0,48

Tabela 7.9 Produção diária e anual de biogás do projeto.

7.2.4 Aspectos construtivos

Foi adotado o formato retangular para estimação dos custos de construção do reator, em quatro módulos de 1.750 m³. Assumindo uma altura útil de 5,5 metros, altura usual em reatores UASB, teremos cada módulo do reator com área de 319 m².

A quantidade de tubos de distribuição do efluente pode ser calculada pela equação 21.

$$N_D = \frac{A}{A_i} \quad (21)$$

Onde,

N_D : número de tubos de distribuição.

A : área de seção do reator.

A_i : área de influência do distribuidor, adotado 2,5 m².

Portanto, realizando o cálculo, o número de tubos de distribuição para cada módulo será 128 tubos de dimensão de 1,5 polegadas, ou 37,5 mm, garantindo assim uma velocidade de escoamento inferior a 0,2 m/s nas tubulações.

O separador trifásico deverá apresentar área de contato com o biogás de 203 m², de forma que a taxa de liberação média seria 3,0 m³gás/m² e a máxima de 3,5 m³gás/m². Ambos os valores estão dentro dos limites máximos e mínimos usualmente recomendados. Os defletores apresentam área de 312 m².

O tanque de reação será construído em concreto armado, com laje de concreto e pilares de concreto internamente para suporte da laje e do separador trifásico. A estrutura do separador trifásico e do defletor serão de aço inox, garantindo longevidade aos elementos.

7.3 Geração de energia elétrica

O projeto leva em consideração que a unidade já possui a infraestrutura para venda de energia, linha de alta tensão já instalada e que não haverá custos adicionais com a conexão dos geradores à rede e nem custos adicionais com a interligação com os demais geradores já instalados.

A potência a ser inserida pelo grupo de geradores é inferior à capacidade instalada para atender a usina, portanto somente serão considerados custos com projeto e não com equipamentos para a interligação.

7.3.1 Determinação de potencial elétrico e estimativa de produção.

Pelos dados obtidos no item anterior, é possível especificar a capacidade de potência instalada e de energia produzida pelo grupo de geradores que serão determinados.

Para a seleção do motor e do gerador necessário para a aplicação, é necessário especificar o tipo de motor, a vazão em m³/h de biogás que será consumido, a eficiência esperada e o potencial energético do biogás disponível.

Para tanto, pode-se utilizar os volumes máximos e médios de biogás produzidos por dia para especificar a vazão de biogás. A usina sob análise já possui cogeração com a queima do bagaço da cana, portanto o tipo de motor escolhido para o projeto foi o Motor de Ciclo Otto devido a sua eficiência elevada para a geração de energia elétrica, seu baixo custo de manutenção e por possuir capacidade energética com grandeza de 500 MW à 2500 MW para a aplicação com o biogás.

A potência instalada pode ser determinada calculando o potencial energético em vazão alta e em vazão média, e determinar uma faixa de operação do gerador, de forma que este não fique nem superdimensionado e nem subdimensionado.

A equação 22 pode ser utilizada para determinação do potencial energético para as vazões máxima e média.

$$PE = Q_{Biogás} \cdot PCI_{Biogás} \cdot \eta_{Gerador} \cdot \frac{4,1868}{86.400} \quad (22)$$

Onde:

PE = Potência elétrica (kW);

$Q_{\text{Biogás}}$ = Vazão de biogás (m³/dia);

$PCI_{\text{Biogás}}$ = Poder calorífico inferior do biogás (kcal/m³);

η_{Gerador} = Eficiência do motor gerador (%);

4,1868 = Fator de conversão de “kcal” para “kJ”;

86.400 = Fator de conversão de dia para segundos.

Calculando as potências conforme a equação 22 temos as equações 23 e 24:

$$PE_{\text{máxima}} = 67.982 \frac{m^3}{d} \cdot \frac{5.136,5 kcal}{m^3} \cdot 42,2\% \cdot \frac{4,1868}{86.400} = 7.140,7 kW \quad (23)$$

$$PE_{\text{média}} = 58.469 \frac{m^3}{d} \cdot \frac{5.136,5 kcal}{m^3} \cdot 42,2\% \cdot \frac{4,1868}{86.400} = 6.141,5 kW \quad (24)$$

A tabela 7.10 consolida os resultados das equações 22 e 23 e apresenta uma relação de potência real com potência instalada desejada para garantir que os geradores não trabalhem em sua carga máxima nem sobrecarregados.

Vazão	Potência Elétrica (kW)	Relação (PE_r/PE_n)
Máxima	7.140	0,90
Média	6.142	0,75

Tabela 7.10 Potências elétricas máxima e média.

Então a potência instalada desejada deve atender o requisito da razão de 7.140 kW com a relação 0,9 e da razão de 6.142 kW com a relação 0,75. A potência de 8.000 kW atende a relação de 90% da potência máxima e 76% da potência média.

A tabela 7.11 mostra os dados especificados com as potências calculadas e dimensionadas de forma que os grupos moto-geradores não fiquem sobrecarregados.

Tipo	Vazão	Potência	Eficiência	Quantidade
Motor Ciclo Otto	**	1000 (kW)	42,20%	8

Tabela 7.11 Especificações do grupo de motores e geradores (simplificado).

Agora considerando a produção anual de biogás, através da equação 25 é possível estimar a produção anual de energia elétrica (considerando eficiência mínima do reator e eficiência nominal do grupo moto gerador).

$$E = Q_{\text{Biogás}} \cdot PCI_{\text{Biogás}} \cdot \eta_{\text{Gerador}} \cdot \frac{4,1868}{3.600} \quad (25)$$

Onde,

E = Energia elétrica estimada para um ano safra (kWh);

$Q_{\text{Biogás}}$ = Vazão de biogás (m³/dia);

$PCI_{\text{Biogás}}$ = Poder calorífico inferior do biogás (kcal/m³);

η_{Gerador} = Eficiência do motor gerador (%);

4,1868 = Fator de conversão de “kcal” para “kJ”;

3.600 = Fator de conversão para hora.

$$E = 11.377.581 \frac{m^3}{d} \cdot \frac{5.136,5 kcal}{m^3} \cdot 42,2\% \cdot \frac{4,1868}{3.600} = 28.682 MWh \quad (26)$$

Portanto, segundo estimativa de produção de biogás para o ano safra de 11.377.581,00 m³, é então calculado pela equação 26 a estimativa de geração de energia elétrica de 28.682 MWh por ano safra.

7.3.2 Especificação técnica do grupo motor gerador.

Para o projeto foram especificadas as seguintes características e dimensões técnicas para o grupo de motores a combustão interna ciclo Otto acoplados a geradores elétricos.

O grupo de gerador determinado para elaboração do estudo atende as algumas características determinadas segundo os dados de produção diária de biogás. A capacidade foi determinada através de consulta a fabricantes de motores de combustão interna.

A tabela 7.12 contém dados que foram obtidos em conjunto com o fabricante do grupo moto gerador (dimensões do grupo, peso, consumo de óleo, corrente máxima), condições ambientais do local (temperatura de operação, humidade relativa, altitude), e em relação a configuração desejada pelo empreendedor (tensão nominal do gerador e potência total da planta) e alguns dados do poder calorífico do biogás.

A escolha por geradores de 1000 kW devido à possibilidade de se ter modularidade no sistema, de forma que sempre hajam intervalos para realizar manutenções preventivas nos grupos geradores e que defeitos causem pequeno impacto na capacidade instalada da planta. A tensão de 380 V será transformada para a tensão de 13,8 kV.

Característica	Dimensão	Unidade
Capacidade Total da Planta	8000	kW
Quantidade de geradores	8	unidades
Tensão nominal do gerador	380/220	V
Tensão auxiliar do gerador	220	V
Fator de potência	0,85	
Frequência	60	Hz
Corrente máxima	1800	A
Modo de operação	Continua motor estacionário	
Temperatura ambiente Máx:	40	°C
Temperatura ambiente Design:	28	°C
Temperatura ambiente Min:	5	°C
Altitude	646	m
Humidade relativa	69%	
Modo de operação	Paralela a geradores e a rede	
Densidade do gás	1,2143	kg/m³
PCI	5140	kcal/m³
Vazão média de gás	2440	m³/h
Vazão máxima de gás	2840	m³/h
Consumo de lubrificantes	2	g/kw.h
Dimensões	6710x2110x3000	mm
Peso	32300	kg
Refrigeração do motor	Radiador	
Controle de isolamento (ilhamento)	Possui	
Controle de sincronismo	Possui	
Transformador auxiliar	Possui	
Painel de proteção	Possui	
Central de controle do motor	Possui	

Tabela 7.12 Características do grupo motor-gerador.

7.3.3 Subestação, controle e proteção dos geradores.

Cada gerador deverá contar com os seguintes itens para que seja possível a interligação do mesmo com a rede da concessionária.

- Transformador a seco 1000 kVA com tensão alta de 13,8 kV e baixa de 0,380 kV.
- Dois disjuntores a vácuo de 2000 A, um para a alta tensão outro para a baixa tensão.
- Conjunto de medição de alta tensão e alta corrente (Transformadores de Corrente, TC, e Transformadores de Potencial, TP).
- Painel de proteção, sincronismo e excitação contendo regulador de tensão, relé microprocessado, relé de bloqueio, sincronizador automático digital e medidor de múltiplas grandezas (tensão, corrente e potências).
- Miscelâneas de componentes como buchas, para-raios, cabos e materiais gerais.

A interligação com a rede da distribuidora será realizado com um Painele de Controle de Exportação de Energia contendo sincronizador automático digital, voltímetro duplo analógico, frequencímetro duplo, sincronoscópio digital com dois disjuntores a vácuo para manobra do sistema.

7.4 Demais sistemas.

A planta de geração do biogás requer instalações adicionais para seu funcionamento. Para o projeto é necessária a construção de um galpão para instalação dos grupos geradores, tubulações para a vinhaça, para o efluente dos reatores e para o biogás, e por fim o purificador de gases.

7.4.1 Galpão dos geradores

Estrutura simples apenas para isolar os geradores das variações climáticas e para reduzir a exposição ao ambiente, assim como isolar o local.

O galpão terá dimensão de 35 metros por 30 metros, totalizando área construída de 1050 m². Lá estarão os 8 grupos geradores, os 9 painéis, 8 transformadores e os sistemas auxiliares. O piso sobre os geradores deverá ser de 0,5 m para poder suportar o peso do gerador sem ocorrer afundamentos.

7.4.2 Tubulações

A alimentação de vinhaça aos reatores será feita através de uma bomba já existente para recalque da vinhaça.

Os tubos e conexões selecionados para a alimentação dos reatores devem ser de aço inox devido à característica corrosiva da vinhaça. A vinhaça será bombeada através de uma tubulação de 8 polegadas do ponto de acumulação da mesma (local de origem) até próximo aos reatores. Neste ponto a tubulação será dividida em um “Header”, peça utilizada para a integração de tubulações em um único ponto, de tubulações que dividira a vazão em 4 tubulações de 4 polegadas. Cada reator será alimentado por uma tubulação de 4 polegadas que alimentará a caixa de distribuição do reator.

