unesp UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

IDELSON WADT SOARES SANTOS

Viabilidade técnica e econômica do aproveitamento da vinhaça de usinas de álcool para a produção de energia

Guaratinguetá - SP
2020

Idelson Wadt Soares Santos

Viabilidade técnica e econômica do aproveitamento da vinhaça de usinas de álcool para a produção de energia

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de Transmissão e Conversão de Energia

Orientador: Prof. Dr. Pedro Magalhães Sobrinho
Co-Orientador: Prof. Dr. José Luz Silveira

Guaratinguetá - SP
2020

Santos, Idelson Wadt Soares
S237v Viabilidade técnica e econômica do aproveitamento da vinhaça de usinas de álcool para a produção de energia / Idelson Wadt Soares Santos – Guaratinguetá, 2019.
88 f : il.
Bibliografia: f. 64-88

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2019.
Orientador: Prof. Dr. Pedro Magalhães Sobrinho
Coorientador: Prof. Dr. José Luz da Silveira

1. Energia - Fontes alternativas. 2. Biocombustíveis. 3. Etanol. 4. Vinhaça. I. Título.

CDU 620.91(043)

Pâmella Benevides Gonçalves
Bibliotecária/CRB-8 9203

unesp

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

IDELSON WADT SOARES SANTOS

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
"MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA"

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: ENERGIA

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

Profª. Drª. Ivonete Ávila
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. PEDRO MAGALHÃES SOBRINHO
Orientador / UNESP-FEG

Profª. Drª. ELIANA VIEIRA CANETTIERI
UNESP-FEG

Prof. Dr. JOSÉ RUI CAMARGO
UNITAU

Janeiro de 2020

DADOS CURRICULARES

IDELSON WADT SOARES SANTOS

NASCIMENTO	29.11.1970 – PIRASSUNUNGA / SP
FILIAÇÃO	Idelson Santos Lindamir Wadt Soares Santos
1993 / 1998	Curso de Graduação Engenharia Mecânica Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.
2004	Curso de Pós-Graduação Latu Sensu, nível de Mestrado Profissional, em MBA – Gestão da Produção Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.
2018 / 2020	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Mestrado Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.

À minha melhor amiga,
incentivadora em meus enfrentamentos,
indutora de minhas alegrias e
companheira em nossa evolução;
minha amada esposa Adriana.

AGRADECIMENTOS

"Deus escreve certo por linhas tortas". Isso, porque nos desviamos do caminho. Porém, é só nos sintonizarmos novamente com *Ele*, que nossa vida retorna aos trilhos. Por isso o maior agradecimento vai para *Ele*, pelo equilíbrio proporcionado para superar meus desafios.

Agradeço a minha esposa, por me incentivar e me apoiar incondicionalmente nos meus projetos.

ao meu orientador *Prof. Dr. Pedro Magalhães Sobrinho* e co-orientador *Prof. Dr. José Luz Silveira*, que sempre me incentivou, desde a graduação.

à toda equipe da Seção Técnica de Pós-graduação, que ao longo dos anos vêm aprimorando seus métodos de assistência com muito profissionalismo: *Renata Pereira da Rocha Barbosa, Maria Cristina Silva de Oliva, Rodrigo José Nunes e Sidney Eustáquio Ramos Rabelo.*

às funcionárias da biblioteca do campus, *Ana Cristina Figueiredo Loureiro, Pâmella Benevides Gonçalves e Juciene Pereira de Souza Pedroso*; que não mediram esforços ao orientar quanto à correta apresentação da versão final do trabalho no rigor da norma.

e à todos que, desde o menor gesto, contribuíram na minha jornada para a elaboração deste trabalho. Meus companheiros e amigos de laboratório: *Christian Lao, Rodrigo Orefise Dentello, Victor Arruda Ferraz de Campos, Lucas de Almeida Resende, Raul Pereira Micena, Omar Rosendo Llerena Pizarro* e *Regina Paulino.*

“Nada é suficientemente bom. Então vamos fazer o que é certo, dedicar o melhor de nossos esforços para atingir o inatingível, desenvolver ao máximo os dons que Deus nos concedeu, e nunca parar de aprender.”

Ludwig van Beethoven

RESUMO

Com o progressivo aumento na demanda de energia, cresce a produção do etanol combustível e a preocupação com a destinação mais racional do seu resíduo - a vinhaça. Composta por alta carga orgânica, a vinhaça tem grande potencial poluidor, desde sua armazenagem, transporte, até sua destinação final, como na prática tradicional de fertirrigação in-natura da lavoura de cana-de-açúcar. O seu uso indiscriminado, traz grande impacto ambiental ao liberar para a atmosfera os gases de efeito estufa (CO_2 e CH_4) e contaminar o solo, lençol freático e cursos d'água. Para atender às normas ambientais e visões de sustentabilidade, várias alternativas tecnológicas têm sido estudadas e desenvolvidas para neutralizar os efeitos nocivos da vinhaça; elevando o status da vinhaça de resíduo industrial para subproduto industrial. A vinhaça passa a ser considerada como biomassa a ser convertida em outras fontes mais limpas de energia. Usinas de cana-de-açúcar já possuem experiência no uso de biodigestores e desenvolvem projetos para intensificar a conversão de vinhaça em biogás, com a vantagem do resíduo final do processo resultar em biofertilizante de alta qualidade. Para estas usinas, o presente trabalho apresenta a viabilidade técnica e econômica na conversão de 100% da vinhaça gerada, em biogás a ser convertida em potência elétrica por motores de combustão interna (MCI), com resultado favorável para o investimento e venda da energia produzida para a rede de distribuição.

PALAVRAS-CHAVE: Vinhaça. Etanol. Biodigestores. Biogás. Biocombustíveis. Bioenergia.

ABSTRACT

With the progressive increase of the demand in energy, the production of fuel ethanol grows and so does the concern with one more rational destination of its residue - the vinasse. Composed of high organic load, vinasse has a huge polluting potential, from its storage, transportation, to its final destination, as the traditional practice of its fertigation in the sugarcane crop. Its indiscriminate usage brings a big environmental impact by releasing the greenhouse gases (CO_2 and CH_4) into the atmosphere and contaminating the soil, water table and watercourses. To comply with the environmental standards and the sustainability visions, many technological alternatives have been studied and developed, elevating it's status from industrial residue to industrial by-product. Vinasse become to be considered as biomass to be converted into other cleaner sources of energy. Sugarcane mills already have experience in biodigestion process and they have been developing projects to intensify the conversion of their vinasse into biogas. Thereby, there is a big advantage, the final process residue results in high quality biofertilizer. For these sugarcane mills, the present work presents the technical and economical feasibility in converting 100% of the generated vinasse into biogas to be converted into electric power by internal combustion engines (IC Engine), with enabling result to investing and energy solding to the distribution network.

KEYWORDS: Vinasse. Ethanol. Biodigesters. Biogas. Biofuels. Bioenergy.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Evolução da produção de etanol no Brasil por safra (Mil m^3) 20
Figura 2 – Processos envolvidos na produção de açúcar e álcool 21
Figura 3 – Tanque de armazenamento de vinhaça 24
Figura 4 – Canal e fertirrigação da vinhaça 25
Figura 5 – Oferta mundial de energia primária em 2016 29
Quadro 1 – Classificação dos biocombustíveis 30
Figura 6 – Processo de conversão energética de biomassa 33
Figura 7 – Produção de biogás a partir atividade de bactérias anaeróbias 35
Figura 8 – Esquema de concepção de biodigestores Modelo Indiano (A) e Modelo Chinês (B) 38
Figura 9 – Diagrama simplificado de um biodigestor do tipo canadense 39
Figura 10 – Biodigestor Modelo Batelada 40
Quadro 2 – Classificação de biodigestores 41
Figura 11 – Digestores anaeróbios de lodo 43
Figura 12 – Tanque Séptico 44
Figura 13 – Lagoa Anaeróbia 45
Figura 14 – Filtro Biológico de fluxo ascendente 46
Figura 15 – Biodisco Anaeróbio 47
Figura 16 – Reator Anaeróbio de Leito Expandido e Fluidizado 47
Figura 17 – Reator Anaeróbio de Dois Estágios 48
Figura 18 – Reator Anaeróbio de Chicanas 49
Figura 19 – Reator de Manta de Lodo (UASB) 50
Figura 20 – Reator Anaeróbio de Leito Granular Expandido 51
Figura 21 – Reator Anaeróbio de Circulação Interna 52
Figura 22 – Uso do biogás nos maiores mercados mundiais – 2013 (TWh/ano) 58
Figura 23 – Taxa média anual de crescimento da oferta de energia e fontes renováveis – 1990-2015 (%) 59
Figura 24 – Produção média de biogás por aplicação – 2015 (mil Nm^3/dia) 60
Figura 25 – Produção de biogás por substrato – 2015 (Nm^3/dia) 61
Figura 26 – Usina São Martinho 61

Figura 27 – Percentual de cana convertida em açúcar e etanol por safra (%) 67
Figura 28 – Rendimento de motores – Potência produzida (kWe) X Consumo de combustível (kg/s) 75
Figura 29 – Curvas de custos de biogás à taxa de juros anual de 12% em 3 regimes de operação (6000 ha, 7000 ha e 8000 ha) em R$/kWh..... 77
Figura 30 – Curvas de custos da energia elétrica gerada à taxa de juros anual de 12% em 3 regimes de operação (6000 ha, 7000 ha e 8000 ha) em grupos geradores por motor de combustão interna em R$/kWh..... 78
Figura 31 – Receita anual esperada pela venda da energia elétrica gerada em R$ 78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Proporção de vinhaça produzida em relação ao etanol em volume 22
Tabela 2 – Composição físico-química da vinhaça conforme o tipo de mosto 32
Tabela 3 – Rendimento de reatores de *Alta Taxa* aplicados no tratamento da vinhaça 55
Tabela 4 – Composição do biogás em geral 56
Tabela 5 – Usinas do Grupo São Martinho 63
Tabela 6 – Resultados do Grupo São Martinho nas últimas safras 64
Tabela 7 – Características físico-químicas da vinhaça da usina São Martinho 65
Tabela 8 – Valor médio de venda de energia elétrica da São Martinho para o G*rid* por safra (R$/MWh) 72
Tabela 9 – Volumes de vinhaça, biodigestores e biogás calculados 74
Tabela 10 – Motores analisados para seleção 75
Tabela 11 – Parâmetros para cálculo de análise econômica 76

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABiogás	Associação Brasileira de Biogás e Biometano
AFBR	Anaerobic Fluidized-bed Reactor
APBR	Anaerobic Packed-bed Reactor
BCIJ	Banco de Cooperação Internacional do Japão
BG	Biogás
BNDE	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CEA	Centro de Educação Ambiental
CEF	Caixa Econômica Federal
CEMBIO	Centro Nacional de Referência em Biomassa
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
CETESB	Companhia Ambiental Paulista
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
COV	Carga Orgânica Volumétrica (kg DQO/m^3 dia)
COVa	Carga Orgânica Volumétrica aplicada (kg DQO/m^3 dia)
DAFA	Digestor Anaeróbio de Fluxo Ascendente
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
FINEP	Financiadora de Estudos e Projetos
GEE	Gases de Efeito Estufa
GN	Gás Natura
IBRASA	Investimentos Brasileiros S.A.
IC	Internal Circulation
IEA	International Energy Agency
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo
K	Potássio
MCI	Motores de Combustão Interna
N	Nitrogênio

ORPLANA	Organização de Plantadores de Cana da Região Centro-Sul do Brasil
P	Fósforo
Proálcool	Programa Nacional do Álcool
PROSAB	Programa de Pesquisa em Saneamento Básico
RAFA	Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SV	Sólidos Voláteis
TA	Taxa de Aplicação (kgDQO/m^3 dia)
tep	Toneladas Equivalentes de Petróleo
TDH	Tempo de Detenção Hidráulica (horas ou dias)
TRC	Tempo de Retenção Celular (horas ou dias)
UASB	Upflow Anaerobic Sludge Blanket
ÚNICA	União da Agroindústria Canavieira do Estado de São Paulo

LISTA DE SÍMBOLOS

CPE	capacidade de produção de etanol (m^3)
CPEe	capacidade de produção de etanol sob processo de destilação de etanol (m^3)
CPEa	capacidade de produção de etanol sob processo de refino de açúcar (m^3)
IMmax	índice de mix máximo de produção (%)
IMmin	índice de mix mínimo de produção (%)
CM	capacidade de moagem de cana (ton)
REe	relação de produção de etanol por cana processada sob processo de destilação de etanol (m^3/ton)
REa	relação de produção de etanol por cana processada sob processo de refino de açúcar (m^3/ton)
CPV	capacidade de produção de vinhaça (m^3)
Rve	relação entre vinhaça e etanol produzidos em volume
CO	carga orgânica (kgDQO/dia)
DQO	demanda química de oxigênio (kgDQO/m^3)
V	volume de biodigestão (m^3)
COV	carga orgânica volumétrica (kgDQO/m^3 dia)
COVa	carga orgânica volumétrica aplicada (kgDQO/m^3 dia)
TDH	tempo de detenção hidráulica (horas)
QV	vazão da vinhaça (m^3/dia)
PB	produção de biogás (Nm^3/dia)
ER	eficiência de remoção (%)
FC	fator de conversão (0,45 Nm^3/kgDQO)
E_{comb}	energia do combustível (kW)
m_{comb}	vazão mássica de combustível (kg/s)
PCI_{comb}	poder calorífico inferior do combustível (kJ/Kg)
ηel	eficiência elétrica (%)
Ep	potência elétrica produzida (kW)
q	função de juros aplicada para o fator de anuidade
r	taxa anual de juros (%)
f	fator de anuidade (1/ano)

k	período de retorno de investimentos (*payback*) (anos)
C_{IBD}	custo de investimento em biodigestor (US$/kW)
I_{BD}	investimento em biodigestor (US$)
H	regime de operação anual (horas/ano)
C_{OMBD}	custo de operação e manutenção de biodigestor (US$/kW)
Cel_{MCI}	custo da potência elétrica produzida por motor de combustão interna (US$/kW)
I_{MCI}	investimento em motor de combustão interna (US$)
Ep_{MCI}	energia produzida por motor de combustão interna (kW)
CM_{MCI}	custo de manutenção de motor de combustão interna (US$/kW)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 18
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS 18
1.1.1 Evolução do Mercado de Etanol no Brasil 18
1.1.2 Evolução da Produção da Vinhaça: Impactos e Destinações 21
1.2 OBJETIVO E MÉTODO 26
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 28
2.1 BIOMASSA 28
2.1.1 Classificação da Biomassa 29
2.1.2 Vinhaça 31
2.1.3 Tecnologias de Conversão da Biomassa 32
2.2 BIODIGESTÃO ANAERÓBIA 34
2.3 BIODIGESTORES 36
2.3.1 Sistemas Convencionais 41
2.3.1.1 Digestores Anearóbios de Lodo 41
2.3.1.2 Tanques Sépticos 43
2.3.1.3 Lagoas Anaeróbias 44
2.3.2 Sistemas de Alta Taxa 45
2.3.2.1 Reatores Anaeróbios de Leito Fixo (Filtros Biológicos) 45
2.3.2.2 Reatores Anaeróbios de Leito Rotativo 46
2.3.2.3 Reatores Anaeróbios de Leito Expandido e Fluidificado 47
2.3.2.4 Reatores Anaeróbios de Dois Estágios 48
2.3.2.5 Reatores Anaeróbios de Chicanas 48
2.3.2.6 Reatores Anaeróbios de Manta de Lodo 49
2.3.2.7 Reatores Anaeróbios de Leito Granular Expandido 50
2.3.2.8 Reatores Anaeróbios com Circulação Interna 51
2.3.3 Biodigestor para Vinhaça 52
2.4 BIOGÁS 55
2.4.1 Panorama Mundial do Biogás 58
2.4.2 Panorama Brasileiro do Biogás 59
2.5 USINA SÃO MARTINHO 61
3 ANÁLISE ENERGÉTICA 65

3.1 DIMENSIONAMENTO DE BIODIGESTÃO PARA GERAÇÃO DE BIOGÁS 65
3.1.1 Capacidade de Produção de Etanol e Vinhaça da Usina São Martinho 66
3.1.2 Volume de biodigestão e do biogás produzível 68
3.2 SELEÇÃO DE GRUPO DE MOTOGERADORES 69
4 ANÁLISE ECONÔMICA 70
5 RESULTADOS 73
5.1 DIMENSIONAMENTO DE BIODIGESTÃO E VOLUME DE BIOGÁS PRODUZÍVEL 73
5.2 SELEÇÃO DE MOTOR PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA 74
5.3 ANÁLISE ECONÔMICA 76
6 CONCLUSÕES 80
REFERÊNCIAS 83

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

1.1.1 Evolução do Mercado de Etanol no Brasil

Como ocorre na maioria dos grandes desenvolvimentos científicos e tecnológicos, a história do álcool no Brasil foi determinada pelas mais marcantes crises mundiais desde a primeira grande guerra, passando pela crise do "Crack" da bolsa em 1929, a segunda guerra mundial (de 1939 a 1945); e a crise do petróleo no início dos anos 1970.

> Vários acontecimentos do século 20 contribuíram para os avanços na produção do etanol no Brasil e no mundo. Na segunda década do século 20, a Primeira Guerra Mundial (1914 a 1918) contribuiu para os avanços na produção do etanol, que foi utilizado como combustível nos motores usados nas batalhas (GIMENEZ et al., 2018).

Com a crise de 1929 e queda na demanda do açúcar, foi criada a primeira usina de álcool anidro com o objetivo de compensar o mercado interno de combustíveis no Brasil, também afetado pela dificuldade de aquisição de petróleo (RAMOS, 2007). Então em 1931, o governo federal implementou pela primeira vez, a prática de mistura de álcool na gasolina, timidamente fixada em 5% do volume (BRASIL, 2018).

E, mais uma vez, durante a segunda guerra mundial, segundo Moraes e Bacchi (2014), o país teve que recorrer ao álcool frente a forte instabilidade energética causada pela dependência do petróleo internacional.

Porém, como relatado por Gimenez et al. (2018), esses eventos não foram suficientes para se promover forte incentivo ao desenvolvimento do álcool. Foi necessário vir a crise mundial do petróleo no início da década de 1970, quando o ponto máximo da crise energética do Brasil foi atingido, para se instituir uma política voltada para o combate à dependência do petróleo internacional. Foi assim que, em 1975 foi criado o Programa Nacional do Álcool (Proálcool), que teve como objetivo principal estimular a produção do etanol para atender o mercado energético global, com várias frentes de estímulo para desenvolver toda a cadeia do setor; tendo como ponto forte a produção da frota nacional de veículos movidos a etanol.

O Proálcool foi o mais audacioso programa energético brasileiro, que definiu uma estratégia de médio e longo prazo, com forte participação do governo e entidades de fomento

à ciência e tecnologia, elevando o Brasil ao patamar de referência no desenvolvimento de tecnologias para produção de biocombustíveis.

> ... A partir desse momento, foram introduzidas no país, políticas públicas destinadas a promover a produção e o consumo de biocombustíveis em larga escala para reduzir a dependência externa do petróleo importado. Desde então, várias experiências transformaram o Brasil em líder mundial em bioenergia, fundamentalmente devido à produção, distribuição e utilização de etanol de cana-de-açúcar no setor de transportes (POVEDA, 2014).

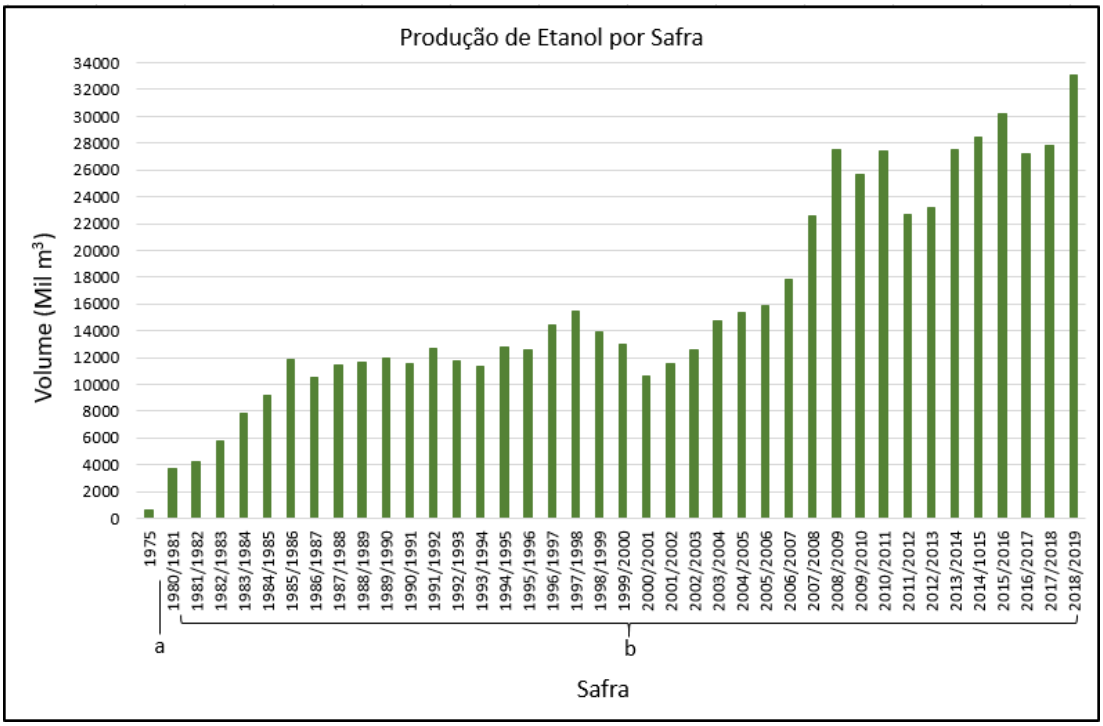
Vale ressaltar que esse processo de desenvolvimento do álcool no Brasil, não foi imune à novas flutuações do mercado internacional, tendo sofrido durante a década de 1980 com a queda do preço do petróleo e a recuperação do preço do açúcar no mercado externo. Foi a chamada crise do álcool. Conforme documentou Poveda (2014), em 1989 aconteceram descontinuidades no abastecimento de etanol, afetando a confiança do consumidor e abalando o mercado automobilístico. Porém, Novacana (2014) pondera que a obrigatoriedade da mistura de etanol na gasolina e a velha frota movida a etanol, mantiveram o programa vivo, bem como a infraestrutura de abastecimento.

A partir de 2003, com o lançamento dos veículos flexíveis ao combustível, o consumo do etanol hidratado voltou a crescer de modo expressivo, elevando os números de todas as etapas da cadeia de produção e consumo (NOVACANA, 2014).

Ao longo dos anos, a frota de veículos movidos a etanol cresce, e com isso, a demanda pelo combustível. Já no final da década de 1970 e durante a primeira metade da década de 1980, os aumentos significativos na produção de etanol no Brasil se deram graças à junção das destilarias de etanol às usinas de açúcar já existentes (GIMENEZ et al., 2018).

Documentado por Goldemberg et al. (2003), a produção de etanol no Brasil em 1975 era de apenas 555 mil m^3, ao passo que a Unicadata (2019) registra uma produção recorde de 33 mi m^3 na última safra 2018/2019. Na Figura 1 observa-se a evolução da produção de etanol até a safra mais recente.