O efluente do reator será reencaminhado para o ponto de origem de vinhaça para ser bombeado aos veículos da fertirrigação. O arranjo de tubulação será o mesmo que o de alimentação dos reatores, com a diferença da instalação de uma bomba de 300 m³/h.

O biogás também será encaminhado por tubulações de inox, os coletores terão saídas em tubulações de 2 polegadas, estas tubulações serão unidas em um “Header” anterior ao sistema de purificação do biogás. Após o “Header” o biogás será encaminhado em tubulação de 6 polegadas ao barracão dos geradores, onde após passar por um novo “Header” será distribuído em 4 tubulações de 2 polegadas.

A tabela 7.13 mostra os equipamentos necessários o sistema de tubulações.

Produto	Diâmetro (pol)	Quantidade (un.)	Tipo
	8	190 m	
Vinhaça / efluente do reator	4	216 m	Tubo em Aço Inox
Biogás	6	83 m	
	2	246 m	
	8	4	Válvula Gaveta
Vinhaça / efluente do reator	4	8	
	6	10	Válvula Esfera
Biogás	2	8	
Vinhaça / efluente do reator	10	44	Dormente
Biogás	8	12	

Tabela 7.13 Dimensionamento de tubulações e válvulas.

Para o bombeio do efluente dos reatores foi considerada uma praça de bombas com bacia de contenção e duas moto bombas de 300 m³/h com motor de 75 cv e potência elétrica de 55 kW. Uma das bombas é reserva.

O sistema de exaustão/soprador de gases é constituído de 2 exaustores de 15.000 m³/h de vazão máxima, 20 cv de potência cada exaustor. Configurado como as bombas, sempre um dos exaustores estará de reserva.

7.4.3 Lavador de gases

O sistema de lavagem de gases é iniciado com a secagem do gás através de 3 secadores de 5kW e capacidade de secagem de 1500 m³/h cada um.

Para a filtragem e remoção do H₂S e CO₂ foi selecionada uma torre de adsorção com carvão ativado, fabricado em chapa aço-carbono, com acabamento em pintura esmalte sintético. Trata-se de uma construção simples, compacta, operação fácil e de grau de purificação elevado para caso de ar suficientemente seco.

Com 2000 mm de altura e diâmetro de 950 mm, a torre funciona com um exaustor que sopra o gás para duas gavetas filtrantes contendo carvão ativado, que adsolve o H₂S e o CO₂. O exaustor possui capacidade de vazão de até 4.000 m³/h, pressão de 65 mmCA, um motor de 2 CV e 220 V e possui sucção de 360 mm e recalque de 320 mm.

8- Avaliação financeira

Este capítulo apresenta uma metodologia para a avaliação da viabilidade econômico financeira da utilização do biogás proveniente da biodigestão anaeróbia da vinhaça. Dois cenários serão estudados: um com a venda no mercado regulado e o outro com a venda no mercado livre.

As metodologias aplicadas nas avaliações econômicas são baseadas nos fluxos de caixa dos projetos. O objetivo das metodologias apresentadas neste capítulo é verificar a viabilidade econômica e qualificar o projeto de forma que o empreendedor, investidor, possa compará-la a outros investimentos.

É importante ressaltar que modelos econômicos são marcados pelas incertezas, primeiro porque os índices comerciais previstos no estudo estão sujeitos a oscilações no tempo. Segundo porque as estimativas antes realizadas são expectativas baseadas em experiências reais, mas não há garantias de que os componentes trabalharão conforme proposto. A execução de projetos e a operação de plantas estão expostas a inúmeras variáveis impossíveis de quantificar, dessa forma o presente trabalho se propõe a analisar e prever custos comuns do projeto.

8.1 Métodos de análise

Como visto anteriormente, as metodologias aqui discutidas são baseadas nos fluxos de caixa de um projeto durante sua vida útil, ou seja, analisa-se um projeto através de uma projeção futura dos movimentos de capitais esperados para o tempo de operação do projeto.

Os fluxos de caixa são os resultados líquidos que, efetivamente, serão distribuídos aos investidores.

Os fluxos de caixa (entradas e saídas) são representados em gráfico, diagramas, como o da figura 8.1 onde as setas acima do eixo central representam as entradas, receitas obtidas com a comercialização do produto ou empréstimos, e as setas abaixo da linha representam a saída de verbas, custos com investimentos, pagamentos de passivos e custos operacionais.

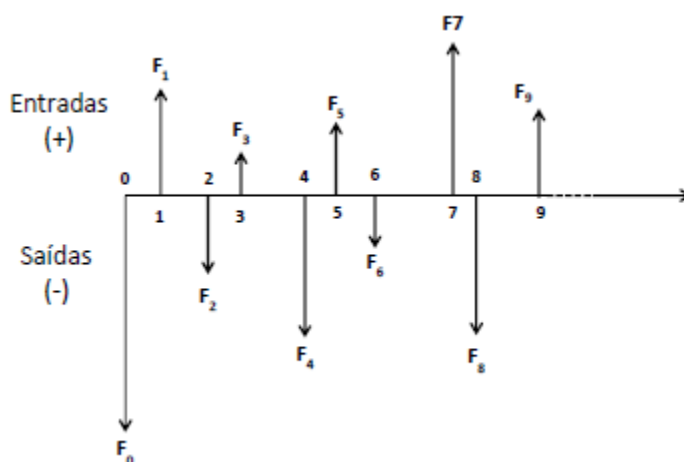


Figura 8.1 Diagrama de fluxo de caixa.

a) Taxa mínima de retorno

A taxa de retorno de um projeto é a taxa que deve se obter afim de que seja pago o custo do capital envolvido no financiamento do projeto. Em outras palavras, é a taxa mínima esperada pelo investidor que garanta um retorno mínimo esperado por seu perfil investidor.

Como usualmente investidores possuem inúmeras opções de investimento, a taxa mínima por eles esperado implica o retorno mínimo esperado ao investir em um projeto. Projetos que possuam taxas inferiores não são capazes de pagar o custo do capital investido.

A equação 27 demonstra o modelo “Capital Asset Pricing Model”, ou CAPM. Este modelo deve calcular a taxa de retorno adequada que irá remunerar o investidor pelo tempo e pelo risco envolvidos no projeto.

$$K_i = RF + \beta(i) \cdot (ER_m - RF) \quad (27)$$

Onde,

K_i : taxa adequada ao risco do ativo i .

RF : taxa de renda fixa para aplicações sem risco.

ER_m : taxa de retorno do mercado como um todo.

$\beta(i)$: medida de risco relativa ao projeto ou ativo i .

O índice beta é particular a uma empresa ou a um setor, e representa a medida da volatilidade das ações, desta empresa ou setor, em relação ao mercado como um todo. O beta reflete a tendência de uma ação mover-se junto do mercado.

b) Valor presente líquido –VPL

O valor presente líquido relaciona as entradas e saídas do fluxo de caixa desde o momento $t=0$, onde os valores futuros são ajustados por uma taxa de atratividade mínima considerada pelo investidor (taxa de juros pelo risco). Basicamente o VPL é a somatória de todas as entradas e saídas com valores corrigidos para o presente, desta forma é possível prever lucros ou prejuízos associados ao projeto, durante toda sua vida útil.

A equação 28 demonstra o cálculo realizado no VPL.

$$VPL = \sum_{j=1}^n \frac{FC_j}{(1+i)^j} - FC_0 \quad (28)$$

Onde,

VPL = Valor Presente Líquido (R\$);

FC_j = Fluxo de caixa em tempo j , resultado econômico por período de tempo (R\$);

FC_0 = Fluxo de caixa no início do projeto, normalmente o capital investido (R\$);

i = taxa mínima de atratividade, taxa de juros esperado pelo investidor (%);

j = período de tempo do projeto (ano);

n = vida útil do projeto (anos).

O indicador VPL possui sua eficácia na qualidade das estimativas orçamentárias do fluxo de caixa e na determinação da taxa mínima de atratividade adequada ao risco do empreendimento. Escolhas equivocadas ao realizar o estudo do projeto podem ocasionar falhas na análise e na decisão de investimento, sobretudo em projetos inovadores e/ou de pouca maturidade, onde as informações são restritas e há poucos profissionais experientes no mercado.

Na tabela 9.1 de pontos de decisão VPL, onde o VPL é superior a 0, o investidor terá retorno superior à taxa mínima de atratividade. Ou seja, terá lucro superior aos juros do risco que está disposto a assumir. Em VPL igual a 0, a taxa é igual à taxa mínima de atratividade e o investidor está apto a escolher se deve investir ou não.

Condição do VPL	Provável posição
$VPL > 0$	Realização de investimento
$VPL = 0$	Indiferente
$VPL < 0$	Não realização do investimento

Tabela 8.1 Pontos de decisão VPL

Quando o VPL é inferior a 0, o investidor não deve investir pois não terá o retorno financeiro desejado.

Ao analisar múltiplos projetos deve-se procurar investir no projeto de maior VPL. Esta análise é financeira e não diz respeito à análise estratégica de projetos.

c) Taxa interna de retorno – TIR

Taxa que anula o VPL, é a taxa de juros associada ao VPL de cada projeto. A TIR é de longe o critério econômico mais controverso na análise de projetos. Alguns estudos indicam que este critério é perigoso e que pode levar a decisões erradas.

As raízes da equação 29 representam o TIR, como podem ocorrer mais de uma raiz é preciso muito critério ao utilizar este indicador.

$$VPL = 0 = \sum_{j=1}^n \frac{FC_j}{(1+k)^j} - FC_0 \quad (29)$$

Onde,

k = taxa interna de retorno - TIR (%);

VPL = Valor Presente Líquido (R\$);

FC_j = Fluxo de caixa em tempo j, resultado econômico por período de tempo (R\$);

FC_0 = Fluxo de caixa no início do projeto, normalmente o capital investido (R\$);

j = período de tempo do projeto (ano);

n = vida útil do projeto (anos).

d) Ponto de equilíbrio econômico – Break Even

O ponto de equilíbrio é um indicador da quantidade mínima de produto, neste caso de energia vendida para a rede, que é necessário para que o projeto iguale receita e custos. A equação 30 mostra a maneira de calcular o PE.

$$PE = p \cdot q = (cv \cdot q) + cf + custo\ capital + IR \cdot (p \cdot q - cv \cdot q - cf - depreciação) \quad (30)$$

Onde,

p = preço;

q = quantidade;

cv = custos variáveis;

cf = custos fixos;

IR = Imposto de renda.

Este estudo pretende determinar o preço mínimo para a quantidade média de biogás calculada no capítulo 7 produzida na usina. A partir daí determinar o Ponto de Equilíbrio para determinar a viabilidade do projeto.

8.2 Premissas econômicas e comerciais

Para calcular os parâmetros de VPL, TIR e PE, é necessário adotar algumas premissas econômicas, comerciais e orçamentárias.