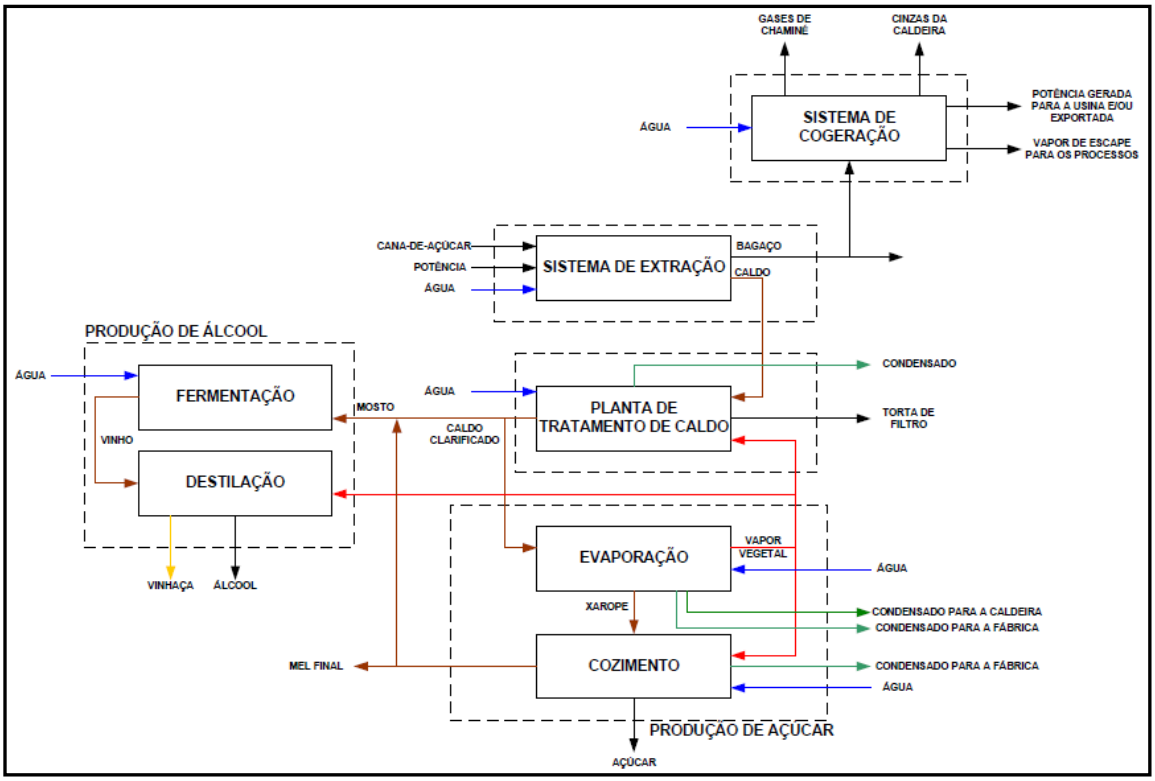
Figura 1 - Evolução da produção de etanol no Brasil por safra (Mil m^3).



Fonte: Adaptado de Goldemberg et al. (2003).; Unicadata (2019).

Com o passar dos anos, os processos industriais foram sendo aprimorados de forma a aumentar a produtividade das usinas de cana-de-açúcar, porém seguem sendo basicamente os mesmos. Segundo Pellegrini (2008) e conforme se observa na Figura 2, os principais processos envolvidos na produção de açúcar e álcool são: 1) Extração, de onde se obtém o caldo e o bagaço; 2) Cogeração, onde se converte bagaço queimado nas caldeiras gerando energia mecânica, calor e eletricidade; 3) Tratamento, de onde se obtém o caldo clarificado livre de materiais e substâncias indesejadas, e torta de filtro que serve como adubo para a lavoura; 4) Produção de Açúcar, onde ocorre a evaporação do caldo e cozimento do xarope com resíduo do mel final ou melaço; e 5) Produção do Etanol, onde outra parte do caldo tratado e mistura deste com o mel final (mosto) passa pela fermentação e o vinho resultante passa pela destilação, resultando no álcool e vinhaça.

Figura 2 - Processos envolvidos na produção de açúcar e álcool.



Fonte: Pellegrini (2008).

1.1.2 Evolução da Produção da Vinhaça: Impactos e Destinações

Juntamente com o progressivo aumento da produção de etanol, também cresceu de forma preocupante, a produção do resíduo derivado de seu processo. A vinhaça é um dos maiores resíduos industriais em volume e potencial de impacto ao meio ambiente. Autores divergem quanto à taxa de produção da vinhaça em relação ao do etanol, em razão da variabilidade nas composições da vinhaça, bem como das variações no processo de destilação, conforme se verifica no Tabela 1. Rocha et al. (2012) já alega que em usinas modernas a proporção varia entre 7 e 10 litros de vinhaça para cada litro de etanol; e, nas usinas mais antigas, em torno de 10 a 15. E Cruz et al. (2013), admite o parâmetro 12, por ser a média que encontrou nas usinas integrantes do Protocolo Agroambiental do Estado de São Paulo(1).

(1) Para direcionar ações para a superação desses desafios e para a restauração das áreas ciliares no Estado de São Paulo, foi definido o **Protocolo Etanol Mais Verde**, assinado em junho de 2017 entre o Governo do Estado de São Paulo, representado pela Secretaria do Meio Ambiente, Secretaria da Agricultura e Abastecimento e pela Companhia Ambiental Paulista – CETESB, e pelo Setor Sucroenergético, representado pela União da Agroindústria Canavieira do Estado de São Paulo – UNICA e pela Organização de Plantadores de Cana da Região Centro-Sul do Brasil – ORPLANA (SECRETARIA DE INFRAESTRUTURA E MEIO AMBIENTE DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2019).

E, com alta carga orgânica e bioquímica, possui grande toxidade e poder poluidor. Sua composição quantitativa é função da matéria-prima e do tipo de mosto. Em média, seu teor de sólidos é de 7% e destes, 75% são orgânicos e biodegradáveis com alta demanda química e bioquímica de oxigênio (DQO e DBO), daí seu caráter poluente (Passos, 2009). Ainda segundo Smeets (2008), a decomposição natural da vinhaça ao "ar livre", constitui uma perturbação sanitária, uma vez que conduz à proliferação de moscas, tornando o ambiente insalubre e desequilibrando o ecossistema. O poder poluidor da vinhaça pode chegar a 100 vezes ao de um esgoto doméstico (SALOMON, 2007).

Tabela 1 - Proporção de vinhaça produzida em relação ao etanol em volume.

Proporção Vinhaça / Etanol	Referências
7 a 10 a	Rocha et al. (2012)
10 a 15 b	Rocha et al. (2012)
10 a 18	Rosseto (1987)
10 a 14	Granato (2002)
	Lamo (1991)
12 a 15	Mutton (2010)
13	Salomon (2007)
12	Van Haandel; Catunday (1994)
12,04 c	Cruz (2013)

(a) para usinas modernas
(b) para usinas antigas
(c) média de produção de usinas integrantes do Protocolo Agroambiental de São Paulo

Fonte: Próprio autor.

> "A vinhaça de cana-de-açúcar é um líquido de cor marrom escuro, de natureza ácida, que sai da bica de destilação à temperatura de aproximadamente 107°C, com cheiro que vai do adstringente ao nauseabundo, qualidade está relacionada ao teor residual de açúcar o qual, por sua vez provoca um processo de putrefação tão logo a vinhaça é descarregada, liberando gases fétidos que tornam os ambientes insuportáveis" (FREIRE E CORTEZ 2000).

A vinhaça também é grave emissor de metano (CH_4), gás de efeito estufa (GEE) que tem recebido maior destaque em relação ao já muito falado gás carbônico (CO_2), pelo seu maior potencial de impacto ao meio ambiente. E o maior desafio decorrente do abundante volume de vinhaça está no seu adequado manejo; em como estocar, transportar e dar destinação final, de forma a se evitar a liberação de CH_4 na atmosfera durante esse processo.

Tradicionalmente, a vinhaça é aplicada diretamente nas lavouras de cana-de-açúcar por fertirrigação. Segundo Silva et al. (2007), no caminho que precede esse uso final a

vinhaça disposta em tanques, lagoas e canais, sofre variação na sua coloração e composição, resultante de ação redução extremamente alta, que exige grande quantidade de oxigênio (O_2) para decomposição dos compostos orgânicos presentes. Em seguida ocorre o processo de anaerobiose com formação de metano (CH_4), conforme descrito por Oliveira (2011).

> Nesta fase é iniciada a sedimentação da matéria orgânica presenta na vinhaça no fundo dos sistemas de canais e tanques, com formação dos nichos microbiológicos. Com isso, tem início o processo de decomposição dos resíduos e a consequente emissão de CH_4. O processo de limpeza e monitoramento dos sistemas de armazenamento e transporte da vinhaça assume assim papel de destaque nas práticas voltadas para a mitigação da emissão de CH_4 (OLIVEIRA, 2011).

O CH_4 vem se destacando pelo seu maior poder de absorção de radiações infravermelhos e seus efeitos sobre o aquecimento global. Segundo relatório do IPCC (2007), o CH_4 produz efeitos 25 vezes maiores que o CO_2. E, em estudos mais recentes, efeitos indiretos são incrementados sobre o valor do IPCC, indicando haver um impacto 34 vezes maior que do CO_2, considerando a mesma escala de tempo de 100 anos (SHINDELL et al., 2009). E, corroborando com esse prognóstico, Etminan et. al. (2016) afirmam que os efeitos do CH_4 são 25% maiores aos divulgados pelo IPCC, atribuindo ao CH_4 a contribuição de 30% de todos os fatores atmosféricos para o aquecimento global.

Com o crescimento da produção de etanol no Brasil, ao longo do tempo foi necessário repensar o que fazer com o seu resíduo, desenvolvendo novas tecnologias para seu tratamento e aproveitamento, em função do seu grande volume resultante. Num primeiro período, quando a produção de vinhaça não alcançava 2% do volume gerado nos dias atuais, a prática dominante era o descarte do resíduo das destilarias diretamente nos cursos de rio; tema o qual Corazza (2006) descreve que já despertava a atenção de cientistas e era objeto de estudos nas décadas de 40 e 50; época em que o resíduo era despejado nos mananciais de superfície e em locais chamados "áreas de sacrifício"; época em que Rocha de Almeida (1952) documentou que a legislação brasileira considerava normal uma água com DBO igual a 5 ppm, enquanto que a do rio Piracicaba já atingia uma média anual de 9 ppm por conta dos despejos da vinhaça da região. Segundo Xavier (1970 apud Granato, 2002), na década de 1970 o descarte direto da vinhaça sem tratamento prévio em rios, constituiu o maior problema ambiental dessa atividade agroindustrial.

Até que se institui a legislação específica para disciplinar o armazenamento e destinação da vinhaça; a começar pela Portaria nº 323, de 29/11/1978, proibindo o lançamento da vinhaça nos mananciais superficiais; e Portaria nº 158, de 03/11/1980, dispondo sobre o lançamento da vinhaça em coleções hídricas e sobre efluentes de destilarias e usinas de açúcar.

Em seguida, a vinhaça passou a ser prioritariamente lançada in-natura e de forma desregrada, diretamente sobre as lavouras de cana-de-açúcar (fertirrigação), tendo sido considerada no início, como solução para o problema do descarte direto. De fato, constataram-se benefícios de "irrigar fertilizando", que estudos científicos se aplicam ainda hoje para conhecer todos os efeitos da prática sobre a lavoura. Porém seus excessos também causaram impactos negativos sobre o solo, cursos d'água, lençol freático e atmosfera. Tanto, que os requisitos legais também evoluíram para disciplinar a prática; mais especificamente, a norma técnica P4.231 da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB (2015), que estabelece critérios e procedimentos para o armazenamento, transporte e aplicação da vinhaça na fertirrigação. As Figuras 3 e 4, ilustram o caminho percorrido pela vinhaça até a fertirrigação.

Figura 3 – Tanque de armazenamento de vinhaça.



Fonte: Ferraz (2013).

Figura 4 – Canal e fertirrigação da vinhaça.



Fonte: Ysatî (2015).

Após a prática de descarte do rejeito industrial em mananciais e cursos d'água, a fertirrigação passou a ser prática dominante por muito tempo; e só recentemente, abriu espaço para novas técnicas que dão maior importância ao aproveitamento da vinhaça, tendo agora seu *status* elevado a subproduto de produção ou biomassa com potencial energético a ser convertido em outras formas de energia mais limpa.

Passado o período em que toda a vinhaça era descartada, Camargo (1990) divide a evolução das diferentes destinações dadas à vinhaça, as quais são classificadas abaixo:

- **Fertirrigação:** emprego "in natura" na lavoura dissolvido em água. É necessário determinar as concentrações ótimas em função do tipo de vinhaça e do tipo de solo, evitando assim os impactos negativos. Se lançada em grande quantidade ou diretamente às plantações, pode contaminar lençóis subterrâneos de água. Além deste, podem ocorrer também a salinização e a acidificação do solo, comprometendo a qualidade do plantio, até mesmo para produção de cana-de-açúcar;

- **Concentração da Vinhaça:** concentrada a 60% de sólidos totais pode ser utilizada como fertilizante ou ração animal. Se incinerada, obtém-se geração de vapor e cinzas de potássio. A incineração pode ser feita em combustores ou em leito fluidizado;

- **Digestão Anaeróbia da Vinhaça:** produção de metano e gás carbônico associada ao tratamento do efluente. Entre os biodigestores de elevada eficiência, o biodigestor de fluxo ascendente com leito de lodo (UASB – Upflow Anaerobic Sludge Blanket) obtém destaque; e

- **Fermentação Aeróbia da Vinhaça:** visa à produção de proteína unicelular a ser empregada como suplemento alimentar para animais e humanos. Porém, para o consumo seguro, o substrato deve ser tratado previamente à fermentação para eliminar tóxicos e carcinogênicos; conforme abordado por Santos et al. (2019), por diferentes opções técnicas e diferentes microorganismos.

Hoje, distintas destinações podem ser adotadas pelas usinas de cana-de-açúcar, em parte ou no todo e em diferentes proporções. No entanto, Cruz et al. (2013), em pesquisas de campo, após visitar 165 unidades agroindustriais, constatou que 100% delas praticavam a fertirrigação da vinhaça *in-natura*, com apenas 5% da vinhaça produzida, destinada para a biodigestão e para a concentração.

1.2 OBJETIVO E MÉTODO

O objetivo geral desse trabalho é determinar a viabilidade técnica e econômica de se converter 100 % da vinhaça produzida em uma usina de cana-de-açúcar real, em energia elétrica através de motores de combustão interna (MCI) movidos a biogás, a ser exportada para a rede de distribuição (*Grid*). Com isto pretende-se contribuir com a indústria sucroalcooleira, demonstrando os benefícios dessa alternativa mais sustentável a prática da fertirrigação *in-natura* da vinhaça, mitigando seu impacto ambiental; e também, com a vantagem de se obter um novo efluente final com o mesmo poder fertilizante, porém sem a toxidade da vinhaça.

Para alcançar os resultados para o cenário proposto, o trabalho se presta também aos seguintes objetivos específicos:

a) Determinar a produção de etanol e vinhaça a partir da capacidade de moagem de cana;
b) Calcular o volume de biodigestão anaeróbia necessário para tratar a vinhaça produzida;
c) Determinar a capacidade de biogás produzível para a demanda de tratamento;
d) Realizar análise energética do biogás produzível;
e) Determinar o custo do biogás produzível;

f) Determinar o custo da energia elétrica produzível; e

g) Determinar a viabilidade econômica do empreendimento.

A partir dos dados reais de produção de etanol e composição específica da vinhaça dessa usina, propõe-se cenário no qual 100% da vinhaça produzida seja tratada em biodigestores para a produção de biogás a ser convertida em potência elétrica. Nessa sequência, conforme a oferta prevista desse efluente, é feita a caracterização e dimensionamento da biodigestão pelo processo já consagrado como o mais indicado atualmente no tratamento da vinhaça, com reatores UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket). No dimensionamento da biodigestão, calcula-se o volume de biogás produzível; a partir do qual é feita a seleção do motor mais adequado no mercado, em função de sua eficiência elétrica, para a geração de potência elétrica. São elencadas as opções de motores existentes no mercado, já desenvolvidos para o uso de biogás como combustível, não requerendo sua adaptação ou correlações matemáticas para a análise energética. Depois dessa fase, os dados obtidos para a solução selecionada são valorados para a análise econômica pelo método de Kehlhofer (1987) e Boehn (1987), adaptado por Silveira (1994). E finalmente é feita a discussão dos resultados obtidos. Essas etapas estão inseridas na estrutura seguinte:

- O Capítulo 2 traz uma revisão bibliográfica discorrendo sobre: caracterização, classificação, evolução do uso da biomassa e tecnologias de conversão, com destaque para a vinhaça; classificação das tecnologias empregadas para a biodigestão; panorama do biogás no Brasil e no Mundo; e, caracterização da usina São Martinho e seus dados produtivos;

- No Capítulo 3 é aplicado o método para a análise energética, a partir do dimensionamento da biodigestão da vinhaça produzida na usina São Martinho; cálculo da produção de biogás em reatores UASB; e seleção de grupo de motogeradores.

- O Capítulo 4 contempla o método para a análise econômica, com determinação dos custos anualizados, determinação de período de amortização de investimentos e ganhos de capital;

- No Capítulo 5 estão apresentados e discutidos os resultados para o cenário proposto; e

- No Capítulo 6 estão expostas as conclusões desse trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

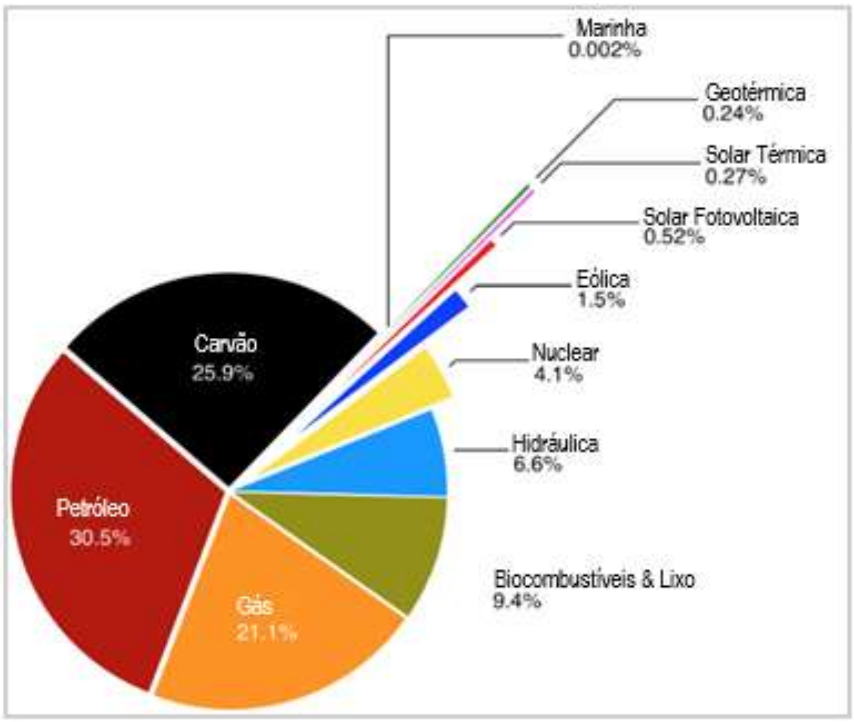
2.1 BIOMASSA

Biomassa é toda matéria orgânica, de origem vegetal ou animal, utilizada na produção de energia. A biomassa é obtida através de uma variedade de recursos renováveis, como plantas, madeira, resíduos agrícolas, excrementos e até o lixo. E de acordo com o processo utilizado, pode ser utilizado como combustível ou para a conversão em outros combustíveis. Pela ótica da ecologia, é aquela que envolve toda matéria viva, animal ou vegetal existente na natureza; e especificamente, a energia da biomassa de origem vegetal, provem da conversão da energia do sol no processo de fotossíntese.

> O termo biomassa engloba a matéria vegetal da fotossíntese e os seus derivados tais como: resíduos florestais e agrícolas, resíduos animais e a matéria orgânica contida nos resíduos industriais, domésticos, municipais, etc. Estes materiais contêm energia química proveniente da transformação energética da radiação solar. Essa energia química pode ser liberada diretamente por combustão ou convertida através de algum processo em outras fontes energéticas mais adequadas, para um fim qualquer desejado (NOGUEIRA E LORA, 2003).

Entre as fontes renováveis de energia, a biomassa tem a maior participação na matriz energética mundial; atualmente, em torno de 50%. A biomassa, que ao longo do tempo foi perdendo espaço para a crescente exploração de fontes energéticas provenientes do petróleo (gás natural, gasolina e diesel), hoje, segundo a Agência Internacional de Energia (IEA, 2017) volta a ser grande alternativa, com prognóstico do uso de energias renováveis atingir 30% do consumo mundial, nos próximos 20 anos. Na Figura 5, da última publicação do IEA (2018), observa-se a distribuição da oferta mundial de energia primária, onde todas as fontes de energias renováveis somadas representam 18,5% da matriz mundial, onde por sua vez a biomassa participa com 9,4%.

Figura 5 - Oferta mundial de energia primária em 2016.



Fonte: adaptado de IEA (2018).

O mesmo relatório também faz projeções, indicando que no mundo, a produção de energia por fontes renováveis deve ultrapassar a produção de energia do carvão, já na próxima década.

2.1.1 Classificação da Biomassa

A energia orgânica da biomassa tem sua origem na fotossíntese e são depositadas em forma de energia química. Nesse contexto, a CEMIG (2003) classifica a biomassa em vegetais lenhosos, não lenhosos e aquáticos. Os vegetais lenhosos têm alta densidade, dureza, rigidez e alto teor de lignina. Os vegetais não lenhosos compreendem os de menor porte que são geralmente utilizados na alimentação de animais e humanos embora tenham função energética, entre eles destacam–se a cana-de-açúcar, beterraba, entre outros. Os vegetais aquáticos são aqueles com crescimento na água doce ou salgada como, por exemplo, as microalgas e macroalgas. E Coronado (2007) propõe a seguinte classificação de biomassa:

- Biomassas Açucaradas – com alto teor de açúcares solúveis, geralmente sacarose, como exemplo da cana-de-açúcar e a beterraba;

- Biomassas Amiláceas – com alto teor de amido (poligriose) ou sacarose (frutose e glicose), no caso dos cereais e tubérculos como a batata;

- Biomassas Oleaginosas – ricos em óleos vegetais que podem ser utilizados como combustível para motores, como os girassóis, canola e soja; e

- Biomassas Lignocelulósicas – compostas por celulose, hemicelulose (poli-açúcares) e a lignina; que também podem conter líquidos e hidrocarbonetos. A madeira e resídulos florestais são exemplos típicos dessa classe de biomassa.

Outra forma de classificação, leva em conta a energia da biomassa associada aos biocombustíveis deles derivados, divididos em 3 grupos: biocombustíveis da madeira, biocombustíveis de não-vegetais e biocombustíveis de resíduos urbanos, conforme ilustrado no Quadro 1 desenvolvida por Nogueira e Lora (2003).

Quadro 1 – Classificação dos biocombustíveis

1º nível	2º nível	Definição
Biocombustíveis da Madeira (dendrocombustíveis)	Combustíveis diretos da madeira	Madeira produzida para fins energéticos, usada diretamente ou indiretamente como combustível.
	Combustíveis indiretos da madeira	Incluem biocombustíveis sólidos, líquidos ou gasosos, subprodutos da exploração florestal e resultantes do processamento industrial da madeira para fins energéticos.
	Combustíveis da madeira recuperada	Madeira usada diretamente ou indiretamente como combustível, derivada de atividade sócio-econômicas que empregam produtos de origem florestal.
Biocombustíveis não florestais (agrocombustíveis)	Combustíveis de plantações energéticas	Tipicamente combustíveis sólidos e líquidos produzidos a partir de plantações anuais, como é o caso do álcool da cana-de-açúcar.
	Subprodutos agrícolas	Principalmente resíduos de colheitas outros tipos de subprodutos de culturas como palhas e folhas.
	Subprodutos animais	Basicamente estercos de aves, bovinos e suínos.
	Subprodutos agroindustriais	Basicamente subprodutos de agro-indústrias, como o bagaço de cana e casca de arroz.
Resíduos Urbanos		Resíduos sólidos e líquidos gerados em cidades e vilas.

Fonte: adaptado de Nogueira & Lora (2003).

2.1.2 Vinhaça

Estudos sobre a biomassa de rejeitos compostos de materiais orgânicos como fonte alternativa de energia são conduzidos de acordo com o processo produtivo, onde se identifica potencial para a otimização do seu consumo energético com sustentabilidade; ou seja, na busca de diminuição nos custos e nos efeitos nocivos ao meio ambiente.

Especificamente na indústria sucroalcooleira, juntamente com a produção do seu principal produto, o etanol, também se produz a vinhaça, seu rejeito industrial de grande proporção e alta carga orgânica (DQO) em sua composição; portanto, com grande potencial energético a ser aproveitado.

> As biomassas que contribuem de forma elevada na produção de biogás através da biodigestão são as líquidas ou pastosas, que dentre as elencadas destacam-se a vinhaça e a torta de filtro da indústria sucroenergética, resíduos da agroindústria e da pecuária de confinamento, resíduos sólidos urbanos, lodo das estações de tratamento de esgoto e resíduos das vinícolas (MME, 2018).

Ainda que mantenha suas características físico-químicas e biológicas que a classifica como biomassa, a vinhaça apresenta variabilidade em sua composição, conforme registram vários autores. Bittencourt et al. (1978 apud Silva, 2012), concluíram por várias correlações, que as concentrações dos vários elementos nos caldos, e também na vinhaça, na maioria das vezes dependem mais da variedade do clima e do solo, que da própria planta, pelo fato de receber influência do processo produtivo. Segundo Glória e Orlando Filho (1984), a composição química da vinhaça varia em função do processo empregado, da qualidade da matéria prima, do tipo de levedura utilizada, tipo de flegma separado, etc. E Silva e Orlando Filho (1981), através de suas análises, comprovaram que a composição química da vinhaça também varia de região para região, devido ao tipo de matéria prima, ao modo de preparo do mosto, à época da amostragem e tipo de processo utilizado para a fabricação do álcool.

> A vinhaça é um resíduo líquido proveniente da destilação de uma solução alcoólica chamada vinho, obtida do processo de fermentação para obtenção do álcool. Esse resíduo pode ter como matéria prima o caldo de cana, o melaço ou a mistura de proporções, ou de diluições destes (CRUZ et al., 2013).

Essa compreensão pode ser constatada ao se observar os processos envolvidos numa usina de cana-de-açúcar, ilustrados na Figura 2. Parte do caldo proveniente do processo de

tratamento é destinado para a evaporação e cozimento no processo de produção de açúcar; outra parte do caldo é misturado ao mel final ou melaço resultante da produção do açúcar e, então destinado para a fermentação e destilação no processo de produção de álcool. Ou seja, uma usina também chamada de açúcar e álcool, não produz apenas açúcar ou apenas álcool; cada unidade varia o seu *mix* de produção de acordo com as demandas de mercado, produzindo açúcar e álcool em diferentes proporções. Segundo Silva (2012), aproximadamente 60% da vinhaça é produzida do mosto de caldo e 40% é proveniente do mosto misto. A Tabela 2, traz as diferentes composições da vinhaça por tipo de mosto, amplamente adotada por vários autores.

Tabela 2 – Composição físico-química da vinhaça conforme o tipo de mosto.

Parâmetro	Melaço	Caldo	Misto
pH	4,2 - 5,0	3,7 - 4,6	4,4 - 4,6
Temperatura (°C)	80 - 100	80 - 100	80 - 100
DBO (mg/l)	25.000	6.000 - 16.500	19.100
DQO (mg/l)	65.000	15.000 - 33.000	45.000
Sólidos Totais (mg/l)	81.500	23.700	52.700
Sólidos Voláteis (mg/l)	60.000	20.000	40.000
Sólidos Fixos (mg/l)	21.500	3.700	12.700
Nitrogênio (mg/l)	450 - 1.600	150 - 700	480 - 710
Fósforo (mg/l)	100 - 190	10 - 210	9 - 200
Potássio (mg/l)	3.740 - 7.830	1.200 - 2.100	3.340 - 4.600
Cálcio (mg/l)	450 - 5.180	130 - 1540	1.330 - 4.570
Magnésio (mg/l)	420 - 1.520	200 - 490	580 - 700
Sulfato (mg/l)	6.400	600 - 760	3.700 - 3.730
Carbono (mg/l)	11.200 - 22.900	5.700 - 13.400	8.700 - 12.100
Relação C/N	16,00 - 16,27	19,7 - 21,07	16,4 - 16,43
Matéria Orgânica (mg/l)	63.400	19.500	38.000
Subst. Redutoras (mg/l)	9.500	7.900	8.300

Fonte: adaptado de Química e Derivados (1981 apud Almança, 1994).

2.1.3 Tecnologias de Conversão da Biomassa

A biomassa, como fonte de energia primária pode ser consumida na sua queima direta para geração de calor; por troca de calor, gerar vapor; e com uso do vapor, movimentar máquinas ou turbinas para gerar energia elétrica. Porém esse uso mais rudimentar da biomassa também produz gases nocivos ao meio-ambiente que são diretamente liberados para

a atmosfera juntamente com particulados sólidos. São os gases de efeito estufa (GEE): o Monóxido de Carbono (CO), Dióxido de Carbono (CO_2), Óxidos de Nitrogênio (NOx) e Óxidos de Enxofre (SOx).

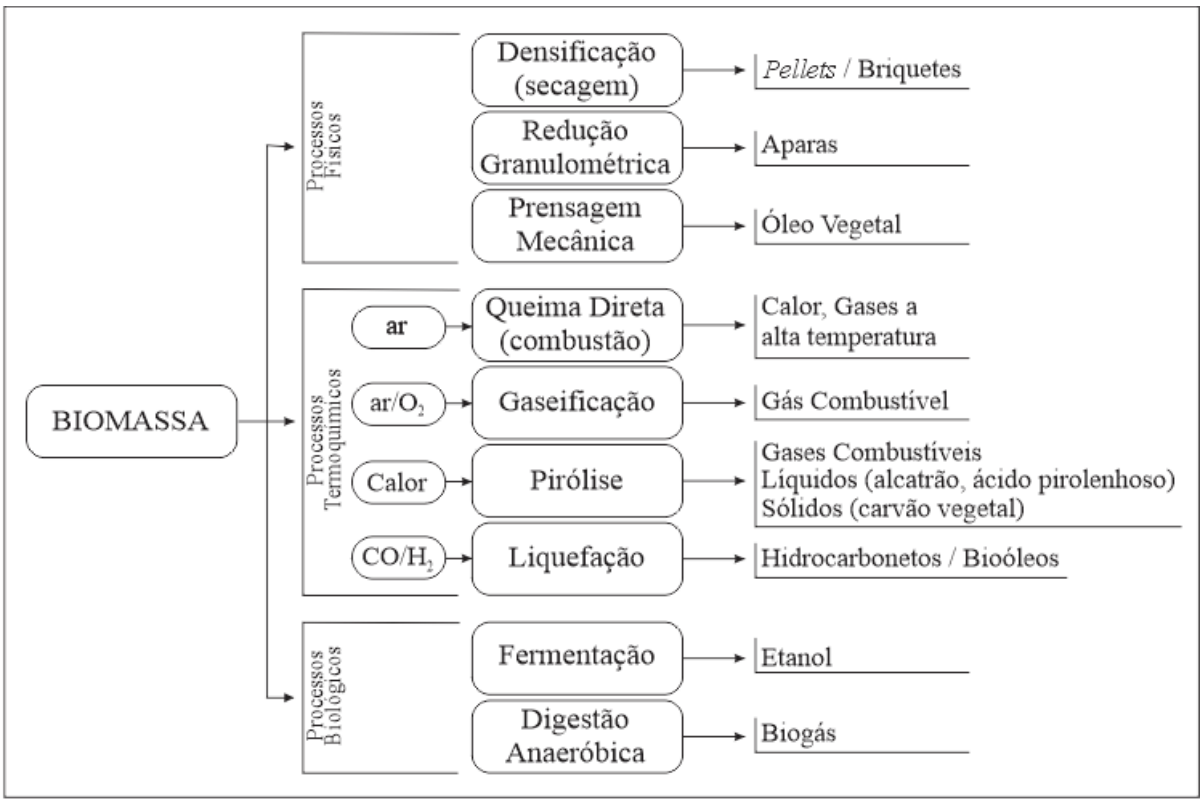
Por outro lado, através de processos físico-termo-químicos e biológicos, a biomassa pode ser convertida em outros combustíveis, fontes secundárias de energia com menor carga poluente ou nula.

Para o aproveitamento da energia química depositada nas diferentes biomassas, são necessárias reações químicas para sua liberação e posterior aplicação em trabalho útil.

Segundo Nogueira & Lora (2003), para os biocombustíveis serem alternativas competitivas em relação aos combustíveis fósseis, para a obtenção de energia elétrica, eles precisam ser de fácil aplicação e menor impacto ambiental, especialmente em sistemas isolados e de cogeração.

Na figura 6 está o esquema dos processos de conversão energética da biomassa, classificados em três grupos: físicos, termoquímicos e biológicos, indicando os principais reagentes e produtos resultantes, conforme proposto por Nogueira e Lora (2003):

Figura 6 – Processo de conversão energética de biomassa



Fonte: Adaptado de Nogueira e Lora (2003).

A densificação é um processo pelo qual resíduos florestais, basicamente cascas, bagaços, cavaco e pó de serragem, são prensadas e extrudadas sob calor, promovendo a conformação, secagem e fusão (ou “plastificação”) da sua lignina, resultando em pellets ou briquetes, de massa e energia concentrados, para serem destinados à combustão.

Na redução granulométrica, materiais a serem destinados à combustão, passam por fragmentação de suas dimensões em formas padronizadas (aparas), de forma a produzir combustão homogênea.

O processo de prensagem mecânica é utilizado para a extração de óleos vegetais de grãos e sementes, como soja, canola, girassol, dendê, azeite, etc.

A combustão direta é a transformação da energia química em calor, por reação dos elementos constituintes com o oxigênio fornecido que essencialmente ocorre em fogões, fornos e caldeiras.

Gaseificação é o processo de conversão de combustíveis sólidos em gasosos por meio de reações termoquímicas envolvendo ar ou oxigênio em taxas inferiores às necessárias à combustão, resultando em monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrogênio, metano e nitrogênio.

A pirólise é a carbonização por decomposição da matéria orgânica submetida a altas temperaturas na ausência de oxigênio. O exemplo clássico desse processo é a transformação da lenha em alcatrão e ácido pirolenhoso, com maior densidade energética.

Fermentação é o processo anaeróbio onde o açúcar do vegetal é convertido em álcool, através da quebra da glicose por ação de microorganismos.

A digestão Anaeróbia, em geral operado em biodigestores, consiste na decomposição de material orgânico de resíduos (animais, industriais, etc.) por ação de bactérias sem a presença de oxigênio, resultando em mistura gasosa (metano, dióxido de carbono, amônia, sulfeto de hidrogênio, e outros) com resíduos minerais em efluentes de grande poder fertilizante.

2.2 BIODIGESTÃO ANAERÓBIA

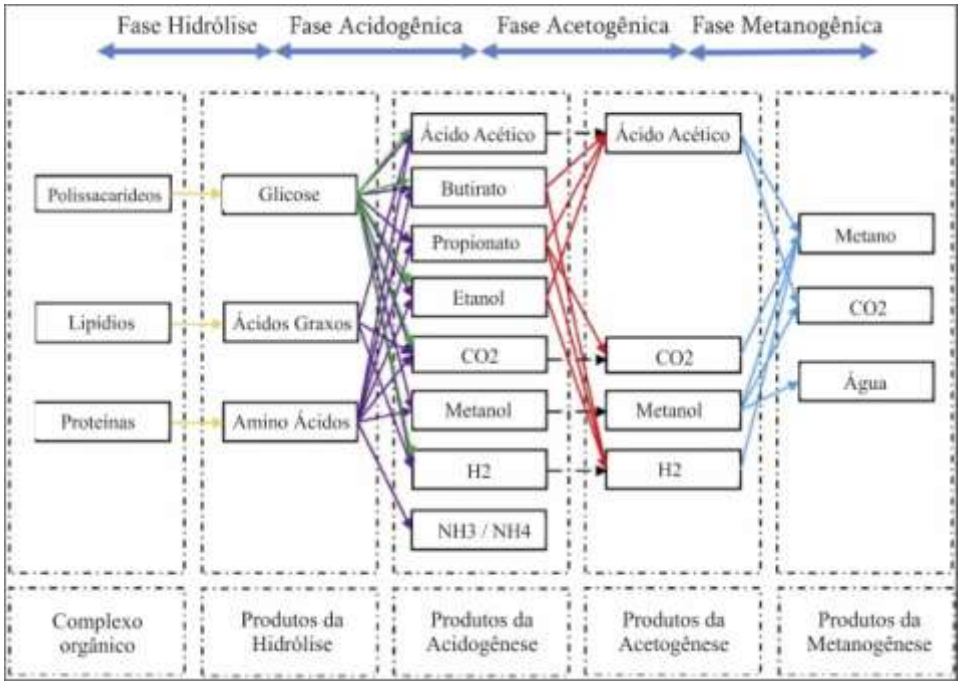
Silva (2012) conceitua que a biodigestão anaeróbia de efluentes é um processo de degradação bioquímica que se dá na presença de bactérias, onde o resultado do processo é a degradação da matéria orgânica presente no efluente com a consequente produção de biogás, majoritariamente CH_4, CO_2 e pequenas quantidades de H_2S, além de novo efluente mais pobre em matéria orgânica, mas ainda rico nos elementos presentes no substrato. Esses elementos

ainda restantes no lodo efluente da biodigestão anaeróbia constitui o biofertilizante residual do processo, o qual mantém a capacidade fertilizante do substrato original. Portanto, é um método de tratamento de resíduos orgânicos, com o objetivo de convertê-los em biogás e biofertilizantes, eliminando os riscos sanitários e poluentes da biomassa quando descartada *in-natura*. O biogás é um gás inflamável produzido por microorganismos, quando a matéria orgânica é fermentada dentro de determinados limites de temperatura, teor de umidade e acidez, em um ambiente praticamente impermeável ao ar (GOVONI, 2011). E o biofertilizante é proveniente do efluente final do processo de biodigestão, também chamado lodo.

> A realização e a eficiência da biodigestão dependem de condições específicas de operação, como temperatura e pH do meio, tipo de substrato usado no processo, concentração de sólidos e período de retenção da biomassa no biodigestor, dentre outros (SALOMON; LORA; MONROY; 2007).

Bernal et. al. (2017), assevera que o processo de fermentação é realizado por um consórcio de microrganismos que vivem simbioticamente. A Figura 7 representa a sequência do processo de digestão anaeróbia de compostos orgânicos complexos, onde estes são convertidos biologicamente em um grande número de substâncias químicas incluindo o metano, dióxido de carbono, amônia, água e células bacterianas.

Figura 7 – Produção de biogás a partir atividade de bactérias anaeróbias



Fonte: Adaptado de Syaichurrozi et al. (2016).

Fase Hidrólise: bactérias hidrolíticas liberam enzimas que, por meio de reações bioquímicas, decompõem compostos orgânicos complexos como carboidratos, proteínas e lipídios, em compostos dissolvidos como aminoácidos, açúcares e ácidos graxos, de modo a serem processados pelas células;

Fase Acidogênica: bactérias fermentativas decompõem os compostos intermediários formados a partir da hidrólise em ácidos graxos voláteis (ácidos acético, propiônico e butírico) e outros compostos como ácido lático e álcoois;

Fase Acetogênica: oxida os produtos gerados na fase anterior, produzindo a degradação dos ácidos graxos e álcoois dando origem ao ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono; e

Fase Metanogênica: onde as bactérias que atuam são estritamente anaeróbias e possuem a capacidade de converter os compostos orgânicos formados na fase anterior (ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono) em metano, principal constituinte do biogás.

Os principais parâmetros que influenciam o processo de digestão anaeróbia são: ausência de oxigênio, composição do substrato, temperatura (Psicrofílica – $T<20°C$, Mesofílica – $20°C<T<45°C$, Termofílica – $45°C<T<60°C$) e pH do meio.

2.3 BIODIGESTORES

Biodigestores são equipamentos fechados, para tratamento de efluentes e resíduos agropecuários e industriais, de origem vegetal ou animal, nos quais ocorrem reações de decomposição de matéria orgânica por bactérias, produzindo biogás e biofertilizante. São anaeróbios (na ausência de ar), para ação de bactérias anaeróbias que produzem predominantemente composto por CH_4 e CO_2. Existem diversos tipos de biodigestores, cada um com características próprias de operação, que dependem do tipo de material utilizado, das condições locais; bem como da escolha do processo biológico mais adequado; ou também a associação entre duas concepções, os chamados biodigestores híbridos. Mas basicamente um biodigestor anaeróbio é composto por uma câmara protegida do contato com o ar atmosférico, onde abriga o substrato a ser degradado por bactérias anaeróbias; um sistema para alimentação de substrato; um sistema para descarga do efluente final (biofertilizante); e sistema de descarga do biogás com ou sem uma campânula para armazenamento do biogás (gasômetro).

Pinto (1999), categoriza os biodigestores quanto ao tipo de construção, modo de operação, forma de armazenamento do gás, fluxo das substâncias em fermentação,

temperatura de operação, com ou sem agitação e com ou sem dispositivos para agregar a biomassa bacteriana. Se classificam em: *contínua*, quando o material a ser tratado segue um fluxo constante através do biodigestor; ou *por batelada*, quando o biodigestor opera de forma intermitente com carregamentos fixos até a digestão completa. Craveiro (1982 apud Almança, 1994), apresenta classificação quanto aos tipos de biodigestores, divididos em: fluxo-pistão, com agitação, anaeróbio de contato, filtro aeróbio, fluxo ascendente com leito de lodo e leito fluidizado.

Outra classificação distingue os biodigestores como *rurais* ou *convencionais*, indicados para pequenos produtores rurais ou pequenas comunidades, para o tratamento de dejetos de animais e restos vegetais, com características de processo lento para pequenas quantidades; e industriais ou chamados de *Alta Taxa*, desenvolvidos para alto rendimento em tratamento de efluentes em larga escala, como águas residuárias de esgoto e subprodutos industriais, como nas destilarias (vinhaça).

> Os digestores rurais, como o próprio nome indica, são apropriados para a área rural, sendo na sua grande maioria de pequeno porte e, dependendo da localização e da disponibilidade de insumo, de médio porte (até 100 m^3). Utilizam como substrato, esterco de animais, lixo, dejetos humanos e resíduos agrícolas. Normalmente, os resíduos são diluídos com água, na proporção de uma parte de substrato para uma parte de água (1:1), afim de se obter uma massa pastosa, com a consistência de um "creme de ervilhas", no sentido de possibilitar uma melhor fermentação dessa mistura (ALMANÇA, 1994).

Os biodigestores hoje classificados como *rurais*, constituem as primeiras concepções desenvolvidas na história, ainda muito utilizadas em pequenas comunidades. Conforme Sganzerla (1983), remontam do séc XIX, com origem em Bombaim na Índia, considerado o "Berço do Biodigestor". Nogueira (1986), afirma que em 1857 já havia sido construída a primeira instalação operacional destinada a produzir gás combustível, para um hospital de hansenianos. Seixas et al. (1980 apud Permínio, 2013) documentaram que em 1900, foi posto em funcionamento o primeiro biodigestor a batelada em Bombaim. E, Sganzerla (1983) posiciona na linha do tempo, a instalação do primeiro biodigestor de sistema contínuo na Índia em 1950. Permínio (2013) também descreve, que durante e depois da Segunda Grande Guerra, alemães e italianos, entre os povos mais atingidos pela devastação, desenvolveram técnicas para obter biogás de dejetos e restos de culturas.

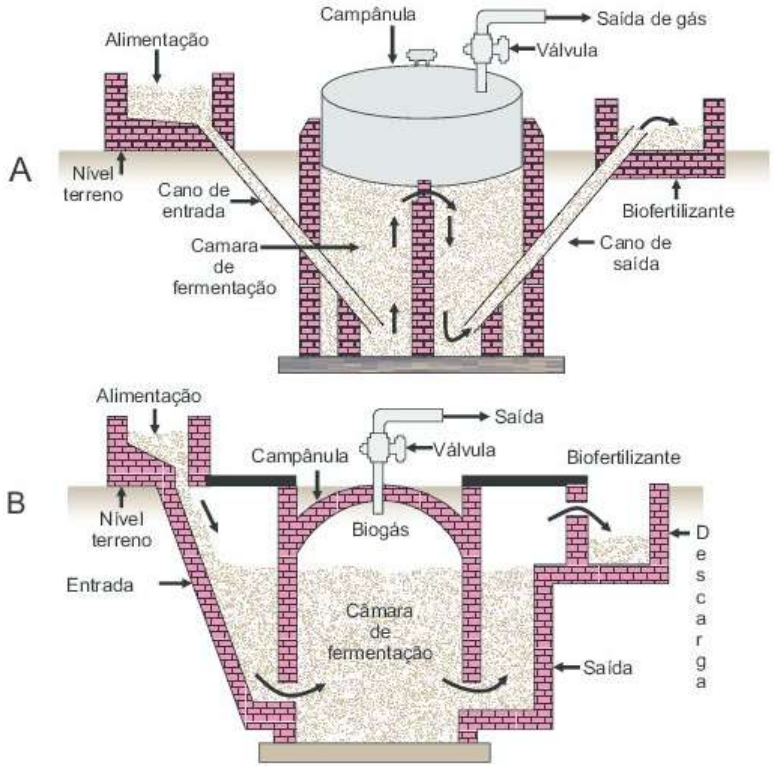
A China também é considerada pioneira no desenvolvimento de biodigestores. Para se defender da ameaça de ataques nucleares durante a *Guerra Fria*, a China adotou a

biodigestão como estratégia de descentralização energética entre os anos 50 e 60 (PERMÍNIO, 2013). Mas para Coldebella (2006), Índia e China têm diferentes visões de utilização da biodigestão: os Chineses buscam o fertilizante, indispensável para produção dos alimentos necessários para seu volume populacional; e a Índia busca suprir o seu déficit energético.

Os primeiros biodigestores da história, originados na Índia e na China, tradicionalmente utilizados ainda hoje, ficaram classicamente conhecidos como o modelo Indiano e modelo Chinês, seguidos por outras concepções como o modelo Canadense e modelo Batelada. Conforme sugerem Ortolani et al. (1991), Oliver et al.(2008) e Govoni (2011); estes biodigestores são indicados para aplicação rural. Esses modelos estão ilustrados nas Figuras 8, 9,e 10.

O biodigestor modelo Indiano é caracterizado por possuir uma campânula que é uma espécie de tampa conhecida como gasômetro, a qual pode estar mergulhada sobre a biomassa em fermentação ou pode estar em um selo d'agua externo. Sua estrutura é composta de uma parede central que serve para dividir o tanque de fermentação de duas câmaras, para assim permitir que o material possa circular pelo interior da câmara de fermentação (TARRENTO e MARTINES, 2006).

Figura 8 - Esquema de concepção de biodigestores Modelo Indiano (A) e Modelo Chinês (B).

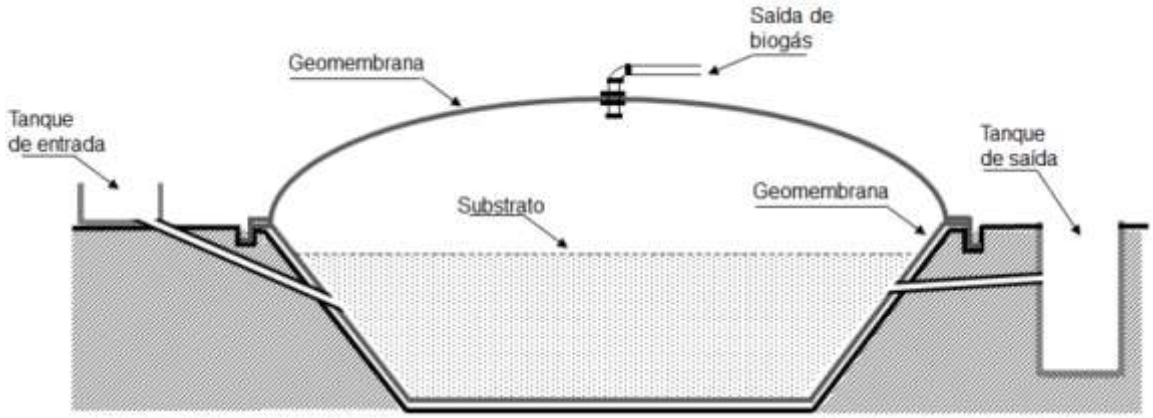


Fonte: Perlingeiro (2014).

O biodigestor modelo Chinês é formado por uma câmara cilíndrica em alvenaria onde ocorre a fermentação, apresenta um teto impermeável e abobadado que é destinado ao armazenamento do biogás.

> O seu funcionamento é com base no princípio de prensa hidráulica, ocorrendo então aumentos de pressão em seu interior devido ao acúmulo de biogás resultando em deslocamento do efluente da câmara de fermentação para a caixa de saída em sentido contrário quando ocorre descompressão (JORGE & OMENA, 2012).

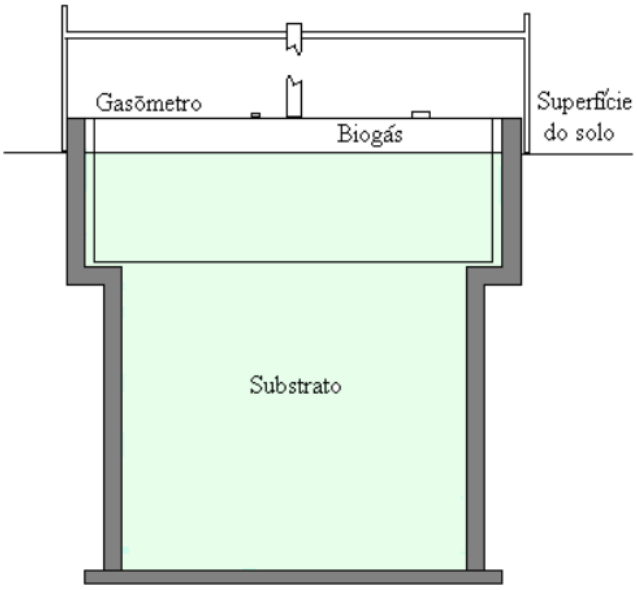
Figura 9 - Diagrama simplificado de um biodigestor do tipo canadense



Fonte: Nogueira et al. (2016).