As principais premissas adotadas foram:

- Índice beta para o mercado de açúcar e álcool: 0,7584, segundo Econoinfo (2014);
- Taxa de renda fixa: 10,9 % (CDI), segundo Valor² (2014);
- Índice Bovespa: 9,87% (acumulado até dia 12/10/2014), segundo Valor¹ (2014);
- Taxa mínima de atratividade: 10,12 %;
- Horizonte estudado foi de 20 anos, vida útil do reator e motores;
- Amortização linear de 5% a.a.;
- Dólar americano: 2,4096 reais, segundo Receita Federal (2014);

Os dados acima são de consulta realizada no dia 12/10/2014 e 18/10/2014 para o valor do Dólar.

A taxa mínima de atratividade foi calculada conforme a equação 31.

$$Ki = 10,90\% + 0,7584 \cdot (9,87\% - 10,90\%) \quad (31)$$

O planejamento orçamentário foi levantado com base em estudos já realizados, através de simulações orçamentárias de prestadores de serviço e através de cotações reais enviadas ao mercado.

As próximas seções tratam dos fluxos de investimento, operação e manutenção e receitas do projeto estudado.

8.2.1 Custos de investimento

Os custos com investimento no projeto foram estimados segundo o estudo técnico analisado no capítulo 7. O plano de investimento é dividido em 5 etapas:

- I. Reatores Anaeróbicos.
- II. Sistemas de tubulações.
- III. Lavador de gases.
- IV. Barracão dos geradores.
- V. Moto-geradores.

A seguir são apresentadas as estimativas e justificativas adotadas.

Reatores anaeróbicos:

Para a construção de cada módulo de 1.750 m³ que integra o conjunto de reatores anaeróbicos foram estimados os custos na tabela 8.2.

Código	Descrição	Total
1	Reator 1750 m ³	
1.1	Escavação	R\$ 7.332,00
1.2	Bota fora raio de 3km	R\$ 9.126,40
1.3	Forma para concretagem	R\$ 197.880,48
1.4	Armação CA50	R\$ 356.262,30
1.5	Concreto Estrutural	R\$ 247.064,00
1.6	Separador de gás	R\$ 144.536,00
1.7	Defletor	R\$ 222.856,00
1.8	Tubos de distribuição PVC 1,5 polegadas	R\$ 16.125,00
1.9	Despesas gerais (10% da obra)	R\$ 120.118,22
		R\$ 1.321.300,40

Tabela 8.2 Plano orçamentário para construção de reator de 1.750 m³.
Fonte: O autor.

As quantidades foram estimadas com base nas dimensões do reator e nas relações típicas utilizadas por empreiteiras que prestam serviços ao segmento. Os custos já contabilizam material e mão de obra para a construção.

$$Relação\ custo\ m^3 = \frac{R\$ 1.321.300,40}{1.750\ m^3} = 755,02\ R\$/m^3 \quad (32)$$

A relação custo por metro cúbico estimada, equação 32, foi de 755,00 R\$/m³. Baréa (2006) aponta que o custo típico para a construção de reatores UASB está na faixa de 200 a 500 Reais o metro cúbico. Extrapolando o custo conforme o Índice Nacional de Custo da Construção do Mercado (INCC) elaborado por Instituto Brasileiro de Economia (2014), tem-se o custo do metro cúbico do reator na faixa de 354,14 a 885,35 Reais. Portanto a estimativa é razoável se considerando a evolução do preço desde 2006 a 2014, alta na construção civil de 77,0 %. As equações 33, 34 e 35 demonstram os cálculos realizados conforme a evolução dos preços do período de 2006 a 2014 divulgado pelo Instituto Brasileiro de Economia (2014).

$$Pr_{2014} = \prod_{i=2007}^{2014} (1 + INCC_i) \cdot Pr_{2006} \quad (33)$$

Onde,

Pr_{2014} = Preço do metro cubico em 2014.

Pr_{2006} = Preço do metro cubico em 2006.

i = Período de tempo, ano.

$INCC_i$ = Índice INCC para o ano i divulgado pela Fundação Getúlio Vargas.

$$Pr_{2014} = (1 + 0,0668) \cdot (1 + 0,0811)(1 + 0,0762)(1 + 0,0769)(1 + 0,0796)(1 + 0,0371)(1 + 0,1201)(1 + 0,0563) \cdot 200,00 = 354,14 \text{ R\$/m}^3 \quad (34)$$

$$Pr_{2014} = (1 + 0,0668) \cdot (1 + 0,0811)(1 + 0,0762)(1 + 0,0769)(1 + 0,0796)(1 + 0,0371)(1 + 0,1201)(1 + 0,0563) \cdot 500,00 = 885,35 \text{ R\$/m}^3 \quad (35)$$

Sistemas de tubulações:

A estimativa de custo da montagem de linhas de tubulações é baseada em obras similares realizadas para a empresa em questão, a tabela 8.3 considera os custos com a montagem mecânica da linha de tubulações, com seus acessórios (válvulas, flanges, curvas e conexões) e os gastos com o sistema de bombeio de efluente do reator, considerando o custo com o Centro de Controle de Motores (CCM).

Código	Descrição	Total	
2	Sistemas de tubulações		
2.1.1	Tubo aço inox 8"	R\$	157.700,00
2.1.2	Tubo aço inox 6"	R\$	59.760,00
2.1.3	Tubo aço inox 4"	R\$	97.416,00
2.1.4	Tubo aço inox 2"	R\$	60.270,00
2.1.5	Válvula gaveta 8"	R\$	16.400,00
2.1.6	Válvula gaveta 4"	R\$	20.800,00
2.1.7	Válvula esfera 6"	R\$	35.000,00
2.1.8	Válvula esfera 2"	R\$	10.000,00
2.1.9	Dormentes	R\$	49.500,00
2.2.1	Praça de bombas e CCM (bomba e exaustor)	R\$	135.000,00
2.2.2	Bomba 300m ³ /h 75 cv.	R\$	60.000,00
2.3	Exaustor Centrifugo 20cv. 15000m ³ /h (motor a prova de explosão)	R\$	29.000,00
2.4	Despesas gerais	R\$	73.084,60
		R\$	803.930,60

Tabela 8.3 Plano orçamentário para montagem de tubulações, válvulas, dormentes e praça de bombas (incluso custos com CCM)

O custo final de R\$ 803.930,60 mostra a importância de se conhecer o projeto a fundo antes de iniciar o plano de investimentos. Custos não planejados podem ocasionar futuros prejuízos. os custos com montagem de linha de tubulações são significativos em empreendimentos grandes e devem fazer parte do estudo de viabilidade.

Sistema de lavagem de gases:

Foi realizada uma cotação com empresa que fornece equipamentos de lavagem de gases e os custos da tabela 8.4 foram determinados.

Código	Descrição	Total	
3.1	Secador de gases 1500 m³/h	R\$	82.608,33
3.2	Torre de adsorção	R\$	17.020,00
3.3	Exaustor e motor trifásico 220V	R\$	8.210,00
3.4	Caixa de comando prova de explosão	R\$	8.042,00
3.5	Eletroduto rígido de aço galvanizado pesado	R\$	1.383,00
3.6	Unidade seladora	R\$	372,00
3.7	Disjuntor motor	R\$	120,00
3.8	Botoeira de emergência	R\$	500,00
3.9	Contator	R\$	160,00
3.10	Instalação elétrica	R\$	2.500,00
3.11	Instalação mecânica	R\$	10.000,00
3.12	Despesas gerais	R\$	13.291,53
		R\$	146.206,86

Tabela 8.4 Plano orçamentário para instalação de 3 secadores de gás e 1 dessulfurizador.

Barracão dos geradores:

O custo de construção do barracão foi estimado segundo o custo unitário básico da construção civil, 577,39 R\$/m² para galpões industriais, segundo Boletim Econômico de janeiro de 2014 publicado pelo Sindicato da Construção de São Paulo (2014). O índice foi publicado em janeiro de 2014 e diz o preço médio praticado pelo mercado para a construção civil de prédios residenciais, comerciais, industriais e de galpões industriais.

Foi também cotada a construção de um piso com 500 mm de espessura para suportar o peso dos geradores. A tabela 8.5 considera a área de construção de 1050,00 m², com o custo unitário de construção e demais estrutura para construção e piso reforçado para suporte dos moto-geradores.

Código	Descrição	Total	
4	Barracão		
4.1	Piso para geradores		
4.1.1	Escavação	R\$	11.232,00
4.1.2	Bota fora raio de 3km	R\$	5.400,80
4.1.3	Armação	R\$	24.435,00
4.1.4	Concreto estrutural	R\$	153.792,00
4.2	Galpão industrial	R\$	605.850,00
		R\$	810.709,80

Tabela 8.5 Plano orçamentário para construção de um barracão com 1050 m² e piso para suporte dos geradores.

Grupo moto geradores e painéis elétricos:

Para estimar os custos com os geradores e com subestação elétrica foram realizadas consultas ao mercado e pesquisa de histórico da usina estudada e de outras usinas pertencentes ao grupo.

Os grupos moto geradores foram cotados de um fornecedor da China e, portanto, é importante calcular os devidos impostos alfandegários e a cotação do dólar americano para calcular o custo real dos motos geradores.

Para consultar os impostos pagos por materiais importados é necessário conhecer a Nomenclatura Comum do Mercosul, ou NCM, típico do material. O que pode ser feito através de consulta a página na web da Receita Federal. O NCM, segundo a Receita Federal (2014), determinado é: 8502.13.19.

O valor individual com frete para o porto de Santos determinado pelo fornecedor é de US\$ 236.810,00, o valor do Dólar no dia da consulta era de R\$ 2,4316 segundo Receita Federal (2014). As figuras 8.2 e 8.3 são imagens retiradas de Receita Federal (2014) que demonstram a tributação de cada grupo moto-gerador importado. Nas imagens são demonstrados todos os tributos implicados na importação do equipamento.

Os custos dos transformadores de força, de corrente e de potencial, disjuntor a vácuo e demais equipamentos de potência foram consultados no mercado.

Os custos com painéis de proteção, sincronismo e excitação e com o painel de controle de exportação de energia foram determinados a partir de projetos de interligação já realizados em outras unidades da empresa onde o estudo foi realizado no ano de 2014.

www4.receita.fazenda.gov.br/simulador/PesquisarNCM.jsp?codigo=8502131&codigoCapitulo=85&codigoPosi

☒ Pesquisa por código ☐ Pesquisa por descrição

Capítulo:	85 - máquinas, aparelhos e materiais elétricos, e suas partes; aparelh
Posição:	8502 - grupos eletrogêneos e conversores rotativos elétricos.
Subposição 1:	85021 - - grupos eletrogêneos de motor de pistão, de ignição por compres
Subposição 2:	850213 - -- de potência superior a 375 kva
Item:	8502131 - de corrente alternada

[85021311 - GR.ELETRO.MOT.DIES/S-DIESEL C.ALT.POT<=430KVA](#)
[85021319 - OUTS.GR.ELETRO.MOT.DIES/S-DIES C.A.POT>375KVA](#)

[Exibir NCMs](#) [Fechar](#)

Figura 8.2 Código NCM para os motos geradores.
Fonte: Receita Federal (2014).