O biodigestor modelo Canadense se diferencia pelo fato de ser do tipo horizontal, apresentando uma caixa de carga feita em alvenaria e com largura maior que a profundidade, possuindo, então, uma maior área de exposição ao sol, possibilitando em uma grande produção de biogás e também evitando o entupimento (CASTANHO & HARRUDA, 2008). Uma câmara de fermentação subterrânea que é revestida com lona plástica. Uma manta plástica superior para reter o biogás produzido de modo a formar uma campânula de armazenamento. E por fim, de uma caixa de saída onde o efluente é liberado. Existe também um registro par a saída do biogás e um queimador, que fica conectado ao registro de saída do biogás (FERREIRA e SILVA, 2009).

Figura 10 - Biodigestor Modelo Batelada



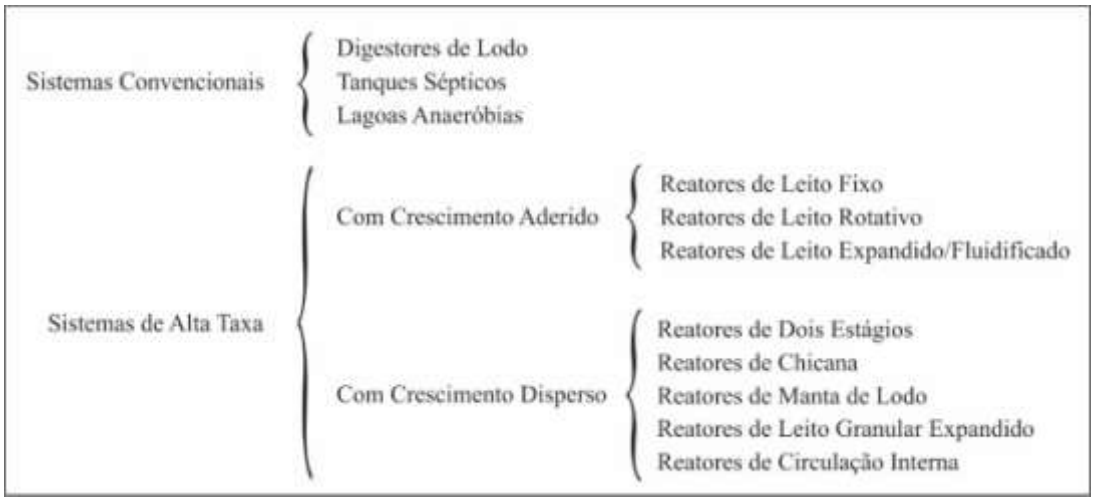
Fonte: Lucas Júnior (2009).

Até recentemente, os processos anaeróbicos para tratamento de efluentes foram considerados problemáticos e antieconômicos. Chernicharo (2007) explica que o crescimento lento de bactérias metanogênicas torna o processo frágil, ao passo que a retomada do sistema é afetada quando a biomassa ativa fica exposta a condições adversas. Com a expansão das pesquisas em tratamento anaeróbio, foram desenvolvidos sistemas de *Alta Taxa*, os quais são caracterizados pela capacidade de reter grande quantidade de biomassa ativa com baixos tempos de retenção hidráulica.

> Na década de 90 o uso de processos de tratamento avançado por meio anaeróbio era visto com certo ceticismo pela comunidade técnica reduzindo a aplicação do anaerobismo a unidades mais simples como fossas sépticas, lagoas anaeróbias e elementos específicos ao tratamento da fase sólida das Estações de Tratamento de Esgotos como, por exemplo, os digestores (COSTA, 2009).

A tecnologia da biodigestão vem se desenvolvendo, em grande parte inspirada nas concepções clássicas designadas como biodigestores rurais; e, ainda que não as inclua, num contexto mais abrangente, Chernicharo (2007) apresenta uma classificação mais moderna, ilustrada no Quadro 2, das concepções e desenvolvimento das tecnologias em biodigestão, fazendo uma primeira distinção entre os *Sistemas Convencionais* e *Sistemas de Alta Taxa*.

Quadro 2 - Classificação de Biodigestores.



Fonte: Chernicharo (2007).

2.3.1 Sistemas Convencionais

São ditos *Convencionais* os sistemas onde os reatores operam com cargas orgânicas volumétricas baixas e não possuem mecanismos para reter grandes quantidades de biomassas de elevada atividade. Chernicharo (2007), explica que a falta de mecanismos de retenção de sólidos no sistema faz com que os reatores convencionais sejam projetados e operados para tempos de detenção hidráulica elevados, a fim de possibilitar a permanência de biomassa no sistema por tempo suficiente para o seu crescimento e baixas cargas volumétricas. Os *Sistemas Anaeróbios Convencionais* dividem-se em três tipos bastante conhecidos e utilizados nos processos de tratamento dos esgotos sanitários: os *Digestores de Lodo*, os *Tanques Sépticos* e as *Lagoas Anaeróbias*.

2.3.1.1 Digestores Anearóbios de Lodo

Os *Digestores de Lodo* são utilizados como unidades de estabilização dos materiais provenientes da fase sólida das Estações de Tratamento, sendo a hidrólise o fator limitante do processo, afetada principalmente pela temperatura e pelo tempo de residência. Como estas unidades não são providas de condições de reter a biomassa no sistema, os tempos de detenção são grandes, assim como as dimensões das unidades de digestão. São aplicados em

Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) com o objetivo básico de estabilizar o material proveniente da fase sólida do processo de tratamento.

Ilustrados na Figura 11, eles podem ser concebidos em duas configurações distintas chamados: *Digestor Anaeróbio de Baixa Carga* e *Digestor Anaeróbio de Um Estágio e Alta Carga*; ou a combinação das duas construções, chamada de *Digestor Anaeróbio de Dois Estágios e Alta Carga*.

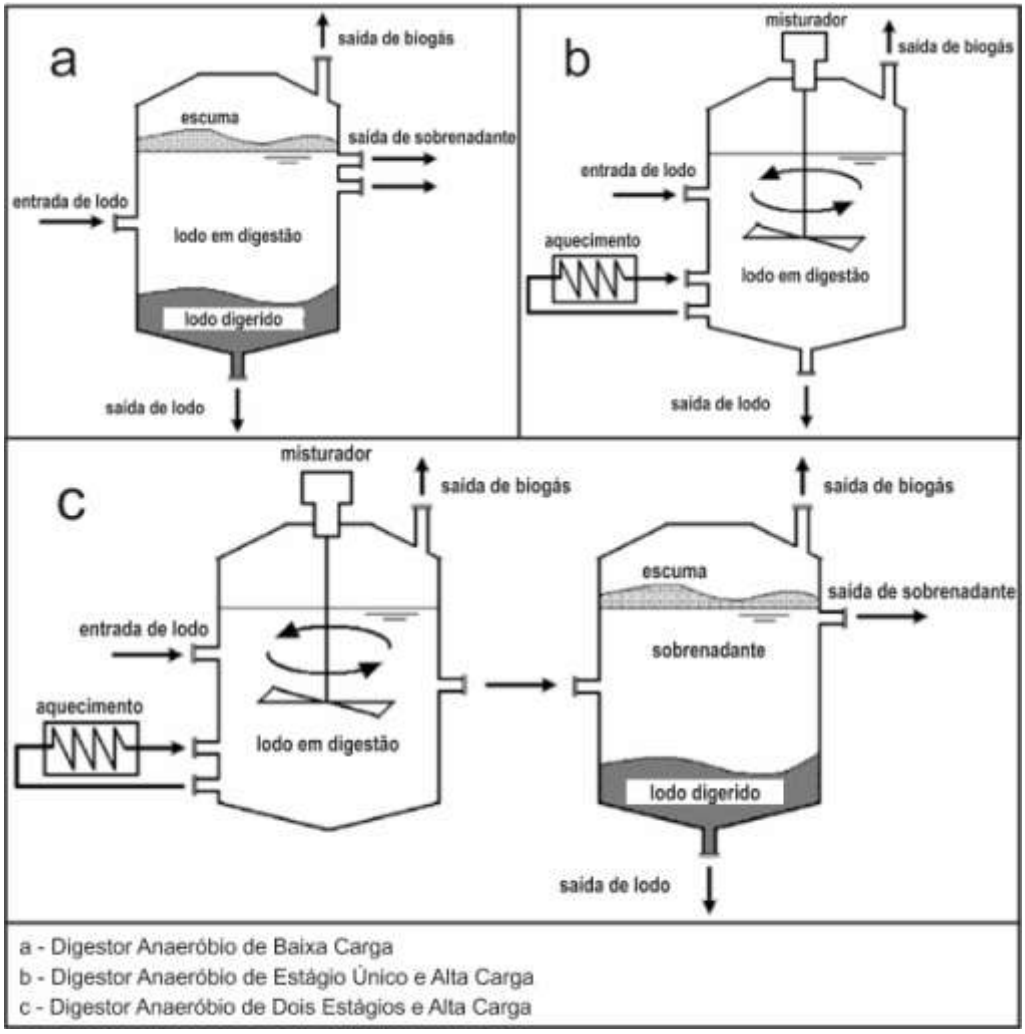
Segundo Leonardo (2012), descreve que o *Digestor Anaeróbio de Baixa Carga* possui tanque cilíndrico com fundo inclinado; possui uma cobertura plana, geralmente não é fornecida uma fonte de calor externa, não possui sistema de mistura que resulta numa estabilização estratificada dentro do digestor. O lodo bruto deve ser inserido à zona de digestão ativa, ocorrendo à formação de biogás. Conforme Chernicharo (2007), o biogás formado se desloca de forma ascendente, uma vez que não há agitação dentro do reator, onde partículas de lodo e outros minerais flutuantes são transportados para a superfície do reator, formando assim as camadas de escuma e líquido sobrenadante. E complementando o processo, Soares (2017) cita que a estratificação do lodo que ocorre abaixo da camada de escuma é o resultado da digestão, configurando quatro zonas distintas dentro do reator: zona de escuma, de sobrenadante, de digestão ativa e lodo estabilizado.

Chernicharo (2007), descreve os *Digestores Anaeróbios de Estágio Único e Alta Carga* como compostos por mecanismos de mistura e aquecimento; sua operação se dá a partir de taxas de alimentação invariáveis e com adensamento prévio do lodo cru, garantindo assim uma melhor uniformidade no funcionamento do digestor, sendo possível reduzir o volume e a melhora da estabilidade do processo. Com a eficiência do sistema de mistura realizada por esse tipo de digestor, não há formação de escumas e de sobrenadantes. Nuvolari (2011), afirma que o processo possui redução de sólidos voláteis da ordem de 45% a 50% e a alimentação e descarga de lodo ocorrem normalmente de forma contínua e de mesmo valor, pelo fato de não haver remoção de sobrenadantes. Chernicharo (2007) também defende que técnicas como recirculação de gás, recirculação de lodo ou agitação, podem ser utilizadas para conseguir a mistura do lodo dentro do digestor. A alimentação do digestor pode ocorrer a partir da adição de pequenas quantidades de lodo, com intervalos de tempos regulares.

Chamado de *Digestor Anaeróbico de Dois Estágios e Alta Carga*, é a combinação de um digestor de alta taxa trabalhando em série com outro digestor, funcionando como digestor anaeróbio convencional, formando assim, um digestor anaeróbio de duplo estágio. No primeiro digestor, são operados os sistemas de mistura e aquecimento e, no segundo, ocorre a separação dos sólidos que são digeridos do líquido sobrenadante (NUVOLARI, 2011).

Geralmente, os tanques são projetados de forma idêntica, onde ambos podem ser utilizados como digestor primário e, em outros casos, o digestor secundário pode ser um tanque aberto, sem aquecimento, ou até uma lagoa de lodo (CHERNICHARO, 2007).

Figura 11 - Digestores anaeróbios de lodo



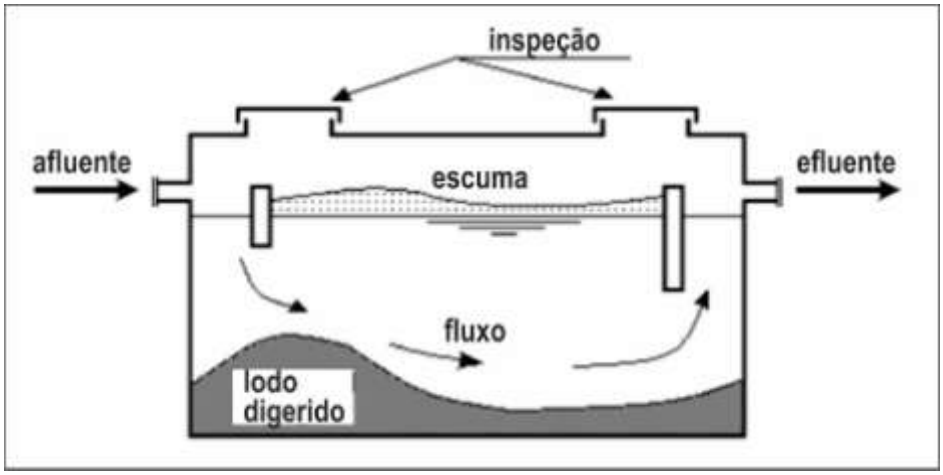
Fonte: Adaptado de Chernicharo (2007).

2.3.1.2 Tanques Sépticos

A utilização de *Tanques Sépticos* tem sido aplicada para tratamento de esgotos em áreas urbanas ainda desprovidas de rede coletora pública de esgotos, em vilas, conjuntos residenciais e comunidades que têm como características o tratamento de esgoto em pequenas vazões. São tanques simples ou divididos em compartimentos, verticais ou horizontais, com a função de decantar e digerir substrato em uma única unidade. Possui funções múltiplas como

decantação, flotação, desagregação e digestão de sólidos sedimentados e material flotante. (BUSATO, 2004). Para Costa (2009), seu funcionamento é simples e se compõe das seguintes fases: inicialmente os sólidos sedimentáveis vão ao fundo criando uma camada de lodo; os materiais flotantes, como óleos e graxas, vão formar uma camada de escuma na parte superior do tanque. Os tanques são providos de septos que bloqueiam a camada de escuma entre eles. O esgoto afluente sem sedimentos e material flotante percorre um caminho entre as duas camadas para a saída final do tanque. O material do fundo sofre um processo facultativo e anaeróbio, criando um lodo digerido ao fundo. Este equipamento está ilustrado na Figura 12.

Figura 12 - Tanque Séptico



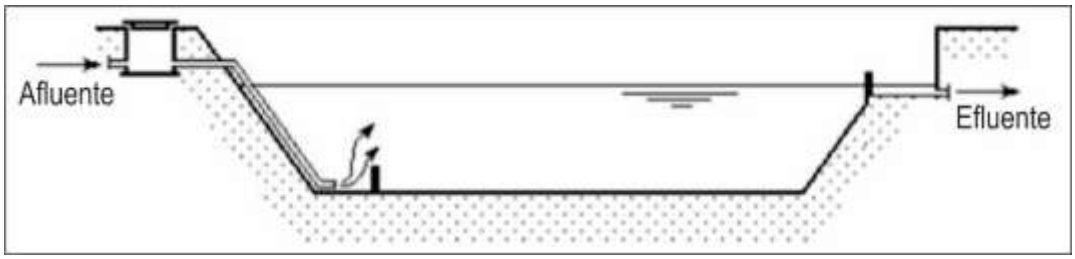
Fonte: Adaptado de Chernicharo (2007).

2.3.1.3 Lagoas Anaeróbias

As *Lagoas Anaeróbias* possuem uma eficiência satisfatória, porém requerem uma grande área para serem construídas, que nem sempre estão disponíveis nas localidades em questão. Uma solução é a implantação de lagoas anaeróbias seguidas de facultativas, também denominadas de secundárias, pois recebem o afluente de uma unidade de tratamento a montante e não de esgoto bruto (VON SPERLING, 2014). Este tipo de lagoa também é utilizado com frequência para tratamento de efluentes industriais como frigoríficos e laticínios, pois seus despejos possuem uma alta concentração de matéria orgânica (CHERNICHARO, 2007). Como as bactérias anaeróbias possuem uma taxa metabólica e de reprodução lenta, Von Sperling (2014) explica que a decomposição da matéria orgânica é apenas parcial para uma permanência de 2 a 5 dias na lagoa, sendo assim, a remoção da DBO

varia entre 50% e 70%, que, mesmo sendo insuficiente, contribui para a redução da carga que vai para a lagoa facultativa. O esquema de uma lagoa anaeróbia pode ser visto na Figura 13.

Figura 13 - Lagoa Anaeróbia



Fonte: Adaptado de Chernicharo (2007).

2.3.2 Sistemas de Alta Taxa

Os biodigestores de *Alta Taxa* são caracterizados por incorporar dispositivos de retenção da biomassa, de forma a promover a retenção de grande quantidade de biomassa, com elevada atividade biológica e com redução do tempo de detenção hidráulica. Chernicharo (2007) também distingue esses equipamentos em dois grandes grupos, de acordo com o processo de crescimento biológico: *Aderido*, onde o crescimento biológico se dá aderido a estruturas inertes, chamados biofilmes; e *Disperso*, onde o crescimento se dá disperso no meio líquido em forma de flocos ou granulados com sedimentação.

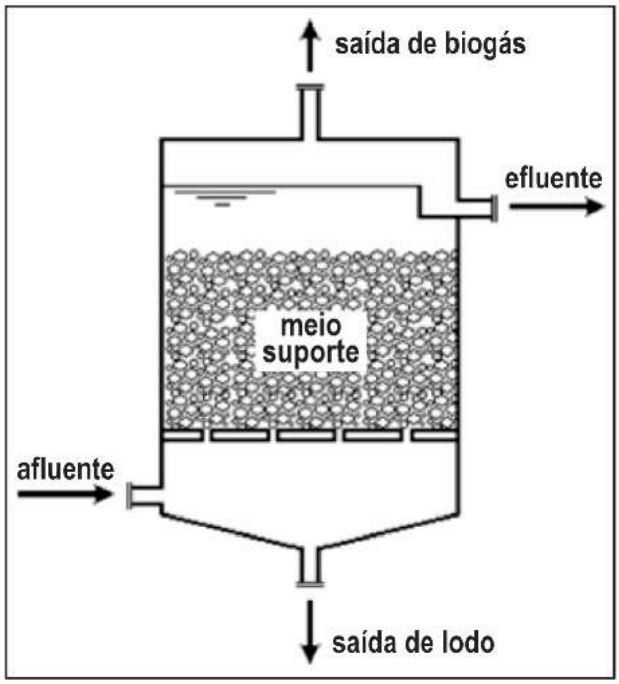
Para melhorar o contato entre o afluente e o lodo no sistema, aplica-se em geral, fluxo de alimentação no sentido ascensional em vez do escoamento horizontal dos sistemas clássicos (VAN HAANDEL & LETTINGA, 1994). O resultado desses avanços construtivos e biológicos é a obtenção de reatores compactos, com volumes bastante inferiores aos digestores anaeróbios convencionais, com elevado grau de estabilização da matéria orgânica (CHERNICHARO, 2007).

2.3.2.1 Reatores Anaeróbios de Leito Fixo (Filtros Biológicos)

Os reatores anaeróbios de leito fixo são conhecidos também como filtros anaeróbios ou filtros biológicos. São caracterizados pela presença de material com preenchimento inerte, onde os sólidos biológicos podem aderir ou até mesmo ficarem retidos nos intervalos. A biomassa que fica aderida ou retida realiza a degradação do substrato que está contido no

fluxo de esgotos (CHERNICHARO, 2007). Com elevados tempos de residência de sólidos nos reatores e baixos tempos de detenção hidráulica, este reator, ilustrado na Figura 14, é mais indicado para tratamentos de águas residuárias (VAN HAANDEL & LETTINGA, 1994).

Figura 14 - Filtro Biológico de fluxo ascendente.

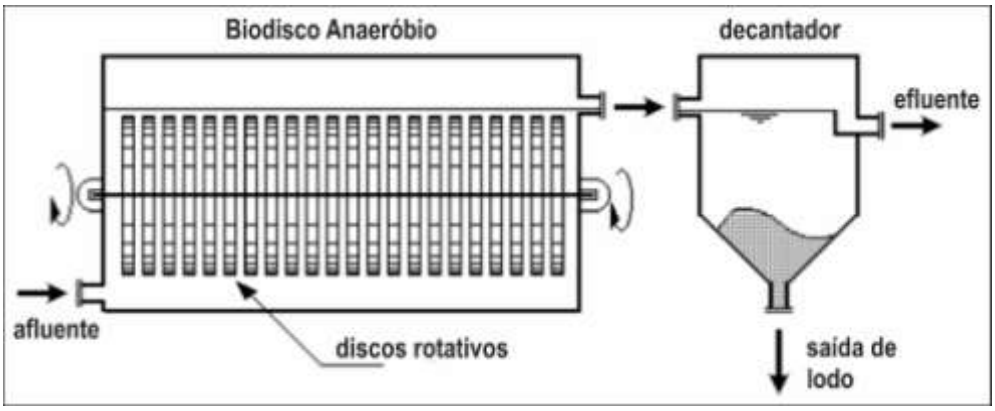


Fonte: Adaptado de Chernicharo (2007).

2.3.2.2 Reatores Anaeróbios de Leito Rotativo

Também conhecido como biodisco anaeróbio, nele os microrganismos ficam aderidos ao meio suporte inerte, originando um filme biológico. Possui uma sequência de discos que podem estar parcialmente ou totalmente submersos, girando lentamente em torno de um eixo horizontal, dentro de um tanque, o qual flui o esgoto. O reator rotativo, apresentado na Figura 15, ainda que tenha sido documentado de 1928, apenas ganhou relevância e aplicabilidade em tratamento de esgotos depois do advento dos materiais plásticos, em função dos fatores relacionados à rigidez, leveza e economia. Neles, um filme biológico é criado através da aderência dos micro-organismos. Para Chernicharo (2007), em função da relação tempo de retenção de sólidos/tempo de detenção hidráulica ser elevada, impossibilita que ocorram entupimentos no sistema, considerando que a velocidade rotacional deve promover uma força de cisalhamento entre os discos capaz de remover o excesso de biomassa retida.

Figura 15 - Biodisco Anaeróbio



Fonte: Adaptado de Chernicharo (2007).

2.3.2.3 Reatores Anaeróbios de Leito Expandido e Fluidificado

A concepção deste reator apresentado na Figura 16, supera a limitação de difusão de substrato, verificada nos processos de leito estacionário. Nesses processos, a biomassa se desenvolve em filmes de fina espessura que são juntados a partículas de tamanho bastante reduzido, ao contrário dos processos de leito estacionário, onde ocorre um biofilme e meio de suporte de dimensões superiores. Chernicharo (2007), explica que os problemas de entupimento são drasticamente reduzidos ou mesmo eliminados com a expansão e fluidificação do meio, ocorrendo o aumento substancial da retenção da biomassa e o seu contato com o substrato, o que acarreta na diminuição do tempo de detenção hidráulica.

Figura 16 - Reator Anaeróbio de Leito Expandido e Fluidizado.

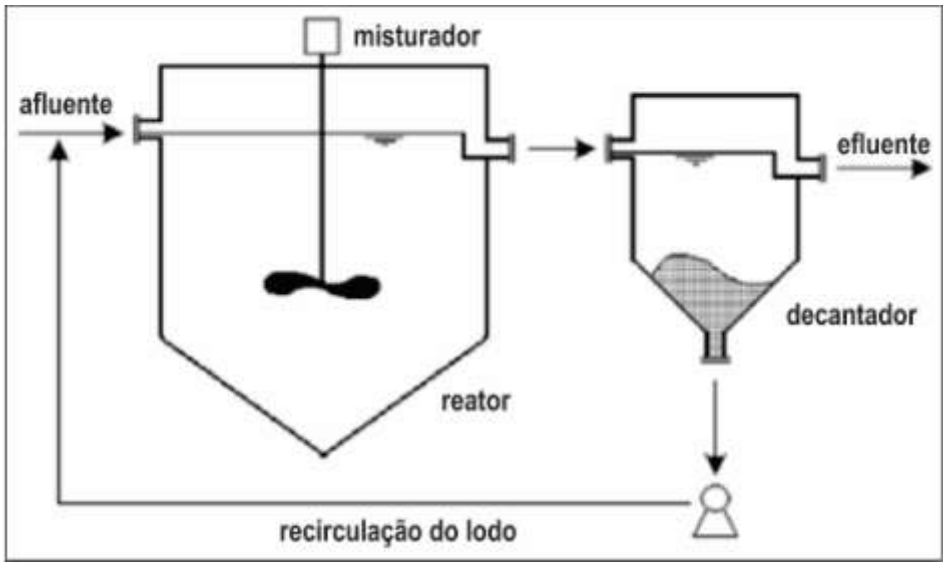


Fonte: Adaptado de Chernicharo (2007).

2.3.2.4 Reatores Anaeróbios de Dois Estágios

Esta concepção de reator, segundo Chernicharo (2007), teve destaque na década de 50, para o tratamento de efluentes industriais concentrados. Sua configuração conta com um reator anaeróbio com misturador, ligado em série com um dispositivo de segregação para retorno dos sólidos a serem misturados novamente reator, conforme se observa na Figura 17. O processo é similar ao do sistema ao aeróbio de lodos ativados, onde basicamente a biomassa floculada no reator, agregada aos sólidos afluentes não digeridos, tem sua retenção em um dispositivo de segregação de sólidos para ser reencaminhada ao reator de primeiro estágio, onde receberá o esgoto afluente para mistura. Nesse processo, pela existência de partículas produtoras de gases, que têm fluxo ascendente, constata-se como problema operacional a separação, a concentração e a sedimentação dos sólidos dos efluentes sanitários.

Figura 17 - Reator Anaeróbio de Dois Estágios.

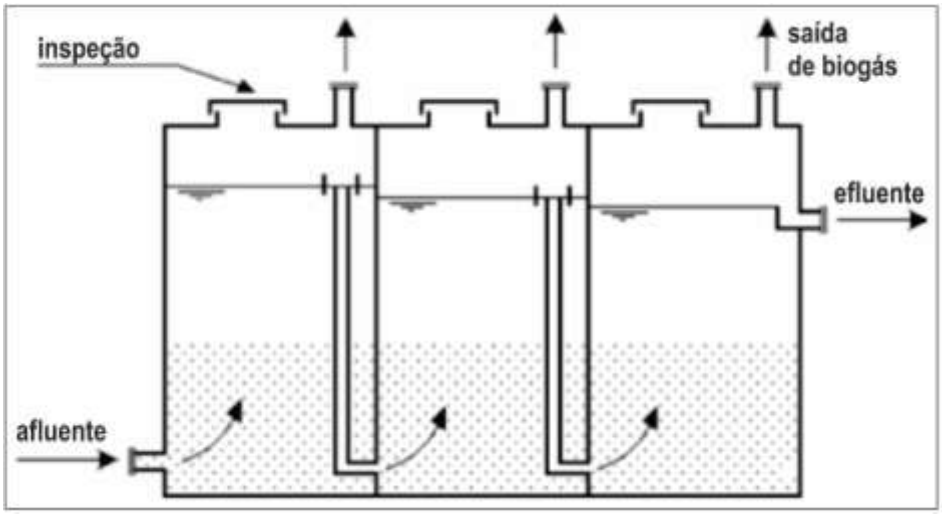


Fonte: Adaptado de Chernicharo (2007).

2.3.2.5 Reatores Anaeróbios de Chicanas

Chernicharo (2007), descreve os *Reatores Anaeróbios de Chicanas* como análogos aos tanques sépticos com múltiplos estágios, com câmaras montadas em série, adotando sistema de direcionamento da alimentação (chicanas) para promover movimento ascensional e descensional do fluxo para melhor contato do afluente com a biomassa existente no fundo dos tanques. Este reator pode ser visto na Figura 18.

Figura 18 - Reator Anaeróbio de Chicanas.



Fonte: Adaptado de Chernicharo (2007).

2.3.2.6 Reatores Anaeróbios de Manta de Lodo

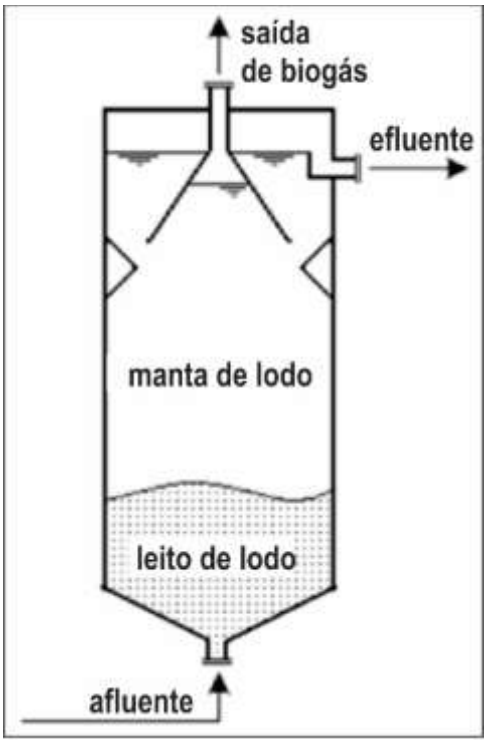
> O processo utilizado visa a segregação dos gases, sólidos e líquidos. Para tanto, a literatura inglesa especificou para os *Reatores de Manta de Lodo* a sigla UASB, que significa "Upflow Anaerobic Sludge Blanket". No Brasil, são também conhecidos com as siglas DAFA ou RAFA, ou seja, *Digestor Anaeróbio de Fluxo Ascendente* e *Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente*, respectivamente (Costa, 2009).

O *Reator de Manta de Lodo*, que pode ser visto na Figura 19, é um reator de fluxo ascendente de efluentes por meio de um leito de lodo concentrado e de alta atividade, desenvolvido por Gatze Lettinga na Holanda na década de 1970, originalmente para o tratamento de esgotos, onde foi muito adotado e posteriormente difundido por outros países. Chernicharo (2007), apresenta os sólidos como variando de muito denso (flocos) a granular de alto poder de sedimentação localizados em proximidade do fundo (leito de lodo) a um lodo menos concentrado, que se encontra na parte superior (manta de lodo).

Conforme descrito por Chernicharo (2007) e Costa (2009) quanto às características dos processos envolvidos nesse reator, a entrada do esgoto se dá pelo fundo e a saída por meio de um decantador interno na parte superior; o fluxo ascendente promove a mistura do esgoto com as bolhas de gases formados, aumentado sua reação, passando por zonas bem definidas para a estabilização da matéria orgânica; a sedimentação das partículas ocorre por um sistema de segregação de gases e sólidos existente abaixo do decantador, que as separam da manta de lodo, encaminhando-as para a câmara de digestão ao invés de enviá-las para fora do sistema.

Chernicharo (2007), também documenta as vantagens desse processo em relação aos anteriores como: sistema compacto, coma baixa demanda de área; baixo custo de implantação e de operação; baixa produção de lodo; baixo consumo de energia; satisfatória eficiência de remoção de DQO e DBO, da ordem de 65% a 75%; possibilidade de rápido reinício, mesmo após longas paralisações; e elevada concentração e boa desidratabilidade do lodo excedente.

Figura 19 - Reator de Manta de Lodo (UASB).



Fonte: Adaptado de Chernicharo (2007).

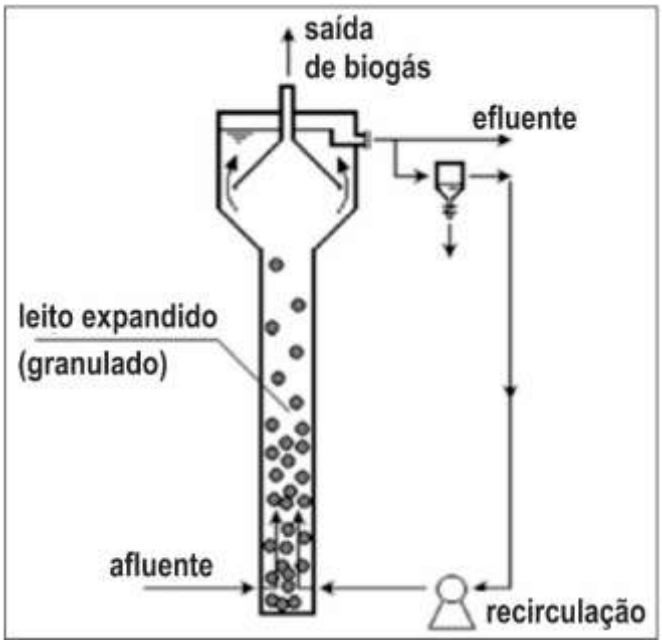
2.3.2.7 Reatores Anaeróbios de Leito Granular Expandido

O reator anaeróbio de leito granular expandido implica na movimentação ou na expansão de uma camada de lodo de granulação efetiva, tendo semelhança com reator anaeróbio de fluxo ascendente (UASB). Neste reator, ilustrado na Figura 20, ocorre preferencialmente a retenção de lodo do tipo granular, que em função da aplicabilidade de altas taxas hidráulicas, tem sua expansão mantida, garantindo mistura hidráulica constante e alta atividade de contato biomassa-esgoto. Estudada por Chernicharo (2007), as elevadas taxas de recirculação dos efluentes associadas à relação altura/diâmetro correspondente normalmente a 20 vezes ou mais, garantem as velocidades ascensionais do líquido na ordem de 5 m/h a 10 m/h, o que não ocorre nos reatores tipo UASB, que em função das velocidades

ascensionais mais baixas, variando de 0,50 m/h a 1,50 m/h, ocasionando o leito de lodo praticamente estagnado.

Chernicharo (2007) também esclarece, que os reatores anaeróbios de leito granular expandido possuem uma aplicabilidade maior ao tratamento de efluentes solúveis, pois as elevadas velocidades superficiais do líquido no interior do reator impossibilitam uma remoção mais eficiente dos materiais orgânicos particulados e a presença em excesso de sólidos suspensos pode ser prejudicial à manutenção do lodo granular no reator.

Figura 20 - Reator Anaeróbio de Leito Granular Expandido.



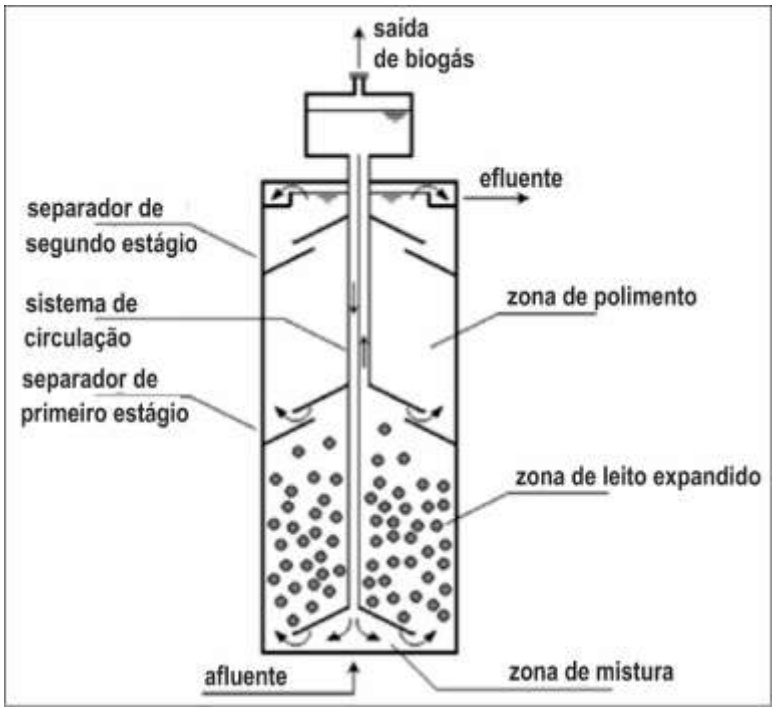
Fonte: Adaptado de Chernicharo (2007).

2.3.2.8 Reatores Anaeróbios com Circulação Interna

O *Reator Anaeróbio com Circulação Interna*, ilustrado na Figura 21, pode ser considerado uma variação do reator UASB; e tem sido desenvolvido com o objetivo de garantir uma alta eficiência quando submetido à alta carga orgânica volumétrica (COV) (entre 30 a 40 kg DQO/m^3 dia). Para isso é necessário se obter uma eficiente separação entre gases, sólidos e líquidos em razão da turbulência provocada pela produção de gases na biomassa retida no sistema. No reator com circulação interna, a separação dos gases, sólidos e líquidos se dá em dois estágios: No primeiro estágio a separação de grande porção do biogás produzido no sistema, ocorre com a redução da turbulência na parte superior do reator; no

segundo estágio a separação dos sólidos ocorre garantindo alta retenção de biomassa no sistema e efluente mais clarificado. Por este aspecto, a construção do reator com circulação interna consiste de dois compartimentos operando como reatores UASB, um sobre o outro, sendo o primeiro submetido a alta carga orgânica (CHERNICHARO, 2007).

Figura 21 - Reator Anaeróbio de Circulação Interna.



Fonte: Adaptado de Chernicharo (2007).

2.3.3 Biodigestor para Vinhaça

O tratamento adequado, bem como a destinação final a ser dada à crescente produção de efluentes industriais, sobretudo da vinhaça da cana-de-açúcar, pelo seu alto poder poluente, sempre foi um grande desafio. Segundo Granato & Silva (2002), a possibilidade de tratar a vinhaça por biodigestão anaeróbia só começou a se tornar atraente a partir do desenvolvimento de reatores de alta performance, onde os tempos de retenção hidráulica são bastantes reduzidos. Bories et al.(1988); Khanal (2008); van Lier et al. (2015) Fuess (2017) explicam que a aplicação da digestão anaeróbia no tratamento da vinhaça, assim como de outras águas residuárias com alta taxa orgânica, está intimamente relacionada ao aperfeiçoamento deste processo nas últimas décadas, considerando o desenvolvimento de tecnologias que permitiram o aumento do tempo de retenção de sólidos (biomassa) nos

reatores. Esse desenvolvimento dos processos de alta taxa, segundo van Lier et al. (2015), ocorre especialmente a partir da década de 1970, permitindo desvincular o tempo de detenção hidráulica (TDH) do tempo de retenção celular (TRC) nos reatores, por meio dos mecanismos de imobilização da biomassa, elencados por Rajeshwari et al. (2000); Khanal (2008); van Lier et al. (2015):

- Formação de grânulos altamente sedimentáveis (auto-imobilização), combinada com estruturas que possibilitem a separação do biogás e a sedimentação do lodo granular;

- Adesão de micro-organismos a materiais suporte de alta densidade, os quais sofrem fluidização a partir de aplicação de velocidades ascensionais adequadas; e

- Retenção de agregados de lodo e formação de biofilme em meio suporte fixado ao corpo do reator.

De acordo com Chernicharo (2007), em decorrência da ampliação de conhecimento na área, os sistemas anaeróbios de tratamento de esgoto, notadamente os *Reatores de Manta de Lodo* (UASB) cresceram em maturidade, passando a ocupar uma posição de destaque no Brasil e no mundo. Essa trajetória de aceitação passou de um estágio de descrédito, até o início dos anos 80, para a fase atual de grande aceitação. Granato & Silva (2002) e Passos (2009) documentaram sobre a iniciativa da IBRASA, uma subsidiária do BNDE, atualmente BNDES - Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico, da formação em 1980, de um grupo de pesquisa com integrantes do IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo e uma empresa produtora de álcool, a Destilaria PAISA, de Alagoas. Este grupo foi responsável pela instalação de quatro reatores do tipo UASB que entraram em operação entre 1981 e 1986. Os resultados obtidos com os experimentos na PAISA estimularam uma ampla utilização da tecnologia, não apenas para o tratamento da vinhaça, mas também de outros efluentes industriais, minimizando assim os problemas enfrentados com a escassez de energia elétrica, altos custos de aquisição e dificuldades de acesso a mesma.

Ainda assim, Silva (2012), ressalta que apesar da biodigestão ter se revelado um método de tratamento tecnicamente viável, ela somente foi utilizada em algumas destilarias no Brasil, como a Usina São Martinho em Pradópolis – SP, a Destilaria São João em São João da Boa Vista – SP, a Usina São Luiz em Pirassununga – SP, a Usina Santa Tereza em Goiana - PE. Entre 1984 e 1991 foram instalados sistemas de biodigestão em 25 unidades no Brasil, principalmente em indústria de cerveja e refrigerantes.

Borges (2017) documentou que no início, a tecnologia de biodigestores UASB era aplicada exclusivamente a esgotos com alta concentração de Demanda Química de Oxigênio (DQO) e Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), como é o caso de despejos industriais

específicos. Esgotos domésticos com baixa concentração de matéria orgânica só vieram a ter este processo aplicado com êxito a partir da metade dos anos 1990. Nesse período, segundo o mesmo autor surge o PROSAB - Programa de Pesquisa em Saneamento Básico, novo incentivo para o desenvolvimento da tecnologia em biodigestão. Financiado pela FINEP, CNPq e CEF no final dos anos 90, foi preponderante para a disseminação no Brasil do tratamento anaeróbio através dos Reatores UASB ao tratar de temas como o tratamento de esgotos sanitários e disposição controlada no solo; pós tratamento de efluentes de reatores anaeróbios; reuso, fertirrigação e nutrientes; e outros.

Ao longo do processo de desenvolvimento da tecnologia de biodigestão de efluentes industriais, com destaque para a vinhaça, vários estudos foram realizados e publicados, entre os quais até o momento se destaca o reator de manta de lodo (UASB), até mesmo por ser o mais difundido mundialmente; e por isso, o mais estudado e desenvolvido. Em função da composição dos microorganismos ativos utilizados e parâmetros envolvidos nas reações de biodegradação e formação do biogás dentro do reator, como o pH e a temperatura, os resultados mais buscados para otimizar a eficiência no processo são a maior taxa de aplicação (TA) ou carga orgânica volumétrica aplicada (COVa) para o menor tempo de detenção hidráulica (TDH) possível. Para Almança (1994), para o reator UASB, o seu lodo granulado é considerado o melhor inóculo possível para se alcançar TA entre 12 a 20 kgDQO/m^3 dia para um TDH de 1 a 3 dias.

Silva (2012) informa quanto ao desenvolvimento recente da tecnologia de biodigestão anaeróbia no Brasil, da proposta da empresa CODISTIL/DEDINI, de um novo biodigestor tipo UASB projetado pela holandesa Paques Environmental Technology (DRIESSEN et al., 1994). Nessa nova concepção, chamada de IC (Internal Circulation Reactors) há uma maior atividade do lodo, que é obtida através de um maior contato do substrato com o lodo. O projeto deste reator é a grosso modo, um reator UASB de dois estágios. Comparado ao UASB convencional, os reatores IC conseguem tratar carga duas vezes maior com um tempo de retenção hidráulica de aproximadamente 50%. Apesar das vantagens mencionadas e do custo de instalação ser 20% menor, este tipo de reator ainda não foi aplicado em destilarias de álcool no Brasil. Divulgado pela Procknor (2008), os reatores IC operam com temperaturas de 36ºC e sua TA está na faixa de 25 a 30 kgDQO/m^3 dia. Nestes reatores, o próprio gás circula no interior para homogeneizar o meio. Tais reatores são utilizados tipicamente em cervejarias para fins de controle de poluição. Poveda (2014) também esclarece que o advento do reator IC superou a deficiência experimentada pelo

UASB convencional, que é o arraste de excedente de lodo ativo para fora do reator, causada por forte turbulência da geração de biogás, quando submetido a altas cargas.

Já Fuess (2017) apurou em seu estudo, que os principais reatores de *Alta Taxa* usualmente aplicados no tratamento da vinhaça de cana-de-açúcar incluem o reator UASB e reatores de leito fixo, particularmente a versão chamada de APBR-Anaerobic Packed-bed Reactor e, em menor proporção, reatores de leito fluidizado AFBR-Anaerobic Fluidized-bed Reactor. Com destaque para o tipo UASB e APBR, onde a eficiência de remoção de DQO (ER_{DQO}) supera a 70% para aplicação de cargas entre 20 e 25 kgDQO/m^3 dia.

A Tabela 3, apresenta os rendimentos obtidos por autores em pesquisas de biodigestão de vinhaça em reatores de *Alta Taxa*.

Tabela 3 - Rendimento de reatores de *Alta Taxa* aplicados no tratamento da vinhaça.

reator (tipo)	**COV** (kgDQO/m^3 dia)	**ER_{DQO}** (%)	**TDH** (h) ou (d)	**autor**
UASB	30	72	2d	Souza et al. (1992)
UASB	23,3	71,3	2d	Sánchez Riera et al. (1985)
APBR	20,4	73,8	3,3d	Bories et al. (1988)
UASB	20	65	3,8d	Rintala (1991)
AFBR	20	80	11h	Fernandez et al. (2008)
UASB	22	69	6d	España Gamboa et al. (2012)
AFBR	26,19	70	0,5d	Siqueira et al. (2013)
UASB	25	74,6	1d	Junior et al. (2016)
UASB	22	88	-	Driessen et al. (1994)
UASB	24	45	-	Harada et al. (1996)
IC	30	-	-	Procknor (2008)
UASB	23	85	13h	Freire e Cortêz (2000)
UASB	30	69	9,8h	Freire e Cortêz (2000)

Fonte: Próprio autor.

2.4 BIOGÁS

O Biogás é uma mistura de gases proveniente de processo biológico de decomposição de material orgânico na ausência de ar; ou também chamado de biodigestão anaeróbia.

> Caracteriza-se o biogás como uma mistura combustível gasosa incolor, insolúvel, leve e de fraca densidade que, [...] pode ser proveniente da digestão anaeróbia de material orgânico. Estes compostos orgânicos podem ser resíduos sólidos ou líquidos originários das zonas urbana, industrial ou rural (RIBEIRO, 2011).

Semelhante ao gás natural, o biogás é produto da digestão anaeróbia de microorganismos; composto basicamente de Metano (CH_4) e Dióxido de Carbono (CO_2), respectivamente na proporção variável de 60% e 40%, com pequena presença de Nitrogênio (N), Hidrogênio (H), Oxigênio (O), gás Sulfídrico (H_2S) e traços de NH_4, como pode ser visto na Tabela 4; constituindo importante combustível alternativo para a produção de outras formas de energia como calor a partir de sua queima ou energia elétrica a partir de motores alternativos ou turbinas ligados a geradores. A composição do biogás é variável em função do tipo e concentração da biomassa a ser digerida, das condições físico-químicas do biodigestor e da presença de sulfatos e nitratos. No caso da vinhaça, Silva (2012) explica que sua composição vai determinar a taxa de produção do biogás e, proporcionalmente, a redução da DQO. Quanto maior for o teor de sólidos voláteis (SV) e a disponibilidade de nitratos, fosfatos e sulfatos, tanto mais rápido será o processo.

Tabela 4 - Composição do biogás em geral.

Gases	Porcentagem (%)
Metano (CH_4)	50 - 80
Dióxido de Carbono (CO_2)	30 - 40
Nitrogênio (N)	0,5 - 2,5
Oxigênio (O)	0,1 - 1
Ácido Sulfídrico (H_2S)	1 - 2
Hidrogênio (H)	1 - 2
Amônia (NH_3)	traços

Fonte: Adaptado de Coelho et al. (2004).

Nas zonas rurais, o emprego de biodigestores tem sido mais comum com o objetivo principal de saneamento de dejetos animais e produção de biofertilizantes, com crescente incremento de sistemas de extração e condução do biogás para aproveitamento em queimadores residenciais para aquecimento e cozimento; e num sistema mais avançado, o aproveitamento do biogás em moto-geradores para a produção de energia, de forma a suprir parte da eletricidade consumida nas residências e nos sistemas de cultivo e criação como iluminação, máquinas agrícolas, bombeamento e irrigação.

Na indústria sucroalcooleira, Cruz et al. (2013) constataram existir projetos de tratamento de vinhaça para produção de biogás, com sua aplicação na geração de energia elétrica, queima em caldeiras para geração de vapor de processo, para secagem de levedura e para movimentação da frota de máquinas e caminhões. Além dessas aplicações dadas ao biogás, Silva (2012) inclui a possibilidade de se gerar frio em sistema de refrigeração por absorção.

O biogás pode ser utilizado na queima direta, sem grandes dificuldades, apenas com ajustes na mistura de ar, para compensar a baixa densidade do combustível pela presença do CO_2. No entanto, a presença do ácido sulfídrico (H_2S), pode ser um problema pela sua alta toxidade e poder corrosivo para as partes metálicas de equipamentos, requerendo a introdução de sistemas de purificação do biogás para a sua utilização, sobretudo em larga escala nos processos industriais.