Simulação do Tratamento Tributário e Administrativo das Importações			
Código NCM	8502.13.19		
Descrição NCM	OUTS.GR.ELETRO.MOT.DIES/S-DIES C.A.POT>375KVA		
Taxa de Câmbio do Dia 18/10/2014	R\$ 2,4316		
Valor Aduaneiro Convertido	R\$641.480,40		
Aliquota II (%)	<input type="text" value="14,00"/>	Tributo II	R\$ 89.807,26
Aliquota IPI (%)	<input type="text" value="0,00"/>	Tributo IPI	R\$ 0,00
Aliquota PIS (%)	<input type="text" value="1,65"/>	Tributo PIS	R\$ 10.584,43
Aliquota COFINS (%)	<input type="text" value="8,60"/>	Tributo COFINS	R\$ 55.167,31
As alíquotas podem ser preenchidas manualmente e os tributos recalculados			
			<input type="button" value="Recalcular Tributos"/>

Figura 8.3 Grupo NCM e custo com taxas de importação do grupo moto gerador
Fonte: Receita Federal (2014).

A tabela 8.6 consolida as informações obtidas a partir de projetos de interligação de cogeração com a rede realizados pela empresa estudada e por uma cotação no mercado para determinar o custo com moto-geradores e equipamentos auxiliares (Buchas, para-raios, transformadores).

Código	Descrição	Total
5	Planta de geração.	
5.1	8 conjuntos gerador subestação. ¹	R\$ 8.193.011,36 ¹
5.1.1	Gerador 1000 kVA importado china	R\$ 691.480,40
5.1.2	Cabos	R\$ 600,00
5.1.3	Transformador a seco 1.000 kVA 13,8 / 0,38 kV	R\$ 73.004,00
5.1.4	Disjuntor Vácuo 2000A	R\$ 60.000,00
5.1.5	Painel de Proteção, Sincronismo e Excitação	R\$ 178.000,00
5.1.6	Transformador de corrente 5000A/5	R\$ 3.120,00
5.1.7	Transformado potencial 13.800 V 1000 VA	
5.1.7	220/110 V RT	R\$ 8.652,00
5.1.8	Para-raios	R\$ 995,82
5.1.9	Bucha	R\$ 8.274,60
5.2.1	Painel de controle de exportação de energia	R\$ 112.560,00
5.2.2	Disjuntor Vácuo 2000A	R\$ 60.000,00
5.3	Instalação dos painéis e sistemas auxiliares	R\$ 344.000,00
5.4	Comissionamento	R\$ 52.500,00
5.5	Despesas gerais	R\$ 113.668,68
		R\$ 8.875.743,24

Tabela 8.6 Plano orçamentário para montagem de moto geradores e transformadores e instalação elétrica do conjunto com painéis de proteção, sincronismo e excitação. 1: Somatória dos itens de 5.1.1 a 5.1.9, multiplicado por 8. Itens de 5.1.1 a 5.1.9 referentes à um conjunto gerador e subestação.

Os custos com instalação, comissionamento, painéis de proteção, sincronismo e excitação e do painel de controle de exportação de energia foram obtidos com um histórico de projetos realizados pela empresa estudada.

No trabalho realizado por Vanzin (2006), é demonstrado um estudo do Banco Mundial de 2005 que apresenta uma equação baseada em um banco de dados de projetos realizados em aterros sanitários para utilização do biogás. O estudo apresenta que o custo com a infraestrutura de geração de energia elétrica varia entre 40% e 60%, o restante com captação, coleta e demais componentes. A equação 36 apresenta confiabilidade de 99% para potências instaladas variando entre 1 a 10 MVA.

$$Inv. U. G. (milhõesUS\$) = 0,08032049 + 0,9616. (Pot. MVA) \quad (36)$$

Onde,

Inv.U.G.= Investimento em milhões de dólares.

Pot.MVA = Potência instalada em MVA.

Realizando o cálculo, para a potência instalada de 8MW, tem-se que os custos de investimento com infraestrutura para geração de energia elétrica estão entre 7,69 e 11,95 milhões de reais. As equações 37, 38 e 39 demonstram os cálculos realizados, com o Dólar em R\$ 2,4316 segundo Receita Federal (2014).

$$Inv. U. G. (milhõesR\$) = (0,08032049 + 0,9616 . 8) . 2,4316 = 19,922 MR\$ \quad (37)$$

$$Inv. G. (milhõesR\$)_{40\%} = 19,922 MR\$. 40\% = 7,696 MR\$ \quad (38)$$

$$Inv. G. (milhõesR\$)_{60\%} = 19,922 MR\$. 60\% = 11,954 MR\$ \quad (39)$$

Comparando com o custo de 8,9 milhões de reais, tabela 8.6, estimado para o projeto, pode se dizer que a estimativa realizada é razoável e realista.

Investimento total:

A tabela 8.7 demonstra o total estimado para o custo de investimento do projeto.

Código	Descrição	Qtade	Total
1.0	Reator 1750 m³.	4	R\$ 5.285.201,60
2.0	Sistemas de tubulações.	1	R\$ 810.709,80
3.0	Lavador de gases.	1	R\$ 146.206,86
4.0	Barracão.	1	R\$ 810.709,80
5.1	Grupo gerador com subestação.	8	R\$ 8.193.014,56
5.2	Painel de conexão a rede.	1	R\$ 172.560,00
5.3	Serviços de projeto, instalação e comissionamento.	1	R\$ 510.168,68
			R\$ 15.928.571,30

Tabela 8.7 Investimento para a Usina Termoelétrica a Biogás proposta.

Segundo Braciani (2011), o custo médio de investimento em Usinas Termoelétricas (biomassa ou convencionais) é de 2.147,00 R\$/kW, sendo os valores variam de 1.750,00 R\$/kW (biomassa) a 2.857,00 R\$/kW (carvão).

A equação 40 determina o custo de investimento do projeto proposto em R\$/kW.

$$\text{Custo de Investimento} = \frac{15.928.571,30 \text{ R\$}}{8.000 \text{ kW}} = 1.991,08 \text{ R\$/kW} \quad (40)$$

O custo de instalação calculado é de 1.991,08 R\$/kW, que embora esteja abaixo da média determinada por Braciani (2011) para instalação de Usinas Termoeletricas, este valor de 1.991,08 R\$/kW é razoável e está próximo aos custos de implementação de usinas a biomassa.

8.2.2 Custos com operação e manutenção

Para determinar os custos com operação é preciso separar novamente os itens antes cotados de modo que se determinem os custos com manutenções de equipamentos mecânicos e elétricos que demandam maiores custos com manutenção.

Para a operação do sistema é necessário um operador por turno, três turnos ao todo, para a operação dos reatores, tubulações, bombas e do lavador de gás, ficando com estes operadores a responsabilidade de conferências diárias dos reatores e coleta de amostras para análises, manobras de válvulas no sistema de tubulações e inspeções visuais, conferência e substituição do elemento filtrante do lavador de gases.

Para operação dos grupos geradores e das subestações é necessária a presença de um técnico de eletrotécnica que terá a posição de líder das operações e os demais funcionários devem responder a ele. O técnico deve responder diretamente ao supervisor/engenheiro eletricista da planta.

Custo da mão de obra direta:

Os custos com mão de obra são baseados nos encargos sociais e trabalhistas vigentes no ano de 2014. A tabela 8.8 foi realizada conforme Alves (2013) apresenta em seu livro de contabilidade gerencial.

Custo operação e manutenção

As seguintes premissas foram adotadas para o cálculo dos custos de operação e manutenção de todo o sistema.

- Custos com produtos químicos utilizados para a estabilização dos reatores UASB: 0,05 R\$/m³ de produto tratado. Média dos custos operacionais de reatores UASB com “químicos” apresentados por Sperling (2013);
- Custos de operação e manutenção nos reatores UASB: 0,55 R\$/m³ de produto tratado. Média dos custos operacionais de reatores UASB com “outros” (custos com impermeabilização interna do reator, reparos na estrutura do reator, limpeza anuais e reformas internas no separador trifásico, entre outros) apresentado por Sperling (2013);
- Manutenção nos sistemas de tubulações: 5% do valor das bombas e dos exaustores ao ano;

	R\$	%
Remuneração:		
Salario Mensal	R\$ 7,700,00	
Encargos sociais:		
Previdência Social	R\$ 1.540,00	20,00%
RAT	R\$ 231,00	3,00%
Salario-educação	R\$ 192,50	2,50%
Senai/Senac	R\$ 115,50	1,50%
Sesi/Sesc	R\$ 77,00	1,00%
Adicional para o Incra	R\$ 15,40	0,20%
Sebrae	R\$ 46,20	0,60%
FGTS	R\$ 616,00	8,00%
Totais encargos sociais:	R\$ 2.833,60	36,80%
Encargos trabalhistas:		
Provisão para o 13º salario	R\$ 641,67	
Provisão para férias	R\$ 641,67	
Provisão para 1/3 de férias	R\$ 213,89	
Provisão para encargos sociais 13º salario	R\$ 236,13	
Provisão encargos sociais férias	R\$ 314,84	
Totais encargos trabalhistas:	R\$ 2.048,20	26,60%
Custo total mensal:	R\$ 12.581,80	
Custo total anual:	R\$ 150.981,60	

Tabela 8.8 Custo de mão de obra para operação da UTE - Biogás.

- Lavador de gases: 500 kg de reposição do carvão ativado granular (substituição parcial durante o ano, o carvão pode ser reutilizado após recuperação em vapor) e 5% de manutenção preventiva com o fabricante do secador de ar;
- Custo com operação dos moto geradores (incluso óleo lubrificante, filtro de ar e de óleo, correias, entre outros): 0,025 R\$/kWh produzido. Segundo Neto (2001), o custo de O&M para geração a gás é de 0,007 a 0,015 US\$/kWh;
- Segundo o documento do Brasil, Tribunal de Contas da União (2011) o custo para O&M de subestações é no valor de 2,0% do valor investido;
- Para manutenção predial o custo deve ser de 2,5% do investido em prédios e estruturas.

A tabela 8.9 demonstra os valores estimados para operação e manutenção propostos.

8.2.3 Receitas

Para a definição das receitas brutas obtidas com a comercialização de energia é preciso verificar o Valor de Referência publicado pela ANEEL para o ano de contratação da energia gerada, quando optado por comercializar no mercado regulado.

Para todos os efeitos o ano “0” do projeto é 2015, sendo todos os investimentos centrados neste ano. O início das operações será apenas em 2016, época em que o Valor de Referência, segundo Câmara de Comercialização de Energia (2014), é de 104,04 R\$/MWh.