> O biogás é um gás corrosivo, exigindo cuidados especiais com os materiais empregados nos equipamentos utilizados. Esta característica é consequência da presença do sulfeto de hidrogênio (H_2S). Na combustão do biogás, este sulfeto é oxidado e transformado em dióxido de enxofre (SO_2). A amônia, também presente no biogás em baixas concentrações, é corrosiva para o cobre e pode emitir com produto da sua combustão os óxidos de nitrogênio (NOx) (POVEDA, 2014).

Dependendo da utilização a ser dada, o biogás pode ser consumido na sua composição original, ou pode ser parcialmente depurado dos seus componentes corrosivos, permitindo apenas a mistura básica de CH_4 e CO_2. E há também a possibilidade de separar o CO_2, mantendo apenas o combustível útil, o CH_4, que já vem sendo chamado de Gás Natural Renovável. Coelho et al. (2004) apresentam uma sequência resumida dos processos de depuração do biogás existentes:

- Remoção da umidade: que pode ser feita por condensação com glicóis, sílica gel e outros;

- Remoção de CO_2: por absorção física e química, adsorção em uma superfície contínua, separação por membranas, separação criogênica ou a partir de conversão química;

- Remoção de H_2S: por processos biológicos ou químicos; e

- Remoção de partículas: por processos mais comuns de lavagem em torre, centrífugos ou venturi.

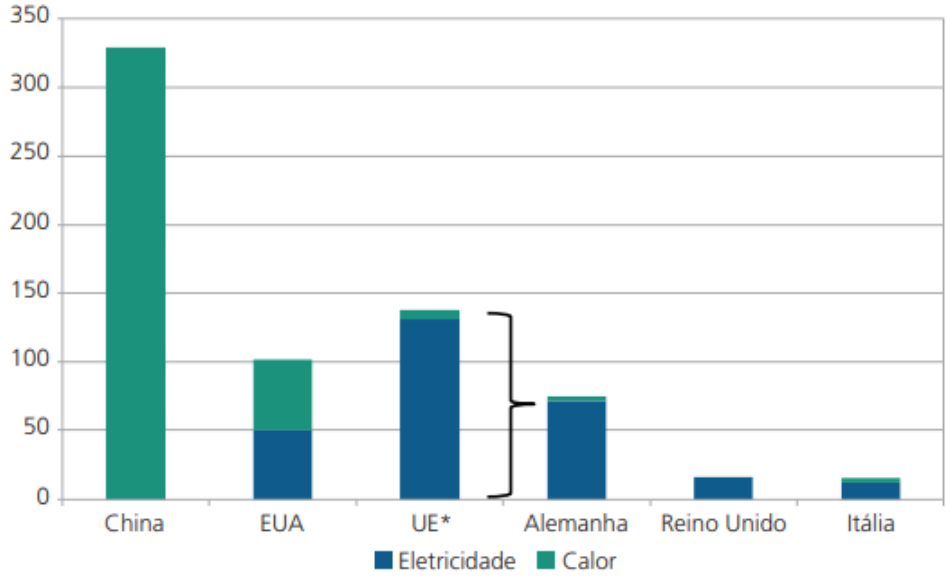
2.4.1 Panorama Mundial do Biogás

O biogás foi utilizado em aplicações domésticas e agrícolas por muitos anos. Ele foi muito utilizado da estabilização do lodo residual de esgotos desde o início dos anos 1930. Com o tempo seus benefícios foram reconhecidos e o biogás foi sendo produzido em larga escala, sobretudo na Europa e América do Norte.

Na Figura 22, estão elencados os maiores mercados produtores de biogás no mundo em 2013. A China é o maior consumidor de biogás, predominantemente para uso doméstico de cocção de alimentos e sistemas de aquecimento. Os Estados Unidos mantém uma proporção aproximada de 50% de uso para produção de calor e produção de eletricidade. Já na União Européia e outros países vizinhos, mais de 90% do biogás produzido é aplicado para geração de energia elétrica.

O relatório do IRENA (2017) também informa que muitos países começaram a adotar políticas de incentivo à produção do biogás como fonte de energia, como é o caso do Brasil e Coréia do Sul.

Figura 22 – Uso do biogás nos maiores mercados mundiais – 2013 (TWh/ano)

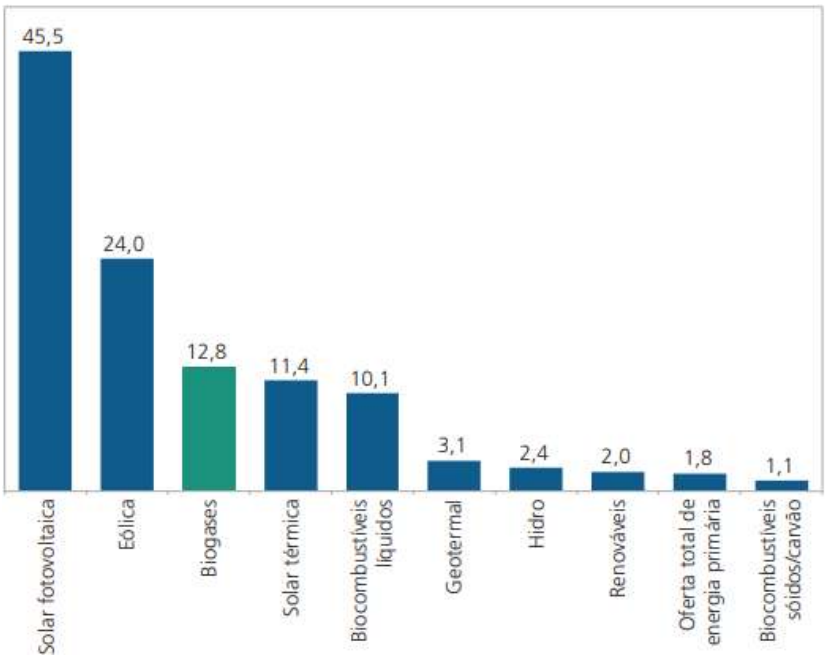


Fonte: adaptado de IRENA (2017).

Segundo relatório do IEA (2017), o biogás ainda representa uma parcela pouco significativa da produção primária de energia no mundo. Em 2015, menos de 0,3% do total produzido teve origem em biogases. Porém, foi a terceira fonte de energia renovável com

maior taxa de crescimento anual no período de 1990-2015, aumentando 12,8% a.a. e ficando atrás apenas da energia solar fotovoltaica e da eólica, e à frente da termo-solar e dos biocombustíveis líquidos. A Figura 23 apresenta as taxas de crescimento anuais na oferta por fontes de energia renovável.

Figura 23 – Taxa média anual de crescimento da oferta de energia e fontes renováveis – 1990-2015 (%)



Fonte: adaptado de IEA (2017).

2.4.2 Panorama Brasileiro do Biogás

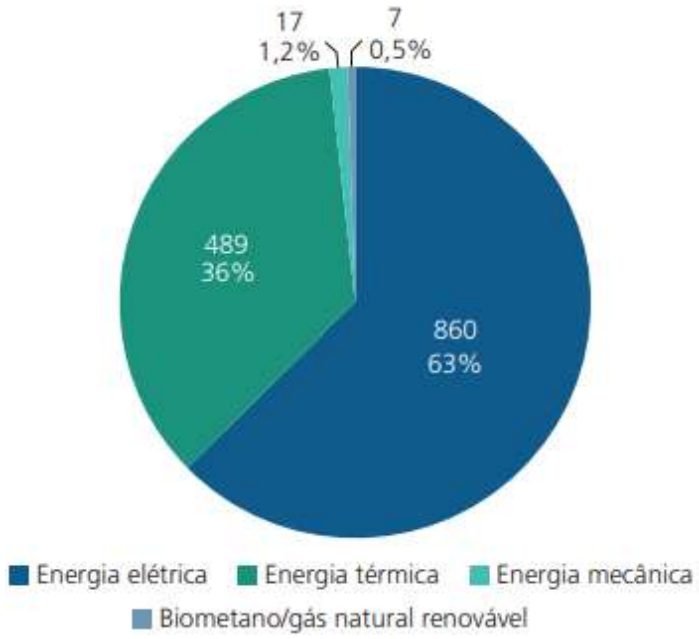
Milanez et al. (2018), constata que no Brasil, a energia produzida a partir do biogás entrou recentemente na fase de maturidade. A inclusão do biogás no plano de expansão da energia elétrica sinaliza que essa energia deverá emergir, nos próximos anos, como uma das principais formas de produção de energia renovável.

As principais fontes de produção de biogás em escala comercial no Brasil são: a parcela orgânica dos *Resíduos Sólidos Urbanos* (RSU); rejeitos da produção de açúcar e etanol de cana, como vinhaça e torta de filtro; e dejetos da pecuária suína. Em menor escala, também são utilizados: resíduos da produção de alimentos em geral (amido de mandioca e suco de laranja, como exemplos mais comuns); descarte de restaurantes; grama (caso de Itaipu); dejetos da pecuária bovina e avícola; e efluentes sanitários. Independentemente da

matéria-prima utilizada, a produção do biogás representa uma oportunidade de transformação de resíduos indesejados em fontes de energia, matéria-prima para fertilizantes e outros subprodutos economicamente aproveitáveis. A quase totalidade da produção de biogás no Brasil gera energia elétrica ou térmica, como se vê na Figura 24.

Na matriz energética brasileira, em geral, a participação do biogás em produção efetiva passou de 0,01%, em 2010 (15 mil tep de um total de 269 milhões tep), para 0,05%, em 2016 (137 mil tep de um total de 288 milhões tep).

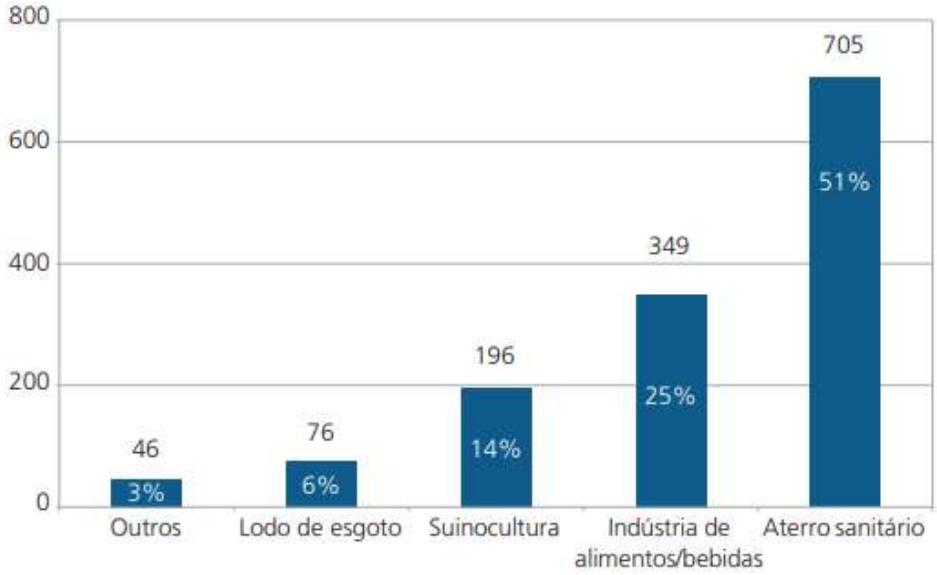
Figura 24 – Produção média de biogás por aplicação – 2015 (mil Nm^3/dia)



Fonte: adaptado de EPE (2017).

As principais fontes de produção de biogás, pela ordem, são os aterros sanitários, a indústria de alimentos e bebidas, a suinocultura e o lodo de esgoto, como se vê na Figura 25.

Figura 25 – Produção de biogás por substrato – 2015 (Nm^3/dia)



Fonte: adaptado de EPE (2017).

2.5 USINA SÃO MARTINHO

Segundo Alvarenga (2019), a história da São Martinho teve início na Itália, no final do século XIX, quando integrantes da família Ometto imigraram para o Brasil. No sítio Olaria montaram seu primeiro engenho de cana-de-açúcar, em 1914. Em 1932, na Fazenda Boa Vista, região de Limeira, produziram açúcar pela primeira vez. Em 1937, compraram a Usina Iracema em Iracemápolis – SP. Em 1949, adquiriram a Usina São Martinho, situada na cidade de Pradópolis - SP. Foto da usina São Martinho pode ser vista na Figura 26.

Figura 26 – Usina São Martinho.



Fonte: Moreno (2014).

Mendonça e Queda (2018) traz, que o sétimo filho do patriarca Antonio Ometto, Luiz Ometto reuniu os sobrinhos Pavan em sociedade, envolvendo as usinas Iracema, São Martinho e a fazenda Santa Cruz. Antônio, Mário, Virgílio e Novênio Pavan instalam o maquinário fornecido pela Dedini e iniciam a produção da usina Santa Cruz em 1947. E em 1949, com a aquisição da usina São Martinho, foi constituída a sociedade por cotas de responsabilidade limitada. Era o começo da Ometto/Pavan como um negócio empresarial.

Conforme divulgação da São Martinho (2018a), A usina São Martinho, localizada em Pradópolis, na região de Ribeirão Preto, a 330 km de São Paulo, é exemplo de pioneirismo e profissionalismo, se mantendo por muito tempo na vanguarda da indústria sucroalcooleira brasileira; e considerada a maior processadora de cana do mundo, com capacidade de moagem de 10 milhões de toneladas/safra. Hoje, com quase 5 mil colaboradores, a unidade se destaca como referência não apenas pelo porte, mas também pela excelência em seus processos agroindustriais. Diferentes programas de gestão, treinamento contínuo das equipes e sintonia entre as áreas agrícola e industrial, garantem à unidade maior produtividade com custos competitivos. Seu elevado índice de mecanização, praticamente em 100%, e sua preocupação com o meio ambiente são referências no mercado sucroenergético. A unidade desenvolveu o programa "Viva a Cana" de proteção ao canavial, e mantém o CEA (Centro de Educação Ambiental), uma estrutura de apoio e disseminação da preservação ambiental voltada principalmente para estudantes e comunidade.

Outro forte diferencial da unidade é sua área de logística, que traz vantagens competitivas como armazenamento de açúcar a granel e a existência de um ramal ferroviário interno, que possibilita o transporte de sua produção de etanol e açúcar por trens para o porto de Santos, combinando praticidade com menores custos.

Sua alta mecanização e gestão da frota proporciona grande capacidade de colheita, com precisão de relógio suíço. São 135 mil hectares cobertos por 68 máquinas, colhendo 970 toneladas de cana por dia (na região Centro Sul, a média é de 494 toneladas) (CANAONLINE, 2018).

Ramos (2019) documentou, que a partir da atual safra (2019/2020), os 135 mil hectares de canaviais da usina São Martinho passaram a operar sob a égide da indústria 4.0. Todas as máquinas e equipamentos em campo estão conectadas a sistema de informação em tempo real por meio de rede de internet própria, gerando informação em *Big Data*, com inteligência artificial. Nesse projeto é o uso da rede de internet, que permite a conexão das máquinas entre si e potencializa a velocidade e a autonomia dos equipamentos.

Ainda segundo a São Martinho (2018a), a usina São Martinho faz parte do grupo empresarial de mesmo nome (Grupo São Martinho), juntamente com as usinas Iracema, em Iracemápolis – SP, na região de Limeira, usina Santa Cruz, em Américo Brasiliense – SP e usina Boa Vista, em Quirinópolis – GO. Na Tabela 5 podem ser vistos dados das usinas do Grupo São Martinho.

Tabela 5 - Usinas do Grupo São Martinho.

USINAS	FUNDAÇÃO	CAPACIDADE DE MOAGEM (Mil ton)	QUADRO (colaboradores)
SÃO MARTINHO	1948	10,4	4.664
IRACEMA	1938	3,0	2.007
SANTA CRUZ	1945	5,6	3.408
BOA VISTA	2008	5,0	2.408
GRUPO SÃO MARTINHO	-	**24,0**	**12.487**

Fonte: São Martinho (2018a).

Após grande processo de aquisições e fusões no mercado sucroalcooleiro, motivados pelo programa Proálcool e, posteriormente pelo período de desregulamentação governamental, entre os principais grupos empresariais formados, se consolidou o Grupo São Martinho (BORN, 2017). Ao longo das décadas, suas usinas cresceram e se modernizaram, criando estrutura unificada e profissionalizada de administração, possibilitando novas oportunidades de investimento. O conceito de grupo empresarial uma vez consolidado, ajudou a fortalecer o desempenho, principalmente com a abertura do capital da companhia em 2007, buscando assim uma competitividade cada vez maior nos mercados em que atua (ALVARENGA, 2019).

As usinas do Grupo São Martinho possuem sistemas de cogeração, que já exportam excedente acima de 900 GWh para a rede de distribuição (SÃO MARTINHO, 2018b). Com base nos estudos realizados por Souza et al., (1992), na Usina São Martinho Pradópolis-SP, foi construído um reator UASB, em 1995, com volume total do reator de 5.200 m³ (FARIA, 2014). Hoje essa unidade de tratamento produz biogás a partir de 10% da vinhaça produzida, para consumida no processo de secagem de leveduras (PROCKNOR, 2008). E recentemente, conforme divulgado pela Panorama (2019), com o objetivo de viabilizar as políticas públicas para inserção do biogás e do biometano na matriz energética brasileira, a Siemens e o Grupo São Martinho se associaram a Associação Brasileira de Biogás e Biometano (ABiogás) para o desenvolvimento do insumo no Brasil.

Segundo dados divulgados pelo Grupo São Martinho, a última safra (2018/2019) atingiu recorde de produção de etanol, com a marca de 1.097.000 m^3 (SÃO MARTINHO, 2018b), como pode ser visto na Tabela 6. A uma proporção média de 12 litros de vinhaça para cada litro de etanol produzido; o que significa a produção de 13.164.000 m^3 de vinhaça produzidos na safra.

Tabela 6 - Resultados do Grupo São Martinho nas últimas safras.

		safra 2015/2016	safra 2016/2017	safra 2017/2018	safra 2018/2019
CANA PROCESSADA	(Mil ton)	20,0	19,3	22,2	20,5
AÇÚCAR	(Mil ton)	1.230	1.301	1.407	992
ETANOL	(Mil m^3)	750	667	953	1.097
ENERGIA ELÉTRICA	(GWh)	741	720	913	829

Fonte: São Martinho (2018b).

3 ANÁLISE ENERGÉTICA

3.1 DIMENSIONAMENTO DE BIODIGESTÃO PARA GERAÇÃO DE BIOGÁS

Neste capítulo, pretende-se demonstrar a viabilidade técnica para biodigestão da vinhaça e geração de biogás para geração de energia, em estudo de caso proposto para a usina São Martinho. Conforme visto anteriormente, esta usina já possui um reator UASB de 5200 m^3 que é utilizado segundo Procknor (2008), para tratamento de 10% da vinhaça produzida, com o objetivo de promover a secagem de levedura. Para que passe a tratar 100% da vinhaça, será necessário o dimensionamento da biodigestão a partir da capacidade de produção de etanol, portanto, da capacidade de produção da vinhaça, para determinar a capacidade de produção de biogás; bem como os investimentos necessários para complementar a estrutura de reatores UASB e instalação de parque de motogeradores para a produção de energia elétrica.

Na Tabela 7 a seguir, são apresentadas as principais características da vinhaça da usina São Martinho, conforme estudado por Cortez et al. (1996).

Tabela 7 - Características físico-químicas da vinhaça da usina São Martinho.

Parâmetro	Vinhaça (antes da biodigestão)	Vinhaça (depois da biodigestão)
pH	4,0	6,9
DQO (mg/l)	29.000	9.000
Nitrogênio total (mg/l)	550	600
Nitrogênio Amoniacal (mg/l)	40	220
Fósforo (mg/l)	17	32
Sulfato (mg/l)	450	32
Potássio (mg/l)	1.400	1.400

Fonte: Cortez et al. (1996).

Para o dimensionamento do processo de biodigestão, a capacidade de produção da vinhaça deve ser expressa em termos de fluxo diário; portanto, em função do período de operação da usina por safra da cana-de-açúcar. A São Martinho (2018b), divulga seus resultados por safras em períodos de abril a março (12 meses). Mas na prática as colheitadeiras costumam parar entre novembro e dezembro. Já, o período entre o final de

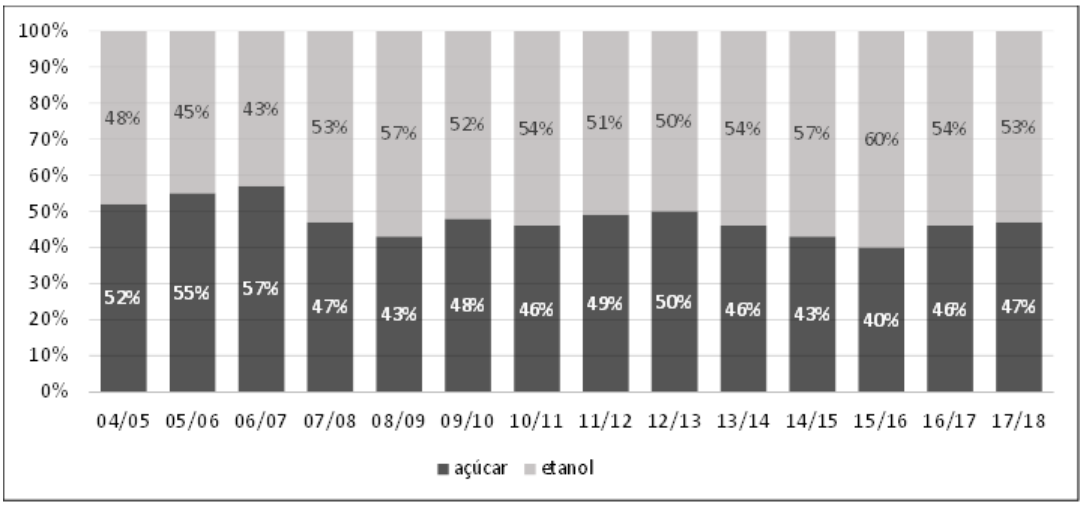
dezembro e março, normalmente é considerado o período de entressafra, quando as usinas param as moendas de cana e fazem manutenção das plantas industriais (TOLEDO, 2018). Dessa forma pode-se considerar o período produtivo da usina, de 9 meses por safra; equivalente a 6570 horas/ano. Por outro lado, é possível manter estoque de vinhaça, suficiente para estender o período de produção de biogás e, portanto, estender o período de produção de energia elétrica; dessa forma reservando um período mínimo necessário para a manutenção geral do parque de motogeradores; além de possibilitar menor investimento nas unidades de biodigestão. Neste caso, o período de produção de biogás e conversão em energia elétrica poderá ser de 11 meses, o equivalente a 8000 horas/ano, reservados 31 dias para as manutenções do parque de motogeradores, podendo ser concentrado ou distribuído ao longo do ano, de acordo com os planos de manutenção.

3.1.1 Capacidade de Produção de Etanol e Vinhaça da Usina São Martinho

Após a desregulamentação do mercado sucroalcooleiro, as indústrias do setor se estruturaram em grupos empresariais (como o Grupo São Martinho) e se organizaram em associações (como a ÚNICA – União da Indústria de Cana de Açúcar) onde informações institucionais, técnicas e de produção são reunidas e então reportadas aos órgãos de governo e meios de comunicação. Desde então, não se encontram dados de produção especificamente da usina aqui estudada; a usina São Martinho. Para tal, recorre-se às relações de proporção de etanol produzido por tonelada de cana processada. Segundo Leite et al. (2005), BCIJ (2006) e Novacana (2019), no processo de destilação do etanol produz-se entre 85 e 90 litros de etanol para cada tonelada de cana processada; e para Vian (2019) e Pinto (2009), no processo de refino do açúcar, para cada tonelada de cana processada são produzidos mais 10 a 12 litros de etanol a partir da fermentação do mel final.

Outro parâmetro necessário para se estimar a capacidade máxima de produção de etanol, é o índice de flexibilização do mix de produção açúcar/etanol da usina. De acordo com a ÚNICA (2010 apud Born, 2017), essa proporção pode variar entre 43% e 57%; compatível com a média dos índices por safra apresentados na Figura 27.

Figura 27 - Percentual de cana convertida em açúcar e etanol por safra (%).



Fonte: Adaptado de BRADESCO (2017).

A capacidade de produção de etanol se obtém pela soma da capacidade de produção de etanol sob processo de destilação de etanol, com a capacidade de produção de etanol sob processo de refino do açúcar; e a capacidade de produção de vinhaça se obtém pela aplicação da relação de proporção em volume mais adotada na literatura, de 12 litros de vinhaça para cada litro de etanol produzida:

$$CPEe = IMmax \cdot CM \cdot REe \quad (1)$$

$$CPEa = IMmin \cdot CM \cdot REa \quad (2)$$

$$CPE = CPEe + CPEa \quad (3)$$

$$CPV = Rve \cdot CPE \quad (4)$$

onde:

CPEe – Capacidade de produção de etanol sob processo de destilação de etanol (m^3)

CPEa – Capacidade de produção de etanol sob processo de refino de açúcar (m^3)

CPE – Capacidade de produção de etanol (m^3)

IMmax – Índice de mix máximo de produção (%)

IMmin – Índice de mix mínimo de produção (%)

CM – Capacidade de moagem de cana (ton)

REe – Relação de produção de etanol por cana processada sob processo de destilação de etanol (m^3/ton)

REa – Relação de produção de etanol por cana processada sob processo de refino de açúcar (m^3/ton)

CPV – Capacidade de produção de vinhaça (m^3)

Rve – Relação entre vinhaça e etanol produzidos em volume

3.1.2 Volume de biodigestão e do biogás produzível

Na sequência de cálculos a seguir é necessário conhecer os dados em termos de operação diária, a partir da capacidade de produção da vinhaça por safra. Através do método de Chernicharo (2007) para dimensionamento de biodigestor UASB, foram calculados o volume necessário de reatores para o processamento da vinhaça; e o fluxo previsto de biogás produzível, resultado da biodigestão.

$$CO = QV \cdot DQO \quad (5)$$

$$V = CO / COV \quad (6)$$

$$TDH = V / QV \quad (7)$$

$$PB = CO \cdot ER \cdot FC \quad (8)$$

onde:

CO – Carga Orgânica (kgDQO/dia)

DQO – Demanda Química de Oxigênio (kgDQO/m^3)
Valor adotado conforme Tabela 7

V – Volume de Biodigestão (m^3)

COV – Carga Orgânica Volumétrica (kgDQO/m^3 dia)
Valor arbitrado em 22 kgDQO/m^3 dia próximo da média apresentada em estudos da vinhaça, conforme apresentado na Tabela 3

TDH – Tempo de Detenção Hidráulica (horas)
O valor não pode ser inferior a 4,8 horas para que não se perca eficiências no processo (Chernicharo, 2007)

QV – Vazão da Vinhaça (m^3/dia)

PB – Produção de Biogás (Nm^3/dia)

ER – Eficiência de Remoção (%)
Valor médio adotado de 69%, conforme Tabela 3

FC – Fator de Conversão (0,45 Nm^3/KgDQO)
Valor adotado por Chernicharo (2007)

3.2 SELEÇÃO DE GRUPO DE MOTOGERADORES

Conforme explicado por Wang et al. (2015), os motores de combustão interna (MCI) a gás são originalmente desenvolvidos para queima de gás natural; e quando utilizados com biocombustíveis gasosos de menor PCI, como o biogás e o gás de síntese, o desempenho final do motor sofre alterações, principalmente em relação à eletricidade produzida e a eficiência elétrica.

Para a seleção do equipamento mais adequado a partir da vazão de biogás resultando do processo de biodigestão anaeróbia da vinhaça, foi elencada uma gama de produtos, disponíveis no mercado, já preparados para uso do biogás como combustível (sem a necessidade de adaptações), que foram avaliados com critério na capacidade de produção de potência e eficiência na conversão de energia.

A energia contida no combustível é conhecida pela relação entre seu fluxo mássico com o seu Poder Calorífico Inferior (PCI):

$$E_{comb} = m_{comb} \cdot PCI_{comb} \qquad (9)$$

onde:

E_{comb} - Energia do combustível (kW)

m_{comb} - Vazão mássica de combustível (kg/s)

PCI_{comb} - Poder Calorífico Inferior do combustível (kJ/kg)

A potência elétrica a ser gerada pelo motor depende de sua eficiência em converter a energia suprida pelo combustível. Segundo Sales (2008), esse aproveitamento energético varia na faixa entre 25% e 45%. Essa relação está expressa na seguinte equação:

$$\eta_{el} = E_p / E_{comb} \qquad (10)$$

onde:

ηel - Eficiência elétrica (%)

Ep - Potência elétrica produzida (kW)

4 ANÁLISE ECONÔMICA

Nesse capítulo é feita uma análise da viabilidade econômica para a implantação de parque de biodigestores UASB e de motogeradores de energia elétrica a partir do biogás produzido, para um hipotético cenário proposto de tratamento de 100% da vinhaça resultante da produção de etanol da Usina São Martinho. Considerando também, que a vários anos esse grupo empresarial já possui biodigestores do tipo UASB e larga experiência na conversão da biomassa.

Foi utilizado o método de Kehlhofer (1987) e Boehm (1987), adaptado por Silveira (1994) e muito aplicado por outros autores como Tuna (1999); Brizi et al. (2014); Boloy et al. (2011); Coronado, Yoshioka e Silveira (2011); e Xavier (2016). São equacionados os custos com investimentos, operacionais e manutenção, submetidos a uma taxa de juros, para o cálculo de receita anual prevista, com posterior análise de sensibilidade da viabilidade econômica.

Para o cálculo do custo de investimento com período de amortização de 1 a 10 anos a uma taxa de juros de 12%, determina-se o fator de anuidade pelas equações a seguir:

$$q = 1 + \frac{r}{10\mathbf{0}} \qquad (11)$$

$$f = \frac{q^k\,(q-1)}{q^k - \mathbf{1}} \qquad (12)$$

onde:

q - função de juros aplicada para o fator de anuidade

r - Taxa anual de juros (%)

f - Fator de anuidade (1/ano)

k - Período de retorno de investimentos (*payback*) (anos)

Como define Souza et al. (2004), o custo do biogás combustível gerado é função do custo de investimento nos biodigestores e custo de manutenção dos mesmos. A partir de estudos práticos, autores desenvolvem seus parâmetros para estimativa dos custos de investimentos em reatores anaeróbios, conforme as características do processo de biodigestão, que definem o dimensionamento do reator, em razão do tipo do efluente tratado.

Silveira Filho et al. (2018), ao estudar o tratamento de esgoto doméstico, chegaram a um custo de investimento em função do parâmetro de Nascimento e Ferreira (2007 apud Silveira Filho et al., 2008), de R$ 35,00/hab. Considerando o volume total de biodigestão por eles calculado, encontra-se o parâmetro de R$ 607,00/m^3 de reator.

E Salomon; Lora; Monroy (2007), apresentaram um valor de investimento em biodigestor do tipo UASB, equivalente a US$ 560,38/m^3dia de vinhaça tratada; e custo de operação e manutenção equivalente a 19% do custo de investimento.

Os cálculos para chegar ao custo do biogás ficam assim definidos:

$$C_{IBD} = \frac{I_{BD} \cdot f}{H \cdot E_{comb}} \quad (13)$$

$$C_{OMBD} = 0{,}19 \cdot C_{IBD} \quad (14)$$

$$C_{comb} = C_{IBD} + C_{OMBD} \quad (15)$$

onde:

C_{IBD} - Custo de investimento em biodigestor (US$/kW)

I_{BD} - Investimento em biodigestor (US$)

H - Regime de operação anual (horas/ano)

C_{OMBD} - Custo de operação e manutenção de biodigestor (US$/kW)

O custo global para a produção de potência elétrica em motores de combustão interna é calculado pela expressão abaixo. O primeiro termo da equação se refere ao custo de investimento no grupo gerador por motor de combustão interna; o segundo termo se refere ao custo do combustível biogás utilizado para alimentar os grupos geradores; e o terceiro termo se refere ao custo de manutenção do parque gerador de potência elétrica, definido por Boehm (1987) em US$ 0,015/kW. E o investimento em motor de combustão interna para geração de energia pode ser determinado pela expressão abaixo.

$$Cel_{MCI} = \frac{I_{MCI} \cdot f}{H \cdot Ep_{MCI}} + \frac{C_{comb} \cdot E_{comb}}{Ep_{MCI}} + CM_{MCI} \quad (16)$$

$$I_{MCI} = 400 \cdot 10^3 \cdot \left(\frac{Ep_{MCI}}{455}\right)^{0,9021} \quad (17)$$

onde:

Cel_{MCI} - Custo da potência elétrica produzida por motor de combustão interna (US$/kW)

I_{MCI} - Investimento em motor de combustão interna (US$)

Ep_{MCI} - Energia produzida por motor de combustão interna (kW)

CM_{MCI} - Custo de manutenção de motor de combustão interna (US$/kW)

A implantação do projeto passa a ser viável, ao verificar-se custos de produção de energia elétrica inferiores ao valor pago pela concessionária de energia. Nessa condição, pode-se obter fluxo econômico positivo que reflete no ganho de receita calculado pela equação abaixo:

$$R = Ep \,.\, H \,.\, (Pel - Cel) \quad (18)$$

onde:

R - Receita anual (US$/ano)

Pel - Preço de venda da potência elétrica produzida (US$/kW)

Cel - Custo da potência elétrica produzida (US$/kW)

Os preços de vendas da energia elétrica proveniente da cogeração para o *grid*, praticados pelo Grupo São Martinho são divulgados em períodos trimestrais, em seus relatórios de resultados, publicados em seu site, conforme podem ser vistos na Tabela 8.

Tabela 8 - Valor médio de venda de energia elétrica da São Martinho para o G*rid* por safra (R$/MWh).

	safra 2015/2016	safra 2016/2017	safra 2017/2018	safra 2018/2019	safra 2019/2020*
R$/MWh	223,3	166,3	225,1	235,5	231,3

* média do 1º trimestre da safra

Fonte: São Martinho (2017, 2018c, 2019b, 2019c).

5 RESULTADOS

5.1 DIMENSIONAMENTO DE BIODIGESTÃO E VOLUME DE BIOGÁS PRODUZÍVEL

Conforme previamente enunciado, a abordagem dada ao termo safra pode ter várias interpretações com relação ao período específico de operação de cada setor de uma usina; desde o ciclo de plantio, colheita, processamento da cana e escoamento de sua produção. Desta forma a o período de safra pode ser entendida como tendo 6, 8 e até 12 meses, como é na divulgação dos relatórios de resultados da usina (entre abril de um ano a março do ano seguinte). Havendo a possibilidade de se estocar a vinhaça produzida para um fluxo contínuo de tratamento e produção de biogás ao longo do ano, reservando um período mínimo adequado para as manutenções, tanto melhor será para se diluir os custos necessários para investimento.

Para se fazer uma análise da solução aqui proposta, os cálculos foram realizados para atender a 3 diferentes regimes de operação anual (6000, 7000 e 8000 horas/ano), de forma a se conhecer sua viabilidade sobre o período operacional de uma planta de biodigestão e geração de energia elétrica a partir do biogás produzido.

Obtenção do biogás produzível para regime de 8000 horas/ano:

(1) $CPEe = 0,57 \times 10,4 \times 85 = 503.880\ m^3$

(2) $CPEa = 0,43 \times 10,4 \times 10 = 44.720\ m^3$

(3) $CPE = 503.880 + 44.720 = 548.700\ m^3$

(4) $CPV = 12 \times 548.700 = 6.583.200\ m^3$

(5) $CO = (6.583.200/333) \times 29 = 573.312\ kgDQO/dia$

(6) $V = 573.312 / 22 = 26.060\ m^3$

(7) $TDH = 26.060 / 19.769 = 31,6\ horas$

(8) $PB = 573.312 \times 0,69 \times 0,45 = 178.013\ Nm^3/dia$

A Tabela 9 apresenta os volumes de vinhaça produzida a ser tratada, biodigestores necessários para atender à demanda e o fluxo de biogás produzível, para cada regime de operação anual.

Tabela 9 – Volumes de vinhaça, biodigestores e biogás calculados.

		6000 ha	7000 ha	8000 ha
QV	(m^3/dia)	26.333	22.545	19.769
V	(m^3)	34.711	29.719	26.060
PB	(Nm^3/dia)	237.114	203.008	178.013
Qtd Reatores		6,7	5,7	5,0

Fonte: Próprio autor.

Observa-se também na Tabela 9, que quanto maior o nível de atividade (maior período de operação), o fluxo de vinhaça tratada fica mais distribuída para tratamento em menor volume de biodigestão; o que deverá impactar em menor investimento em reatores e motogeradores. Tomando como referência um volume padrão de 5200 m^3 para cada biodigestor, significa dizer que para regime operacional de 6000 ha seriam necessários quase 2 reatores a mais na planta de tratamento de vinhaça, em relação ao regime de 8000 ha.

5.2 SELEÇÃO DE MOTOR PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

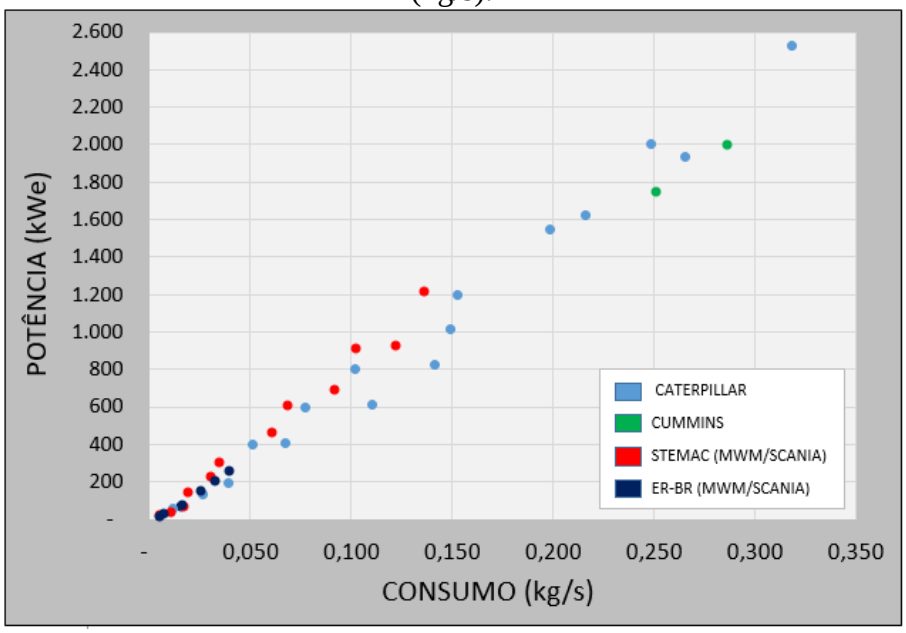
Sabe-se que a substituição de um combustível por outro de menor poder calorífico inferior (PCI), reflete no desempenho dos motores de combustão interna. Basicamente é feita a correção na mistura ar/combustível, porém afetando na capacidade de conversão da energia. Para a seleção de motor adequado para uso do biogás, preliminarmente foi escolhido um elenco de motores disponíveis no mercado, já adaptados pelo fabricante, para o consumo de biogás; não sendo necessário qualquer intervenção técnica ou correção nos cálculos para esta análise. Os motores estudados estão listados na Tabela 10 com seus dados. Foram elencados grupos geradores de 4 fornecedores, que foram analisados quanto ao porte e capacidade de produção de energia elétrica com relação ao consumo de combustível, conforme pode ser visto na Figura 28.

Tabela 10 – Motores analisados para seleção.

FABRIC.	MOTOR	MODELO	E_p (kWe)	h_{el} (%)	E_{comb} (kW)	m_{comb} (Nm3/h)	(kg/s)
Caterpillar	Caterpillar	G3306	76	26,7	284,64	45,34	0,015
Caterpillar	Caterpillar	G3406	137	27,7	494,58	78,78	0,026
Caterpillar	Caterpillar	G3412	194	26,5	732,08	116,62	0,039
Caterpillar	Caterpillar	CG132-8	400	41,6	961,54	153,17	0,051
Caterpillar	Caterpillar	G3508A	408	32,2	1.267,08	201,84	0,067
Caterpillar	Caterpillar	CG132-12	600	41,4	1.449,28	230,86	0,077
Caterpillar	Caterpillar	G3512 LE	615	29,6	2.077,70	330,97	0,110
Caterpillar	Caterpillar	CG132-16	800	41,7	1.918,47	305,60	0,102
Caterpillar	Caterpillar	G3516A	824	31,0	2.658,06	423,42	0,141
Caterpillar	Caterpillar	G3516A+	1.015	36,1	2.811,63	447,88	0,149
Caterpillar	Caterpillar	CG170-12	1.200	41,8	2.870,81	457,31	0,152
Caterpillar	Caterpillar	CG170-16	1.550	41,4	3.743,96	596,39	0,199
Caterpillar	Caterpillar	G3520C	1.622	39,8	4.075,38	649,19	0,216
Caterpillar	Caterpillar	G3520C	1.936	38,7	5.002,58	796,89	0,266
Caterpillar	Caterpillar	CG170-20	2.000	42,7	4.683,84	746,11	0,249
Caterpillar	Caterpillar	CG260-12	2.530	42,2	5.995,26	955,01	0,318
Caterpillar	**Caterpillar**	**CG260-20**	**3.370**	**43,1**	**7.819,03**	**1.245,53**	**0,415**
Stemac	MWM	G229-4	26	31,9	81,61	13,00	0,004
Stemac	MWM	G4.12T	46	24,4	188,33	30,00	0,010
Stemac	MWM	G6.12T	70	22,8	307,61	49,00	0,016
Stemac	SCANIA	OC13A	146	40,8	357,83	57,00	0,019
Stemac	SCANIA	OC13A	233	40,8	571,27	91,00	0,030
Stemac	**SCANIA**	**OC16A**	**306**	**47,8**	**640,32**	**102,00**	**0,034**
Stemac	SCANIA	2OC13A	466	40,8	1.142,54	182,00	0,061
Stemac	**SCANIA**	**2OC16A**	**612**	**47,8**	**1.280,64**	**204,00**	**0,068**
Stemac	SCANIA	3OC13A	699	40,8	1.713,80	273,00	0,091
Stemac	**SCANIA**	**3OC16A**	**918**	**47,8**	**1.920,97**	**306,00**	**0,102**
Stemac	SCANIA	4OC13A	932	40,8	2.285,07	364,00	0,121
Stemac	**SCANIA**	**4OC16A**	**1.224**	**47,8**	**2.561,29**	**408,00**	**0,136**
Cummins	Cummins	C1750N6C	1.750	37,1	4.716,98	751,39	0,250
Cummins	Cummins	C2000N6C	2.000	37,1	5.390,84	858,73	0,286
ER-BR	MWM	GMWM30	20	22,8	87,89	14,00	0,005
ER-BR	MWM	GMWM50	32	25,5	125,55	20,00	0,007
ER-BR	MWM	GMWM80	55	25,8	213,44	34,00	0,011
ER-BR	MWM	GMWM120	77	26,1	295,05	47,00	0,016
ER-BR	SCANIA	GSCA250	160	34,0	470,83	75,00	0,025
ER-BR	SCANIA	GSCA330	211	34,7	608,93	97,00	0,032
ER-BR	SCANIA	GSCA420	260	35,1	740,76	118,00	0,039

Fonte: Próprio autor.

Figura 28 – Rendimento de motores – Potência produzida (kWe) X Consumo de combustível (kg/s).



Fonte: Próprio autor.

Nota-se que motores de maior porte tendem a gerar energia com melhor eficiência elétrica. Ainda que os equipamentos da Stemac tenham se destacado nesta análise, eles não possuem porte suficiente para atender fluxo de biogás gerado, pois seria necessário investir em pelo menos 65 unidades do seu maior equipamento. Sendo assim, foi adotado o maior equipamento da Caterpillar (CG260-20), nas seguintes quantidades, conforme regime de operação: 8 para 6000 ha, 7 para 7000 ha e 6 para 8000 ha, com investimentos da ordem de US$ 15,8 milhões, US$ 13,7 milhões e US$ 12,2 milhões, respectivamente.

5.3 ANÁLISE ECONÔMICA

Para refletir sobre a análise econômica realizada, vale antes ressaltar que valores de sequência histórica, em face das diferenças cambiais entre o Real e o Dolar, devem ser cuidadosamente tratadas, por conta das oscilações e incertezas do mercado; sobretudo ao se tratar de preços de combustíveis e eletricidade de forma a se evitar distorções nos resultados. Na Tabela 11, estão os parâmetros utilizados para a sequência de cálculos econômicos.

Tabela 11 – Parâmetros para cálculo de análise econômica.

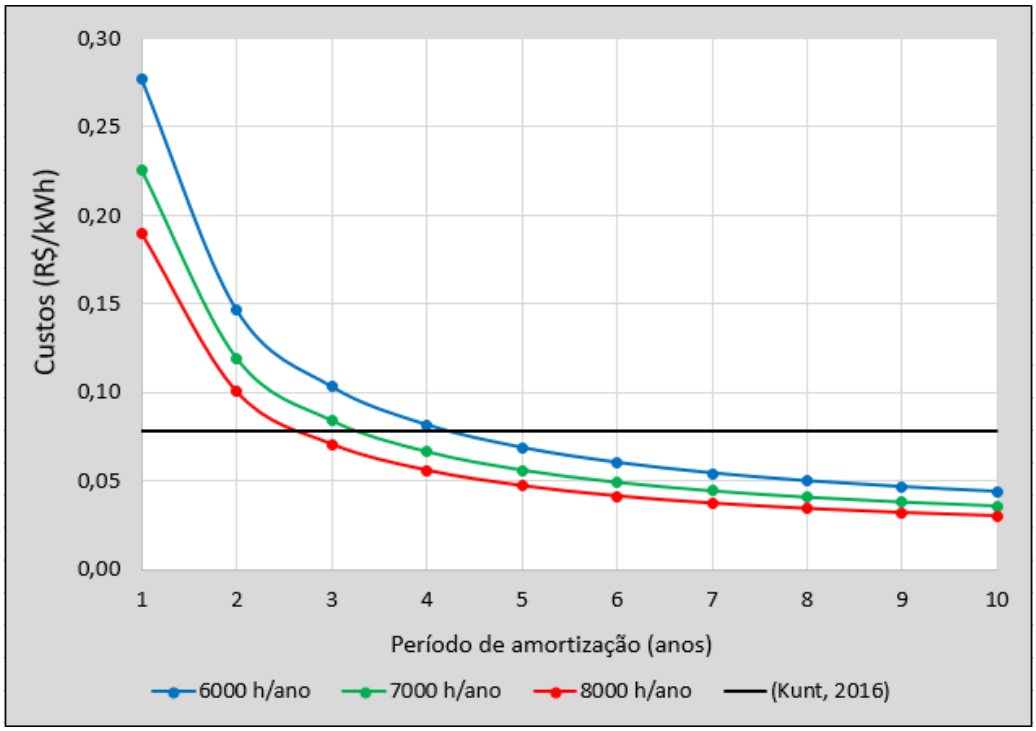
Parâmetros	Valor	Referência
Custo de manutenção de grupo gerador (CM_{MCI})	0,015 US$/kW	Boehm (1987)
Investimento com biodigestor (I_{BD})	560,38 US$/$m^3$ efluente	Salomon et al. (2007)
Custo de operação e manutenção de biodigestor (C_{OMBD})	0,19 x C_{IBD}	Salomon et al. (2007)
Energia produzida por motor de combustão interna (Ep_{MCI})	3370 kW *	Caterpillar (2013)
Eficiência elétrica do motor de combustão interna (hel)	43,1%	Caterpillar (2013)
Preço médio da energia elétrica vendida para o *Grid*	R$ 230,00 / MWh	São Martinho (2017; 2018; 2019)
PCI do biogás	22.600 kJ/Nm^3	.-
Periodo de operação (H)	6.000 ha / 7.000 ha / 8.000 ha	.-
Periodo de amortização (k)	10 anos	.-
Taxa de câmbio (USD)	R$ 4,10 / US$	.-
Taxa de juros (r)	12%	.-

* Potência gerada pelo motor selecionado

Fonte: Próprio autor.

A Figura 29 traça as curvas dos custos do biogás ao longo do período de amortização para os 3 regimes de operação anuais (6.000 ha, 7.000 ha, e 8.000 ha). O custo do biogás está formado pelos custos de investimentos em reatores do tipo UASB, somados aos custos de operação e manutenção dos mesmos, com o dimensionamento suficiente para atender ao fluxo de geração da vinhaça, dentro da safra. Observa-se que para os 3 regimes operacionais, os custos apresentam declínio acentuado entre o 2º e 3º ano, quando atingem o valor calculado por Kunt (2016), incluído na análise como referência, e seguem em declínio mais lento nos anos seguintes.