Portanto admite-se uma produção energética constante anual (para efeitos de cálculo, não há previsões para a variações ao longo do tempo) de aproximadamente 28.682 MWh conforme calculado na equação 26. A equação 41 mostra o cálculo da receita esperada com a venda de energia no mercado regulado, resultando em uma receita de 2.984.075,28 R\$/ano.

$$Receita\ anual\ M.\ Regulado \cong 28.682\ MWh \cdot 104,04 \frac{R\$}{MWh} = 2.984.075,28\ R\$ \quad (41)$$

(-) Despesas O&M	
Salários e ordenados	R\$ 150.981,60
Produtos químicos para o reator	R\$ 37.080,00
Operação e Manutenção Reator	R\$ 407.880,00
Manutenção sistemas de tubulações	R\$ 4.400,00
Carvão ativado lavador de gases	R\$ 7.630,42
Custos com operação e manutenção dos motos geradores	R\$ 717.050,00
Custos com operação e manutenção das subestações	R\$ 53.120,00
Manutenção predial	R\$ 24.880,25
	R\$ 1.403.022,27

Tabela 8.9 Custos e despesas com operação e manutenção fixas e variáveis anual.

8.2.4 Resultado financeiro anual

A tabela 8.10 mostra os resultados no período de um ano segundo as estimativas apresentadas e com as deduções, impostos, contribuições e depreciação já calculados.

Discriminação	
(+) Receitas	
Venda de energia	R\$ 2.984.075,28
(-) Deduções	
ICMS (18%)	R\$ 537.133,55
PIS (0,65%)	R\$ 19.396,49
Confins (3%)	R\$ 89.522,26
(=) Receita Operacional Líquida	R\$ 2.338.022,98
(-) Despesas O&M	
Salários e ordenados	R\$ 150.981,60
Produtos químicos reator	R\$ 37.080,00
Outros Reatores	R\$ 407.880,00
Manutenção sistemas de tubulações	R\$ 4.400,00
Carvão ativado lavador de gases	R\$ 7.630,42
Custos com operação e manutenção dos moto geradores	R\$ 717.050,00
Custos com operação e manutenção das subestações	R\$ 53.120,00
Manutenção predial	R\$ 24.880,25
(=) Lucro Operacional Líquido	R\$ 935.000,71
(-) Depreciação (5% a.a.)	R\$ 789.951,15
(=) Lucro Líquido Antes IP (LAIR)	R\$ 145.049,56
IRPJ (25%)	R\$ 36.262,39
CSLL (8%)	R\$ 11.603,96
(=) Lucro Líquido do Exercício	R\$ 97.183,21
(+) Depreciação (5% a.a.)	R\$ 789.951,15
(=) Dividendo dos acionistas	R\$ 887.134,36

Tabela 8.10 Resultado financeiro do anual. Preço energia: 104,03 R\$/kWh e ICMS: 18%.

8.3 Estudo aplicado

O projeto será analisado referente à receita obtida com a venda de energia no mercado regulado de geração distribuída.

Devido às altas e baixas do mercado de energia, o mercado livre de energia é interessante ao empreendedor, pois, este pode obter receitas superiores ao mercado regulado. Porém, o mercado livre apresenta seus riscos.

Portanto será calculado o ponto de equilíbrio para o preço do MWh para que o projeto seja viável.

8.3.1 Cálculo e análise dos parâmetros de análise de viabilidade

O fluxo de caixa do projeto está detalhado na tabela 8.11. Os resultados econômicos dos períodos são os dividendos calculados no resultado financeiro anual.

j	0	1	2	3	4	5
Ano	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Entradas		R\$ 2.984,08	R\$ 2.984,08	R\$ 2.984,08	R\$ 2.984,08	R\$ 2.984,08
Saídas	R\$ 15.929					
FC	-R\$ 15.929	R\$ 887	R\$ 887	R\$ 887	R\$ 887	R\$ 887
j		6	7	8	9	10
Ano		2021	2022	2023	2024	2025
Entradas		R\$ 2.984,08	R\$ 2.984,08	R\$ 2.984,08	R\$ 2.984,08	R\$ 2.984,08
Saídas						
FC		R\$ 887	R\$ 887	R\$ 887	R\$ 887	R\$ 887
j		11	12	13	14	15
Ano		2026	2027	2028	2029	2030
Entradas		R\$ 2.984,08	R\$ 2.984,08	R\$ 2.984,08	R\$ 2.984,08	R\$ 2.984,08
Saídas						
FC		R\$ 887	R\$ 887	R\$ 887	R\$ 887	R\$ 887
j		16	17	18	19	20
Ano		2031	2032	2033	2034	2035
Entradas		R\$ 2.984,08	R\$ 2.984,08	R\$ 2.984,08	R\$ 2.984,08	R\$ 2.984,08
Saídas						
FC		R\$ 887	R\$ 887	R\$ 887	R\$ 887	R\$ 887

Tabela 8.11 Fluxo de caixa com valores futuros e venda no mercado regulado.

Onde,

Entradas: receitas anuais com a venda de energia;

Saídas: investimento em $t=0$;

FC: Fluxo de caixa do resultado financeiro anual, dividendo do acionista.

Este é o fluxo de caixa futuro, ou seja, os valores para os períodos futuros não estão corrigidos para o valor presente.

Valor Presente Líquido:

Realizando os cálculos para determinar um fluxo de caixa presente segundo uma taxa de atratividade mínima de 10,12%, tem-se uma grande alteração na tabela 8.11 de fluxo de caixa, resultando na tabela 8.12.

j	0	1	2	3	4	5
Ano	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Entradas		R\$ 2.984,08	R\$ 2.984,08	R\$ 2.984,08	R\$ 2.984,08	R\$ 2.984,08
Saídas	R\$ 15.929					
VPFC	-R\$ 15.929	R\$ 806	R\$ 732	R\$ 664	R\$ 603	R\$ 548
j	6	7	8	9	10	
Ano	2021	2022	2023	2024	2025	
Entradas	R\$ 2.984,08	R\$ 2.984,08	R\$ 2.984,08	R\$ 2.984,08	R\$ 2.984,08	
Saídas						
VPFC	R\$ 497	R\$ 452	R\$ 410	R\$ 373	R\$ 338	
j	11	12	13	14	15	
Ano	2026	2027	2028	2029	2030	
Entradas	R\$ 2.984,08	R\$ 2.984,08	R\$ 2.984,08	R\$ 2.984,08	R\$ 2.984,08	
Saídas						
VPFC	R\$ 307	R\$ 279	R\$ 253	R\$ 230	R\$ 209	
j	16	17	18	19	20	
Ano	2031	2032	2033	2034	2035	
Entradas	R\$ 2.984,08	R\$ 2.984,08	R\$ 2.984,08	R\$ 2.984,08	R\$ 2.984,08	
Saídas						
VPFC	R\$ 190	R\$ 172	R\$ 156	R\$ 142	R\$ 129	

Tabela 8.12 Fluxo de caixa com valores presentes e venda no mercado regulado.

Onde,

Entradas: receitas anuais com a venda de energia;

Saídas: investimento em t=0;

VPFC: Valor presente do fluxo de caixa do resultado financeiro anual, dividendo do acionista.

Realizando a somatório do VPL tem-se um valor final igual a: - R\$ 8.437.347,00.

Taxa interna de retorno:

A taxa interna de retorno do projeto é de 1,05%, inferior à taxa de renda fixa.

Ponto de equilíbrio – Break Even:

A fim de igualar o VPL a zero e a TIR aos 10,12% desejados como taxa mínima de atratividade é preciso aumentar as receitas do fluxo de caixa.

Simulando variações no fluxo de caixa montado para o projeto, tem-se um ponto de equilíbrio com o seguinte fluxo de caixa com valores presentes já calculados. As equações 42, 43 e 44 mostram o Fluxo de Caixa necessário para equilibrar o VPL com taxa mínima de retorno de 10,12%.

$$VPL = 0 = \sum_{j=1}^{20} \frac{\text{Fluxo de caixa}}{(1 + 0,1212)^j} - 15.929 \text{ MR\$} \quad (42)$$

$$15,929 \text{ MR\$} = \sum_{j=1}^{20} \frac{\text{Fluxo de caixa}}{(1 + 0,1212)^j} = 8,44 \cdot \text{Receita} \quad (43)$$

$$\text{Fluxo de caixa} = \frac{15,929 \text{ MR\$}}{8,44} = 1.887,40 \text{ MR\$} \quad (44)$$

O fluxo de caixa em tempo “j” igual a zero é de R\$ 1.887.311,60, a tabela 8.13 demonstra o fluxo de caixa com valores presentes para o fluxo de caixa proposto acima.

A receita necessária para a obtenção deste fluxo de caixa é o ponto de equilíbrio do projeto, ou seja, o preço de venda da energia para a quantidade prevista para geração de energia elétrica que irá equilibrar o VPL em zero para a taxa mínima de 10,12% desejada. As equações 45, 46, 47, 48 e 49 calculam o preço do MW.h que irá manter o projeto em ponto de equilíbrio quando optado por venda em mercado livre.

$$PE_{s/duções} = p \cdot q = FC + Desp. + (IR + CSLL) \cdot (p \cdot q - Desp. - Depreciação) \quad (45)$$

$$p \cdot 28.682 = 1887,40 + 1.403,03 + 33 \% \cdot (p \cdot 28.682 - 1.403,03 - 789,96) \quad (46)$$

$$p \cdot 28.682 = 2.556,75 + p \cdot 9.465,06 \quad (47)$$

$$p \cdot 19.216,94 = 679,35 \quad (48)$$

$$p = \frac{2.556,75 \text{ kR\$}}{19.216,94 \text{ MWh}} \cong 133,51 \frac{\text{R\$}}{\text{MWh}} \quad (49)$$

O preço determinado na equação 48 desconsidera as deduções de ICMS, PIS e CONFINS, o valor é aproximado devido a aproximações dos valores das equações. A equação 50 corrige o preço com as deduções de ICMS, PIS e CONFINS.

$$Preço \text{ final mercado livre} = \frac{133,51 \frac{\text{R\$}}{\text{MWh}}}{1 - (0,18 + 0,0065 + 0,03)} = 170,40 \text{ R\$/MWh} \quad (50)$$

O valor da receita para que o VPL seja igual a zero é de R\$ 4.997.467,43, considerando o preço calculado na equação 50 e a quantidade de energia produzida calculada na equação 26. A tabela 8.13 apresenta os valores acima calculados em forma de fluxo de caixa presentes.

j	0	1	2	3	4	5
Ano	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Entradas		R\$ 4.997,47	R\$ 4.997,47	R\$ 4.997,47	R\$ 4.997,47	R\$ 4.997,47
Saídas	R\$ 15.929					
VPFC	-R\$ 15.929	R\$ 1.713	R\$ 1.556	R\$ 1.413	R\$ 1.283	R\$ 1.165
j	6	7	8	9	10	
Ano	2021	2022	2023	2024	2025	
Entradas		R\$ 4.997,47	R\$ 4.997,47	R\$ 4.997,47	R\$ 4.997,47	
Saídas						
VPFC	R\$ 1.058	R\$ 961	R\$ 872	R\$ 792	R\$ 719	
j	11	12	13	14	15	
Ano	2026	2027	2028	2029	2030	
Entradas		R\$ 4.997,47	R\$ 4.997,47	R\$ 4.997,47	R\$ 4.997,47	
Saídas						
VPFC	R\$ 653	R\$ 593	R\$ 539	R\$ 489	R\$ 444	
j	16	17	18	19	20	
Ano	2031	2032	2033	2034	2035	
Entradas		R\$ 4.997,47	R\$ 4.997,47	R\$ 4.997,47	R\$ 4.997,47	
Saídas						
VPFC	R\$ 403	R\$ 366	R\$ 333	R\$ 302	R\$ 274	

Tabela 8.13 Fluxo de caixa com valores presentes e venda no mercado livre.

A tabela 8.14 apresenta o resultado anual calculado com a receita de venda de energia com o preço de venda de energia calculado na equação 50.

Discriminação	
(+)Receitas	
Venda de energia	R\$ 4.887.469,43
(-) Deduções	
ICMS (18%)	R\$ 879.744,50
PIS (0,65%)	R\$ 31.768,55
Confins (3%)	R\$ 146.624,08
(=) Receita Operacional Líquida	R\$ 3.829.332,30
(-) Despesas O&M	
Salários e ordenados	R\$ 150.981,60
Produtos químicos reator	R\$ 37.080,00
Outros Reator	R\$ 407.880,00
Manutenção sistemas de tubulações	R\$ 4.400,00
Carvão ativado lavador de gases	R\$ 7.630,42
Custos com operação e manutenção dos moto geradores	R\$ 717.050,00
Custos com operação e manutenção das subestações	R\$ 53.120,00
Manutenção predial	R\$ 24.880,25
(=) Lucro Operacional Líquido	R\$ 2.426.310,03
(-) Depreciação (5% a.a.)	R\$ 789.951,15
(=) Lucro Líquido Antes IP (LAIR)	R\$ 1.636.358,88
IRPJ (25%)	R\$ 409.089,72
CSLL (8%)	R\$ 130.908,71
(=) Lucro Líquido do Exercício	R\$ 1.096.360,45
(+) Depreciação (5% a.a.)	R\$ 789.951,15
(=) Retorno líquido. Dividendo	R\$ 1.886.311,60

Tabela 8.14 Resultado financeiro do anual. Preço energia: 170,40 R\$/kWh e ICMS: 18%.

8.3.2 Considerações e análise dos parâmetros.

A análise dos dados obtidos pelos parâmetros e metodologias apresentadas anteriormente indicam que o projeto é inviável de ser executado com o preço de energia estabelecido pelo Valor de Referência calculado pela ANEEL. Ou seja, caso o empreendedor escolha vender sua energia no mercado regulado ele não terá o retorno desejado pela taxa mínima de atratividade. Na verdade seu retorno será inferior à taxa de juros paga em fundos de renda fixa como a poupança, por exemplo. O VPL indica que o projeto não é viável com comercialização no mercado regulado.

Para viabilizar o projeto o empreendedor deve procurar o mercado livre a fim de elevar suas receitas e assim garantir um VPL positivo ou igual a zero.

O preço pago no mercado livre é baseado no Preço de Liquidação das Diferenças divulgado mensalmente pela CCEE, que este ano serviu como base para a ANEEL congelar os preços do mercado livre com um teto de 822,83 R\$/MWh. Basicamente o preço da energia no mercado livre varia conforme a procura por energia no mercado. Crises nos regimes de produção de energia hídrica fazem com que as concessionárias e grandes consumidores procurem energia no mercado livre, o que eleva o preço final da energia para os consumidores.

O gráfico 8.1 mostra as variações do PLD nos últimos 5 anos.

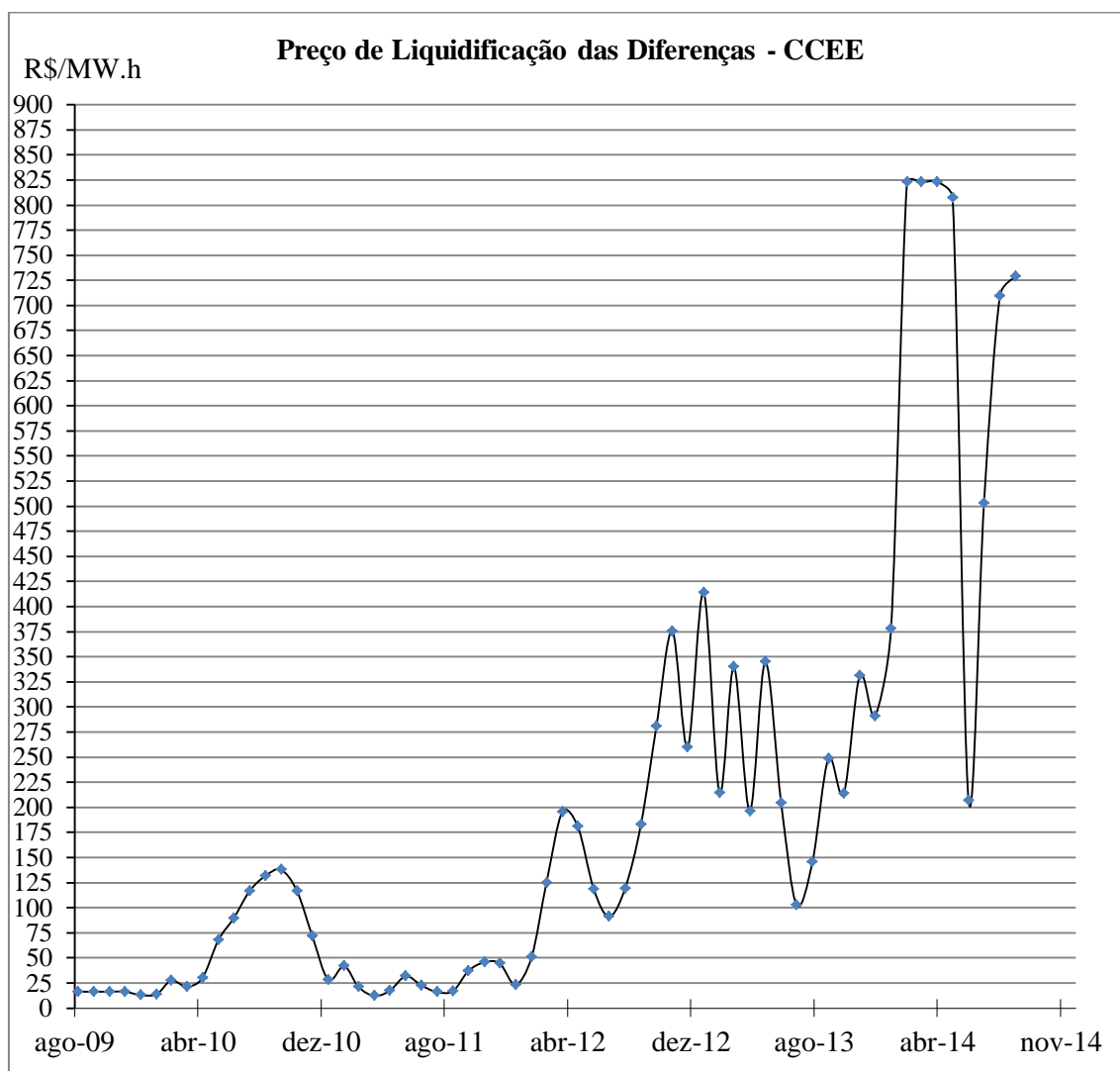


Gráfico 8.1 PLD de Agosto de 2009 a Setembro de 2014 divulgados pela CCEE.
Fonte: Adaptado Câmara de Comercialização de Energia (2014)

O preço mínimo de atratividade calculado para o projeto é de 170,40 R\$/MWh. Analisando o gráfico 9.1 fica evidente que de 2012 para a frente o PLD é muito favorável ao empreendedor e viabiliza o projeto. Em 2014 o PLD não foi inferior a 200,00 R\$/MWh em nenhum momento.

O risco do empreendedor está no histórico do PLD. Antes de abril de 2012 foram poucos os meses em que o PLD foi superior a 100 R\$/MWh. Isso significa que a procura pela geração no mercado livre é baixa e a competição é alta.

8.4 Análise dos resultados financeiros com isenção do ICMS.

Como proposta para incentivo de fontes alternativas de energia renovável sugere-se a redução do Imposto sobre Operações relativas à Circulação de Mercadorias e sobre Prestação de Serviços de Transporte Interestadual e Intermunicipal e de Comunicação.

O ICMS deduz, no estado de São Paulo, a energia elétrica em 18%, o que eleva o preço final da mercadoria e em muitas vezes inviabiliza alguns projetos.

Recalculando os resultados financeiros dos exercícios anuais com a isenção do ICMS na fonte tem-se os resultados para o VPL, TIR e Ponto de Equilíbrio diferentes dos antes analisados. A tabela 8.15 é o resultado anual calculado sem a dedução do ICMS, considerando a venda de energia no mercado regulado com preço de venda de 104,04 R\$/MWh.

Discriminação	
(+) Receitas	
Venda de energia	R\$ 2.984.075,28
(-) Deduções	
ICMS (isenção)	R\$ -
PIS (0,65%)	R\$ 19.396,49
Confins (3%)	R\$ 89.522,26
(=) Receita Operacional Líquida	R\$ 2.875.156,53
(-) Despesas O&M	
Salários e ordenados	R\$ 150.981,60
Produtos químicos reator	R\$ 37.080,00
Outros Reator	R\$ 407.880,00
Manutenção sistemas de tubulações	R\$ 4.400,00
Carvão ativado lavador de gases	R\$ 7.630,42
Custos com operação e manutenção dos moto geradores	R\$ 717.050,00
Custos com operação e manutenção das subestações	R\$ 53.120,00
Manutenção predial	R\$ 24.880,25
(=) Lucro Operacional Líquido	R\$ 1.472.134,26
(-) Depreciação (5% a.a.)	R\$ 789.951,15
(=) Lucro Líquido Antes IP (LAIR)	R\$ 682.183,11
IRPJ (25%)	R\$ 170.545,78
CSLL (8%)	R\$ 54.574,65
(=) Lucro Líquido do Exercício	R\$ 457.062,69
(+) Depreciação (5% a.a.)	R\$ 789.951,15
(=) Retorno líquido. Dividendo	R\$ 1.247.013,84

Tabela 8.15 Resultado financeiro do anual. Preço energia: 104,03 R\$/kWh e ICMS: 0% (Isento).

E, portanto, o Fluxo de Caixa com valores presentes apresentados na tabela 8.16, de acordo com a equação 27 para cálculo do VPL.

j	0	1	2	3	4	5
Ano	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Entradas		R\$ 2.984,08	R\$ 2.984,08	R\$ 2.984,08	R\$ 2.984,08	R\$ 2.984,08
Saídas	R\$ 15.929					
VPFC	-R\$ 15.929	R\$ 1.132	R\$ 1.028	R\$ 934	R\$ 848	R\$ 770
j	6	7	8	9	10	
Ano	2021	2022	2023	2024	2025	
Entradas	R\$ 2.984,08	R\$ 2.984,08	R\$ 2.984,08	R\$ 2.984,08	R\$ 2.984,08	
Saídas						
VPFC	R\$ 699	R\$ 635	R\$ 577	R\$ 524	R\$ 476	
j	11	12	13	14	15	
Ano	2026	2027	2028	2029	2030	
Entradas	R\$ 2.984,08	R\$ 2.984,08	R\$ 2.984,08	R\$ 2.984,08	R\$ 2.984,08	
Saídas						
VPFC	R\$ 432	R\$ 392	R\$ 356	R\$ 323	R\$ 294	
j	16	17	18	19	20	
Ano	2031	2032	2033	2034	2035	
Entradas	R\$ 2.984,08	R\$ 2.984,08	R\$ 2.984,08	R\$ 2.984,08	R\$ 2.984,08	
Saídas						
VPFC	R\$ 267	R\$ 242	R\$ 220	R\$ 200	R\$ 181	

Tabela 8.16 Fluxo de caixa com valores presentes, com venda no mercado regulado e isenção de ICMS.

Nesta simulação o VPL continua negativo e inviabiliza o projeto, VPL: - R\$ 5.398.418,59, porém a TIR passa a ser de 4,71%. A maior mudança é no Ponto de Equilíbrio, a receita necessária para viabilizar o projeto não será mais R\$ 4.997.469,43.

O fluxo de caixa para manter o equilíbrio é o mesmo calculado na equação 44, com o mesmo preço sem deduções calculado na equação 49. Como a isenção é apenas de ICMS, o preço para o ponto de equilíbrio de energia elétrica vendida no mercado livre com isenção de ICMS é calculado na equação 51.

$$\text{Preço } f.m. \text{ livre e isenção ICMS} = \frac{133,51 \frac{\text{R\$}}{\text{MW.H}}}{1 - (0,0065 + 0,03)} = 138,57 \text{ R\$/MWh} \quad (51)$$

Com a isenção do ICMS a receita anual com venda de energia deverá ser de R\$ 3.965.022,30, e o preço para o Ponto de Equilíbrio será de 138,57 R\$/MWh.

O resultado financeiro do exercício anual é apresentado na tabela 8.17.

Em comparação o preço do Ponto de Equilíbrio para a simulação com isenção de ICMS em relação ao preço do Ponto de Equilíbrio em simulação com ICMS, o primeiro é 18,68% inferior ao segundo. Ou seja, a redução na tarifa da energia será superior a redução na dedução do ICMS.

Discriminação	
(+) Receitas	
Venda de energia	R\$ 3.974.397,82
(-) Deduções	
ICMS (isenção)	R\$ -
PIS (0,65%)	R\$ 25.833,59
Confins (3%)	R\$ 119.231,93
(=) Receita Operacional Líquida	R\$ 3.829.332,30
(-) Despesas O&M	
Salários e ordenados	R\$ 150.981,60
Produtos químicos reator	R\$ 37.080,00
Outros Reator	R\$ 407.880,00
Manutenção sistemas de tubulações	R\$ 4.400,00
Carvão ativado lavador de gases	R\$ 7.630,42
Custos com operação e manutenção dos moto geradores	R\$ 717.050,00
Custos com operação e manutenção das subestações	R\$ 53.120,00
Manutenção predial	R\$ 24.880,25
(=) Lucro Operacional Líquida	R\$ 2.426.310,03
(-) Depreciação (5% a.a.)	R\$ 789.951,15
(=) Lucro Líquido Antes IP (LAIR)	R\$ 1.636.358,88
IRPJ (25%)	R\$ 409.089,72
CSLL (8%)	R\$ 130.908,71
(=) Lucro Líquido do Exercício	R\$ 1.096.360,45
(+) Depreciação (5% a.a.)	R\$ 789.951,15
(=) Retorno Líquido. Dividendo	R\$ 1.886.311,60

Tabela 8.17 Resultado financeiro do anual. Preço energia: 138,57 R\$/kWh e ICMS: 0%(Isento).

9 – Conclusões

O ano de 2014 foi um ano emblemático para o mercado de energia elétrica. Neste ano de crise hídrica no Brasil o preço da energia disparou e causaram sérios prejuízos às distribuidoras.

As lições aprendidas em eventos esporádicos como este são de que investir em geração de energia elétrica vai além das Usinas Hidrelétricas, há de se investir e de incentivar fontes de geração alternativas, limpas e distribuídas.

Outro setor que em 2014 vem apresentando péssima atuação é o Setor Sucroenergético. Após alguns anos de pleno crescimento na primeira década do século XXI o setor declinou e o nível de endividamento aumentou. Com isso o fôlego para investimentos diminuiu e expeliu os investidores do mercado. Segundo reportagem de Borba et al (2014) para a portal G1, da Globo.com, o setor de açúcar e etanol já perdeu 60 mil empregos nos últimos dois anos.

A busca incessante por fontes alternativas e limpas é, talvez, a maior singularidade deste início de século XXI. A constante evolução mundial na geração de energia eólica, a biomassa, solar e tantas outras são evidências da crescente preocupação com o meio ambiente, com a saúde humana e pela sustentabilidade e mostram que os métodos tradicionais e poluentes serão tolerados cada vez menos ao passar dos anos.

Em detrimento dos cenários energético, econômico, social e ambiental onde a geração de energia elétrica a partir do biogás gerado pela vinhaça está inserida a colocam em certa evidência, e levantam inúmeras questões. Qual o real poder de produção de biogás? Existe tecnologia disponível para sua produção no Brasil, e no Mundo? A quantidade de energia disponível é capaz de me trazer retorno econômico, qual o impacto na sociedade em um projeto deste tipo?

A um enorme potencial de produção de biogás na vinhaça, e um enorme contingente produzido anualmente é visto como resíduo sendo, de certa forma, desperdiçado. O tratamento da vinhaça em reatores UASB reduz o potencial poluente da vinhaça e melhora suas características nutritivas ao cultivo da cana de açúcar.

O biogás canalizado é filtrado e os sulfetos de hidrogênio, que combinados com água produzem ácidos, são reduzidos a baixíssimos níveis. O metano ao ser queimado nos motores e turbinas das usinas se transforma em dióxido de carbono, um gás com menor impacto ao efeito estufa. O carbono liberado na queima do combustível retorna ao ciclo da cana de açúcar.

O mercado de energia carece de fontes de energia alternativas que operem em ciclo complementar ao das usinas hidrelétricas. Nos períodos de seca no sudeste, o Operador Nacional do Sistema é obrigado a acionar as usinas termoeletricas convencionais que além de serem altamente poluentes são caras. O biogás é uma fonte de energia confiável com poder energético considerável que pode substituir parte da geração de energia das térmicas convencionais.

A presença de tecnologia no mercado brasileiro permite uma rápida evolução na curva de experiência de projetos similares ao proposto, evolução esta que apenas trará benefícios e aumento da competitividade da fonte energética.

Hoje a construção de reatores UASB é comum em Estações de Tratamento de Esgotos, e embora a tecnologia não seja muito conhecida para o tratamento da vinhaça não serão necessárias muitas modificações e alterações para adaptação dos mesmos a operarem com a vinhaça com altíssima eficiência.

Único entrave do mercado Brasileiro é a falta de competidores nacionais na produção de motores a combustão interna para o Biogás. Há fornecedores instalados no Brasil que fornecem produtos importados e que são de altíssima qualidade, há também os produtos Chineses que são de boa qualidade e de preços muito inferiores.

O mercado no Brasil para estes itens ainda é restrito devido à falta de investimentos na área, porém com o avanço no uso do biogás em aterros sanitários e em Estações de Tratamento de Esgotos estas tecnologias possuíram um espaço maior no mercado e seus custos diminuíram.

As análises econômicas de viabilidade mostram que a dificuldade da execução destes projetos estão no preço máximo pago à geração distribuída. O Valor de Referência adotado pela ANEEL, que é calculado em referência aos leilões de energia de 5 anos anteriores ao ano base, é muito baixo para projetos de energia alternativas. O indicador VL (Valor de Referência) sofre grande influência do preço da energia hídrica, que é extremamente baixa, e isso inviabiliza muitos projetos de geração distribuída.

Toda análise financeira apresenta uma gama enorme de erros, primeiro devido ao fato de o planejador ter que determinar o futuro do empreendimento onde as incertezas são altíssimas quando se tratando de projetos inovadores e sem documentos e materiais técnicos disponíveis na literatura. Segundo porque as variáveis econômicas e técnicas às quais projetos deste tipo estão inseridas são extremamente voláteis e ainda há muita atuação política no meio.

Embora todos estes fatos mencionados acima, o estudo de viabilidade realizado é bem evidente ao mostrar que para comercialização em mercado regulado é fator que inviabiliza projetos similares. O Valor Presente Líquido é muito abaixo de zero o que indica que, mesmo que o processo orçamentário não seja o mais exato o possível, o projeto é inviável financeiramente.

Para tanto há o mercado livre de energia, mercado este que este ano teve teto no preço da energia acima de 800 R\$/MWh. O valor mínimo calculado neste trabalho para venda de energia no mercado livre (há de se considerar a média anual dos preços) é acima de 170,40 R\$/MWh, valor este quase 50% superior ao Valor de Referência divulgado pela ANEEL para o ano de 2016.

Visualizando os últimos dois anos do mercado livre pode se inferir que o projeto é viável com a comercialização de energia no mercado livre, porém ao visualizar os últimos 5 anos o investimento já não é assim tão certo.

A presença constante de ações do governo sobre o mercado de energia afeta fortemente o preço do mercado livre e pode afastar certos investidores. Para o setor sucroenergético que já recebe forte intervenção do governo, com o congelamento dos preços dos combustíveis fósseis, é um risco alto entrar em outro mercado com a forte presença do governo.

Grande parte dos integrantes do setor sucroenergético esta com um alto índice de endividamento, e assim com dificuldades de se capitalizar para investir. A associação do fator endividamento com o fator intervenção do governo reduzem a atratividade ao projeto por parte do setor sucroenergético.

Porém, com o avanço de grandes empresas que investem em tecnologia e em eficiência em suas unidades de açúcar e álcool ainda há possibilidades de termos esta nova revolução energética da cana de açúcar e aumentar ainda mais o balanço energético desta planta.

Por fim, como proposta para aumentar a viabilidade, o retorno social e o número de projetos desenvolvidos dos empreendimentos para o uso do biogás para geração de energia elétrica, independente de sua fonte de origem (tratamento de esgoto, aterros sanitários, resíduos de abatedouros, vinhaça, entre tantos outros), seria a isenção das deduções do ICMS tributado sobre os produtores de energia elétrica.

As análises realizadas indicam que os ganhos com a isenção do ICMS são favoráveis aos consumidores da região onde a geração distribuída esta inserida, uma vez que o ICMS é retido na cidade onde a geração é feita e os consumidores de geração distribuída estão normalmente localizados próximos às fontes.

A redução no preço da energia elétrica com a isenção do ICMS é de 18,7% enquanto o ICMS recolhe 18,0% para o município. Portanto a redução do ICMS para estas fontes aumenta a viabilidade da mesma e ajudam a reduzir a tarifa paga pelo consumidor pela energia elétrica.

Referências Bibliográficas

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Enquadramento de centrais geradoras termelétricas na modalidade de geração distribuída*. Decreto nº5.163. 2004.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Nota Técnica nº 010/2012-SEM/ANEEL. Publicação do Valor Anual de Referencia – VR para os anos de 2013 e 2014*. 2012.

ALVES, J. W. S. *Diagnóstico técnico institucional da recuperação e uso energético do biogás gerado pela digestão anaeróbica de resíduos*. Dissertação (Mestrado). São Paulo. Universidade de São Paulo. 2000.

ALVES, R. V. *Contabilidade Gerencial: Livro com exemplos, estudos de casos e atividades praticas*. São Paulo: Atlas. 2013.

ANDRADE, J. M. F. A. *Construção de um Índice de Sustentabilidade Ambiental para a Agroindústria Paulista da Cana de Açúcar (ISAAC)*. Dissertação (Mestrado). São Paulo. Fundação Getúlio Vargas. 2009.

BARÉA, L. C. RALF, *Reator Anaeróbio de Manta de Lodo e Fluxo Ascendente reduzindo custos e economizando energia no Tratamento de Esgotos*. Apresentação. Curitiba. 2006.

BORBA, J. C., GOMES, C., REZENDE, F. *Setor sucroalcooleiro enfrenta uma das maiores crises da história: Nos últimos dois anos, setor de açúcar e etanol perdeu 60 mil empregos. Acompanhe a situação no interior de São Paulo, Pernambuco e Minas*. Jornal da Globo. Disponível em: < <http://g1.globo.com/jornal-da-globo/noticia/2014/07/setor-sucroalcooleiro-enfrenta-uma-das-maiores-criises-da-historia.html>>. Acesso em 19 de outubro de 2014.

BRACIANI, U. *Estrutura de Custos para Implantação das Usinas de Geração de Energia Elétrica no Brasil*. Monografia conclusão de curso. Florianópolis. Universidade Federal de Santa Catarina. 2011.

BRASIL. *Decreto Nº 5.163 de 30 de Julho de 2004. Regulamenta a comercialização de energia elétrica, o processo de outorga de concessões e de autorizações de geração de energia elétrica, e dá outras providências*. 2004.

BRASIL. Tribunal de Contas da União. *Acompanhamento. Leilão de transmissão de energia. Aprova o 1º estágio com ressalva. Recomendação. Restituição dos autos à unidade técnica para prosseguimento do acompanhamento.* Acompanhamento TC 014.595/2011-7. Nelson José Hubner Moreira e Agência Nacional de Energia Elétrica. Relator: Ministro Raimundo Carreiro. Or, 27 de jul. 2011.

CAMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. *Preço médio da CCEE.* Disponível em: <http://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/o-que-fazemos/como_ccee_atua/precos/precos_medios?_adf.ctrl-state=m8k1ytzn7_84&_afLoop=845625758874849#%40%3F_afLoop%3D845625758874849%26_adf.ctrl-state%3Dztg8476jf_4>. Acesso em 19 de outubro de 2014.

CHERNICHARO, C. A. L. *Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. Vol. 5 Ed. 10.* Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais. 1997.

CHERNICHARO, C. A. L. *Reatores anaeróbicos.* Belo Horizonte. 1997.

CHERNICHARO, C. A. L.; *Reatores Anaeróbios: princípio de tratamento de águas residuárias*, v. 5. Belo Horizonte. Universidade Federal de Minas Gerais. 2007.

COELHO, S. *Mercado Brasileiro de Biomassa.* São Paulo. Seminário Energias Renováveis Brasil-Alemanha: Aplicação de Tecnologias para o Uso Energético da Biomassa e Biogás. Centro Nacional de Referencia em Biomassa. 2012.

COMASTRI, J. A. *Biogás. Independência Energética do Pantanal Mato-Grossense.* Corumbá. Embrapa. 1981.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. *Biogás: Pesquisas e Projetos no Brasil.* CETESB, Secretaria do Meio Ambiente. São Paulo. 2006.

CORAZZA, R. I. *Impactos Ambientais da Vinhaça: Controvérsias Científicas e Lock-In na Fertilirrigação?* Congresso da Sociedade Brasileira de Economia e Sociologia Rural. 2006.

COSTA, D. F. *Geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento de esgoto.* Dissertação (Mestrado). São Paulo. Programa Interunidades de Pós Graduação em Energia. Universidade de São Paulo. 2006.

CRUZ, L. F. L. S. *Viabilidade técnica/econômica/ambiental das atuais formas de aproveitamento da vinhaça para o Setor Sucroenergético do Estado de São Paulo*. Dissertação (Mestrado). São Carlos. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. 2011.

ECONOINFO. *Cotação, Volume, Negócios, Beta e Medidas de Risco*. Disponível em: <http://www.econoinfo.com.br> . Acesso em 12 de outubro de 2014.

FRANÇA JUNIOR, A. T. *Análise do aproveitamento energético do biogás produzido numa estação de tratamento de esgoto*. Dissertação (Mestrado). Ilha Solteira. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Universidade Estadual Paulista. 2008.

GASPAR, R. M. B. L. *Utilização de biodigestores em pequenas e médias propriedades rurais, com ênfase na agregação de valor: um estudo de caso na região de Toledo – PR*. Dissertação (Mestrado). Florianópolis. Universidade Federal de Santa Catarina. 2003.

INSTITUTO BRASILEIRO DE ECONOMIA. *Indicie Nacional de Custo da Construção – INCC*. Disponível em: <<http://portalibre.fgv.br>>. Fundação Getúlio Vargas. Acesso em 17 de outubro de 2014.

INSTITUTO NACIONAL DE EFICIENCIA ENERGETICA. *Sobre Geração Distribuída e Cogeração*. Disponível em: http://www.inee.org.br/forum_sobre_gd_cg.asp?Cat=gd. Acesso em 29 de outubro de 2014.

LEMA, J.M.; MENDEZ, R., SOTO, M. *Tratamento de anaeróbios para o tratamento de efluentes líquidos*. Recife. 1997.

LETTINGA, G.; RINZEMA, A. *Anaerobic treatment of sulfate containing wastewater*. Bioenvironmental System. 1985.

MINISTÉRIO DA NUTRIÇÃO, AGRICULTURA E DEFESA DO CONSUMIDOR DA ALEMANHA (BMELV). *Guia Prático do Biogás*. Gülzow. 2010.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. *Instituto do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Relatório. Acidentes Ambientais 2006 e 2007*. 2008.

MONTEIRO, R. C. M. *Viabilidade técnica do emprego de sistemas tipo “wetlands” para tratamento de água cinza visando o reuso não potável*. Dissertação (Mestrado). São Paulo. Universidade de São Paulo. 2009.

MUSSATI, M, AGUIRRE P., SCENNA, N. *Modeling of real biological reactors for the treatment of complex substrates. dynamic simulation*. 1998.

NETO, V. C. *Análise de viabilidade da cogeração de energia elétrica em ciclo combinado com gaseificação de biomassa de cana-de-açúcar e gás natural*. Dissertação (Mestrado). Rio de Janeiro. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2001.

ODDONE, D. C. *Cogeração: Uma alternativa para produção de eletricidade*. Dissertação (Mestrado). São Paulo. Universidade de São Paulo. 2001.

OKAMURA, L. A. *Avaliação e melhoria do poder calorífico de biogás proveniente de resíduos sólidos urbanos*. Dissertação (Mestrado). Curitiba. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2013.

OLIVEIRA , R. D. *Geração de energia elétrica a partir do biogás produzido pela fermentação anaeróbica de dejetos em abatedouros e as possibilidades no mercado de carbono*. Trabalho de conclusão de curso (engenharia elétrica). São Carlos. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. 2009.

PAULA, C. P. *Geração Distribuída e Cogeração no Setor Elétrico: Avaliação Sistêmica de um Plano de Inserção Incentivada*. Tese (Doutorado). São Paulo. Universidade de São Paulo. 2004.

PINTO, C. P. *Tecnologia da Digestão Anaeróbica da Vinhaça e Desenvolvimento Sustentável*. Dissertação (Mestrado). Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade de Campinas. 2009.

RECEITA FEDERAL. *Simulador do Tratamento Tributário e Administrativo das Importações*. Disponível em <http://www4.receita.fazenda.gov.br/simulador/BuscaNCM.jsp>. Ministério da Fazenda. Acesso em 18 de outubro de 2014.

ROMAGNOLI, H. C. *Identificação de barreiras à geração distribuída no marco regulatório atual do setor elétrico Brasileiro*. Dissertação (Mestrado). Florianópolis. Universidade Federal de Santa Catarina. 2005.

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

SEADI, T. A.; RUTZ, D.; PRASSI, H.; KÖTTNER, N.; FINSTERWALDER, T. VOLK, S.; JANSSEN, R. *Biogas Handbook*. Esbjerg, Dn. 2009.

SPERLING, M. V. *Tecnologias de Tratamento de Esgotos*. IV Seminário Internacional de Engenharia de Saúde Pública. Belo Horizonte. Universidade Federal de Minas Gerais. 2013.

TAHAN, C. M. V. *Impactos Ambientais e Sociais do Tratamento e Disposição de Resíduos Sólidos Urbanos*. Centro Nacional de Referência em Biomassa. Universidade de São Paulo. 2013.

VANZIN, E. *Procedimento para análise da viabilidade econômica do uso do biogás de aterros sanitários para geração de energia elétrica: Aplicação no aterro Santa Tecla*. Dissertação (Mestrado). Passo Fundo. Faculdade de Engenharia e Arquitetura. Universidade de Passo Fundo. 2006.

VALOR¹. *Bolsas*. Disponível em <http://www.valor.com.br/valor-data/bolsas/nacionais>. Acesso em 12 de outubro de 2014.

VALOR². *Indicadores de mercado*. Disponível em <http://www.valor.com.br/valor-data/indices-financeiros/indicadores-de-mercado>. Acesso em 12 de outubro de 2014.

VANZIN, E.; PANDOLFO, A.; BRANDLI, L., GHENO, R. KUREK, J. *Análise da viabilidade econômica do uso do biogás de aterros sanitários para geração de energia elétrica: aplicação no aterro metropolitano Santa Tecla*. XXVI ENEGEP. Fortaleza. 2006.

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

VISSER, A. *The anaerobic treatment of sulfate containing wastewater*. Thesis (Doctoral). Wageningen. Wageningen Agricultural University. 1995.