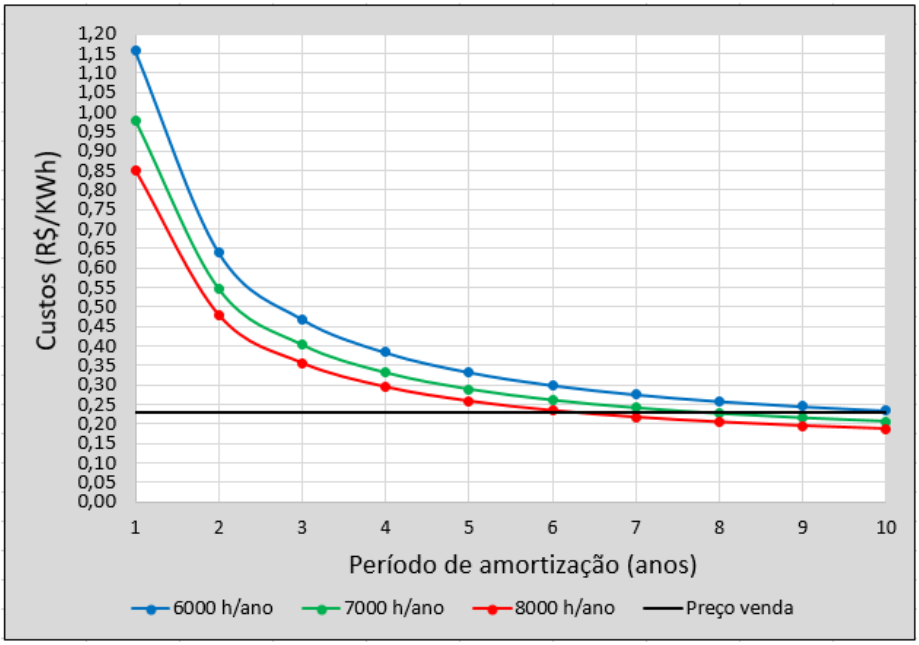
Figura 29 – Curvas de custos de biogás à taxa de juros anual de 12% em 3 regimes de operação (6000 ha, 7000 ha e 8000 ha) em R$/kWh.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 30 apresenta as curvas de custos da energia elétrica gerada para os 3 regimes de operação (6000 ha, 7000 ha e 8000 ha). O processo de amortização se apresenta bem ponderado para a tomada de decisão em investimentos, sendo mais interessante considerar para o regime de 8000 ha de operação, onde próximo do 6º ano, o custo atinge o valor médio praticado de venda de energia para o *Grid*. Nos demais regimes isso ocorre mais tarde, entre o 8º e 10º ano. Levando em consideração a vida útil dos equipamentos em 20 anos, na pior condição, ainda restaria metade desse tempo para operação rentável.

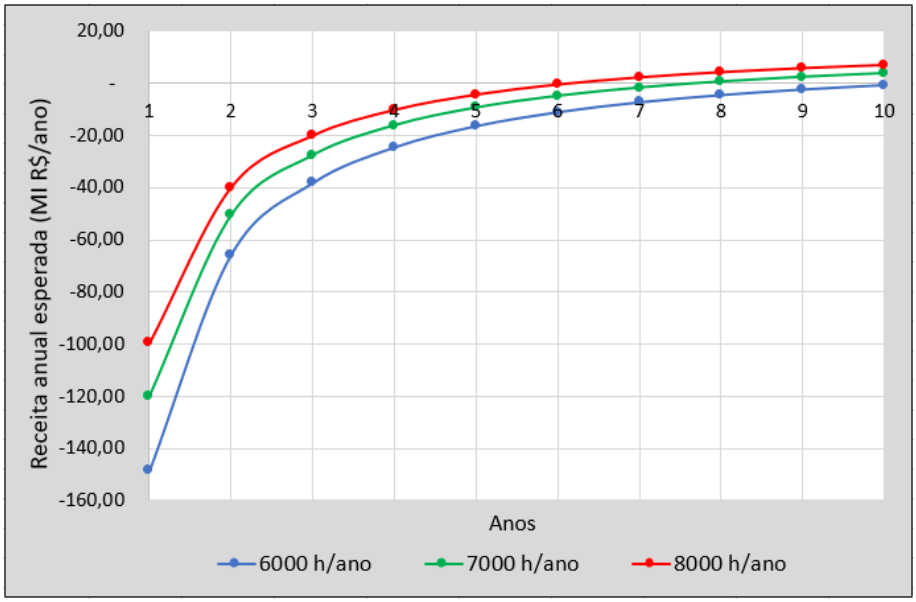
Figura 30 – Curvas de custos da energia elétrica gerada à taxa de juros anual de 12% em 3 regimes de operação (6000 ha, 7000 ha e 8000 ha) em grupos geradores por motor de combustão interna em R$/kWh.



Fonte: Próprio autor.

Outra forma de apresentar a amortização dos custos, está demonstrado na Figura 31 em termos de valores de receita esperada com a venda da energia produzida para os 3 diferentes regimes de operação anual (6000 ha, 7000 ha e 8000 ha). O montante do valor investido já decai em torno de 60% ao chegar no 2º ano e nos anos 6, 8 e 10, ocorre a inflexão no fluxo de caixa, passando a registrar lucros.

Figura 31 – Receita anual esperada pela venda da energia elétrica gerada em R$.



Fonte: Próprio autor.

Observando a Figura 31, os pontos de mudança de valores negativos para valores positivos, são os mesmos que indicam o período de amortização dos investimentos do projeto para cada regime de operação proposto. Da mesma forma que observado na Figura 30, quanto maior o regime de operação, mais rápido o projeto passa a acumular receita positiva.

6 CONCLUSÕES

A vinhaça é resíduo industrial com alto poder poluidor e com alto impacto ao meio ambiente, por conta do seu manejo e destinação atualmente praticados nas usinas de cana-de-açúcar. Depois dos *Resíduos Sólidos Urbanos* (RSU), a vinhaça é o resíduo em maior volume entre os efluentes industriais, como fonte de biogás. Proveniente das destilarias, sobretudo da crescente produção do etanol combustível, a vinhaça ainda é pouco valorizada como biomassa e fonte de combustíveis mais limpos como o biogás e o biometano. No Brasil, apenas 5% da vinhaça é tratada em concentradores e biodigestores. Da mesma forma, a energia proveniente de biocombustíveis e do lixo participam em apenas 9,4% da matriz de energia primária mundial.

A tecnologia de biodigestão anaeróbia está em pleno desenvolvimento, com o aprimoramento de processos, da arquitetura de reatores, bem como dos micro-organismos inoculadores da decomposição. Porém constatou-se nesse trabalho, baixa gama de publicações sobre o tema, como também verificaram-se poucos trabalhos que descrevam a história e classificação de biodigestores; onde se destacam os reatores de "*Alta Taxa"*, cujo desenvolvimento tecnológico se justifica para o tratamento de resíduos produzidos em larga escala, como águas residuárias (esgotos) e efluentes de processos industriais como a vinhaça.

Os resultados do presente estudo, legitimam o cenário proposto, de produzir energia elétrica a partir do tratamento por biodigestão de 100% da vinhaça produzida na usina São Martinho; que vem a ser a maior usina de cana-de-açúcar do Brasil, com capacidade de moagem de 10,4 mil toneladas de cana; que em regime operacional de 8000 ha, tem capacidade de produção de 548,7 milhões de litros de etanol e 6,583 bilhões de litros de vinhaça, que tratada pode gerar 59,3 bi Nm^3 de biogás. Pois a usina São Martinho hoje trata apenas em torno de 10% de sua vinhaça para uso do biogás em secadores de leveduras; e uma parcela ainda é utilizada na fertirrigação in-natura da lavoura.

Este trabalho apresenta a possibilidade de tratamento de 100% da vinhaça produzida na usina São Martinho, reduzindo sua exposição nociva ao meio ambiente, pela liberação de CO_2 e CH_4 na atmosfera em sua estocagem, transporte e fertirrigação in-natura. E a vinhaça, que anteriormente era considerada rejeito industrial, rico em material orgânico e alto potencial poluidor para a atmosfera, lençol freático e cursos d'água; passa a ser considerada como mais uma biomassa da qual pode-se extrair energia mais limpa; com a vantagem do efluente final da biodigestão manter os teores de N-P-K (nitrogênio, fósforo e potássio), resultando em produto fertilizante de uso seguro do ponto de vista sanitário.

O biodigestor do tipo UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor) é o equipamento classificado entre os chamados de *"Alta Taxa"*, mais difundido e estudado no mundo para tratamento de esgotos e efluentes industriais. Por isso, sua escolha para a situação proposta é a mais indicada, uma vez que sua alta taxa de aplicação (COV – Carga Orgânica Volumétrica) acima de 20 kg DQO/m^3 dia, e baixo tempo de detenção hidráulica (TDH), permitem menores investimentos para uma estrutura mais compacta. Já existem reatores mais modernos em uso, como os IC (Internal Circulation Reactor), mais compactos e mais eficientes; porém ainda pouco experimentados, constituindo grande oportunidade para investigações futuras.

Tecnicamente, a escolha do motor Caterpillar CG260-20 foi acertada para atender ao dimensionamento do parque de geração de energia, com o investimento em 6 grupos geradores, já preparados pelo fabricante para funcionamento por biogás; em regime operacional mais otimizado de 8000 ha, tem capacidade de geração de 161,7 GWh de energia elétrica a ser vendida para a rede distribuidora (*Grid*).

A análise econômica tem contribuição fundamental para a avaliação do potencial de geração e uso do biogás combustível para a geração de energia, que representa ínfimo 0,05% da matriz energética brasileira, o que se também reflete em poucas publicações sobre o assunto, fazendo com que ainda hajam incertezas sobre a viabilidade de projetos em biogás. Neste trabalho, foi possível demonstrar a viabilidade econômica para a produção e consumo do biogás para a produção de energia elétrica para ser exportada para o *Grid*, no limite da capacidade de produção da usina São Martinho. Pelo método adotado, foi alcançado um valor atraente para o biogás em comparação ao valor encontrado por Kunt (2016), de R$ 0,07/kWh, aqui usado como referência. Com base nos custos de investimentos, operação e manutenção de 5 biodigestores do tipo UASB e parque de geração de energia elétrica, o resultado foi um custo do biogás entre R$ 0,03/kWh e R$ 0,04/kWh. Na composição final dos custos da eletricidade produzida, a avaliação do tempo de amortização validou a condição de maior regime de operação anual (8000 ha), quando a partir do 6º ano de atividade o empreendimento passa a ser rentável. O valor de referência adotado para a energia elétrica, foi o de venda já praticado pelo Grupo São Martinho a partir de seus sistemas de cogeração, numa média adotada de R$ 230,00/GWh, que sofre flutuações a cada trimestre. O custo final calculado para a energia elétrica produzida na usina São Martinho a partir de sua vinhaça chegou a R$ 186,00/GWh.

Com todo o exposto, este trabalho contribui com a possibilidade técnica e econômica de se deslocar os vetores de destinação da abundante vinhaça gerada na indústria

sucroalcooleira, em parte ou no todo, para o seu tratamento e conversão em biogás combustível; investindo em sistema rentável, para o aproveitamento racional do efluente, produzindo energia mais limpa e promovendo a mitigação dos efeitos nocivos ao meio ambiente.

REFERÊNCIAS

ALMANÇA, R. A. **Avaliação do uso da vinhaça da cana-de-açúcar na geração de energia elétrica:** estudo de caso. 1994. 144 f. Dissertação (Mestrado em Energia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.

ALVARENGA, P. Empresas fora do radar: São Martinho (SMTO3). **Janus Investimentos**. 11 set. 2019. Disponível em: https://janusinvestimentos.com/ultimas-noticias/empresas-fora-do-radar-sao-martinho-smto3/. Acesso em: 06 out. 2019.

BANCO DE COOPERAÇÃO INTERNACIONAL DO JAPÃO - BCIJ. **Estudo prospectivos para fomento dos biocombustíveis no Brasil:** relatório final do Banco de Cooperação Internacional do Japão. Brasília, 2006.

BERNAL, A. P. *et al*. Vinasse biogas for energy generation in Brazil: an assessment of economic feasibility, energy potential and avoided CO_2 emissions. **Journal of Cleaner Production,** Amsterdam, v.151, p.260-271, 2017.

BOEHN, R. **Design analysis of thermal systems.** New York: John Wiley, 1987.

BOLOY, R. A. M. *et al.* Ecological impacts from syngas burning in internal combustion engine: Technical and economic aspects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews,** v.15, p. 5194-5201, 2011.

BORGES, E. A. M. A.; DOS SANTOS, A. S. P. Desenvolvimento da aplicação dos reatores anaeróbios de manta de lodo (UASB) no Brasil. **Revista Internacional de Ciências**, v. 7, n. 2, p. 247-264, 2017.

BORIES, A.; RAYNAL, J.; BAZILE, F. Anaerobic digestion of high-strength distillery wastewater (cane molasses stillage) in a fixed-film reactor. **Biological Wastes**, v. 23, n. 4, p. 251-267, 1988.

BORN, E. D. V. **Descrição do cenário do setor sucroenergético brasileiro de 2000 a 2016:** um estudo de caso. 2017. 60 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado de Economia) – Instituto de Economia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

BRADESCO. Departamento de Pesquisas e Estudos Econômicos. Açúcar e etanol**. Economia em dia**. Disponível em: https://www.economiaemdia.com.br/EconomiaEmDia/pdf/infset_acucar_etanol.pdf. Acesso em: 26 ago. 2018.

BRASIL. **Decreto n. 19717:** estabelece a aquisição obrigatória de álcool, na proporção de 5% da gasolina importada, e dá outras providências. Disponível em: http://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/1930-1939/decreto-19717-20-fevereiro-1931-518991-publicacaooriginal-1-pe.html. Acesso em: 26 ago. 2018.

BRASIL. Ministério do Interior. Portaria nº 323, de 29 de novembro de 1978**:** proíbe o lançamento de vinhoto em coleções de água. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil,** Poder Executivo, Brasília/DF, seção 1, p. 19456, 1978. Disponível em: http://faolex.fao.org/docs/pdf/bra14330.pdf. Acesso em: 26 ago. 2018.

BRASIL. Ministério do Interior. Portaria nº 158, de 03 de novembro de 1980: mantém proibição de lançamento direto ou indireto de vinhoto em qualquer coleção hídrica. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília/DF, seção 1, p. 22250, 1980. Disponível em: http://faolex.fao.org/docs/pdf/bra14334.pdf. Acesso em: 26 ago. 2018.

BRIZI, F. *et al.* Energetic and economic analysis of a brazilian compact cogeneration system: Comparison between natural gas and biogas. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.38, p.193-211, 2014.

BUSATO, R. **Desempenho de um filtro anaeróbio de fluxo ascendente como tratamento de efluente de reator UASB:** estudo de caso da ETE de Imbituva. 2004. 214f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

CAMARGO, C. A. **Conservação de energia na indústria do açúcar e do álcool:** manual de recomendações. São Paulo: IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1990.

CANAONLINE. **Nos últimos 10 anos, a usina São Martinho não teve parada por atraso de cana colocada na esteira.** 2018. Disponível em: http://www.canaonline.com.br/conteudo/nos-ultimos10-anos-a-usina-sao-martinho-nao-teve-parada-por-atraso-de-cana-colocada-na-esteira.html. Acesso em: 06 out. 2019.

CASTANHO, D. S.; ARRUDA, H.J. Biodigestores. *In:* SEMANA DE TECNOLOGIA EM ALIMENTOS. 6., 2008, Ponta Grossa. **Anais** [...]. Ponta Grossa: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2008.

CATERPILLAR. **Resumo de dados de catálogo da série de geradores a gás.** 2013. Disponível em: http://s7d2.scene7.com/is/content/Caterpillar/LEXE0422-04. Acesso em: 05 out. 2019.

COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS - CEMIG. **Análise da geração de energia a partir da biomassa.** Belo Horizonte, 2003.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. **Norma técnica P. 4231**: vinhaça: critérios e procedimentos para aplicação no solo agrícola. 2015. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/2013/11/NTC-P4.231_Vinha%C3%A7a_-Crit%C3%A9rios-e-procedimentos-para-aplica%C3%A7%C3%A3o-no-solo-agr%C3%ADcola-3%C2%AA-Ed-2%C2%AA-VERS%C3%83O.pdf. Acesso em: 20 mar. 2019.

CHERNICHARO, C. A. L. **Biological wastewater treatment series:** anaerobic reactors. v.4. Belo Horizonte: DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL - DESA/UFMG, 2007.

COELHO, S. T. *et al.* Programa de uso racional de energia e fontes alternativas - PUREFA. *In:* ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 5., 2004, Campinas. **Proceedings** [...]. Campinas, 2005.

COLDEBELLA, A. **Viabilidade do uso do biogás da bovinocultura e suinocultura para geração de energia elétrica e irrigação em propriedades rurais.** 2006. 74 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) –Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel- PR, 2006.

CORAZZA, R. I. Impactos ambientais da vinhaça: controvérsias científicas e lock-in na fertirrigação? *In:* CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA E SOCIOLOGIA RURAL, 44., 2006, Fortaleza. **Anais** [...]. Fortaleza: Sociedade Brasileira de Economia e Sociologia Rural, 2007.

CORONADO, C. J. R. **Analise técnica**: econômica de um gaseificador de biomassa de 100 kg/h para acionamento de um motor de combustão interna. 2007. 195f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2007.

CORONADO, C. R.; YOSHIOKA, J. T.; SILVEIRA, J. L. Electricity, hot water and cold water production from biomass. Energetic and economic analysis of compact system of cogeneration run with woodgas from a small gasifier. **Renewable and Sustainable Energy Reviews,** v.36, p. 1861-1868, 2011.

CORTEZ, L. A. B.; FREIRE, W. J.; ROSILLO-CALLE, F. Biodigestion of vinasse in Brazil. **Internacional Sugar Journal**, v. 100, n. 1196, 1996.

COSTA, E. S. **Proposta de protocolo para projeto de engenharia de reatores anaeróbios de fluxo ascendente com manta de lodo.** 2009. 96 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Ambiental) – Universidade Estadual do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

CRUZ, L. F. L. S. *et al.* Análise da viabilidade técnica, econômica e ambiental das atuais formas de aproveitamento da vinhaça: fertirrigação, concentração e biodigestão. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, n. 29, p. 111-127, 2013.

CUMMINS. **Folder grupos geradores a gás Cummins 2011.** São Paulo: Cummins, 2011. 2p. Disponível em: https://www.cummins.com.br/sites/br/files/cpg_015_laminaesb_final_web-04.pdf. Acesso em: 09 out. 2019.

DRIESSEN, W. J. B. M.; TIELBAARD, M. H.; VEREIJKEN, T. L. F. M. Experience on anaerobic treatment of distillery effluent with the UASB process. **Water science and technology**, v. 30, n. 12, p. 193, 1994.

ER-BR, **Folder grupos geradores a gás.** Londrina: ER-BR:, 2p. Correios Eletrônicos Recebidos de claret@erbrcom.br. Acesso em: 09 out. 2019.

ETMINAM, M. *et al.* Radiative forcing of carbon dioxide, methane, and nitrous oxide: a significant revision of the methane radiative forcing: greenhouse gas radiative forcing, **Geophys. Res. Lett**., v. 43, n. 12, p. 614–623, 2016.

FARIA, A. A. A. **Fermentação metanogênica mesofílica de melaço e termofílica de vinhaça em reatores UASB.** 2014. 59f. Dissertação (Mestrado em Microbiologia Agropecuária) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e

Veterinárias, Jaboticabal, 2014.

FERRAZ, D. Tecnologia USP/EESC: digestão anaeróbia transforma vinhaça em hidrogênio. **Rural Pecuária**, 2013. Disponível em: http://blog.ruralpecuaria.com.br/2013/07/tecnologia-uspeesc-digestao-anaerobia.html. Acesso em: 15 jun. 2017.

FERREIRA, J. C. B.; SILVA, J. N. Biodigestor: aplicações e potencialidades: um estudo de caso do IFMG campus Bambuí. *In:* SEMANA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO IFMG, Bambuí, 2009. **Anais** [...] Bambuí: IFMG, 2009.

FREIRE, W. J.; CORTEZ, L. A. B. **Vinhaça de cana-de-açúcar.** Guaíra: Livraria e Editora Agropecuária, 2000.

FUESS, L. T. **Biodigestão anaerobia termofílica de vinhaça em sistemas combinado do tipo acidogênico-metanogênico para potencialização da recuperação de bioenergia em biorrefinarias de cana-de-açúcar de primeira geração.** 2017. 346 f. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

GIMENEZ, A. R. *et al.* O aumento da produtividade e a busca pela excelência na produção do etanol brasileiro: uma história de sucesso. **Research, Society and Development**, v. 7, n. 2, p. 01-19, 2018.

GLÓRIA, N.; ORLANDO FILHO, J. Aplicação de vinhaça: um resumo e discussões sobre o que foi pesquisado. **R. Álcool Açúcar**, v.16, p.32-39, 1984.

GOLDEMBERG, J. *et al.* Ethanol learning curve: the brazilian experience. **Biomass and Bioenergy**, v. 26, n. 3, 2003.

GOVONI, J. B. **Análise da viabilidade técnica e econômica da utilização do uso do biogás proveniente de resíduos de grandes granjas.** 2011. 77 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Energia, Faculdade de Engenharia, Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

GRANATO, E. F.; SILVA, C. L. Geração de energia elétrica a partir do resíduo vinhaça**.** *In:* ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 4., 2002, Campinas. **Proceedings** [...]. Campinas, 2002.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA. **Statistics 2017**: renewables information: Overview (2017 overview). Paris, 2017.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. **World energy outlook 2018**, Paris, 2018.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. Climate change 2007: syntesis report. **Contribution of working groups I, II and III to the fourth assesment report of the intergovernmental panel on climate change.** Geneva, 2007. 104p.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY - IRENA. **Biogas for road vehicles:** technology brief. Abu Dhabi, 2017.

JORGE, L. H. A.; OMENA, E. **Biodigestor**: dossiê técnico. Manaus: SENAI/ AM- Escola

SENAI Antônio Simões, 2012.

KEHLHOFER, R. A Comparison of power plants for cogeneration of heat and electricity. **BBC Brown Boveri Ver.,** v. 8, n. 80, p.504-511, 1987.

KHANAL, S. K. **Anaerobic biotechnology for bioenergy production:** principles and applications. New Delhi: Blackwell Publishing, 2008.

KUNT, B. **Thermodynamic, economic and emissions analysis of a micro gas turbine cogeneration system operating on biofuels.** 2016. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

LAMO, P. **Sistema produtor de gás metano através de tratamento de efluentes industriais.** Piracicaba: Methax/Biopaq - Codistil, 1991.

LEITE, R. C. C. *et al.* **Estudo sobre as possibilidades e impactos da produção de grandes quantidades de etanol visando à substituição parcial de gasolina no mundo.** Campinas: Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético – NIPE / Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, 2005.

LEONARDO, S. M. F. **Caracterização do digestor anaeróbio de lamas biológicas da ETAR do Choupal, em Coimbra.** 2013, 165 f. Dissertação (Mestrado em Processos Químicos e Biológicos) – Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Coimbra, 2012.

MENDONÇA, J. A.; QUEDA, O. A agroindústria canavieira na região de Araraquara: a formação das usinas e os efeitos do processo de desregulamentação. *In:* SIMPÓSIO DE REFORMA AGRÁRIA E QUESTÕES RURAIS. 8., 2018. Araraquara: **Anais** [...]. Araraquara: Universidade de Araraquara - UNIARA, 2018.

MILANEZ, A. Y. *et al.* Biogás de resíduos agroindustriais: panorama e perspectivas. **BNDES Setorial**, v. 47, p. 221-276, 2018.

MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA. **Papel da biomassa na expansão da geração de energia elétrica:** documento de apoio ao PNE 2050. Rio de Janeiro: MME/EPE, 2018.

MORAES, M. L.; BACCHI, M. R. P. Etanol, do início às atuais fases de produção. **Revista de Economia e Política Agrícola**, v.4, p. 5-22, 2014.

MORENO, A. São Martinho debate usinas de alta performance no dia 18/9. **JornalCana**, 08 set. 2014. Disponível em: https://jornalcana.com.br/sao-martinho-debate-usinas-de-alta-performance-no-dia-189/. Acesso em: 06 out. 2019.

MUTTON, M. A.; ROSSETO, R.; MUTTON, M. J. R. Utilização agrícola da vinhaça. *In:* CORTEZ, L. A. B. **Bioetanol de cana-de-açúcar:** P&D para produtividade e sustentabilidade. São Paulo: Blucher, 2010. p.423-440.

NOGUEIRA L. A. H.; LORA E. E. S. **Dendroenergia:** fundamentos e aplicações. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2003. 199 p.

NOGUEIRA, A. C. *et al.* Projeto de unidade de bioenergia e tratamento de resíduos de

abatedouros de aves de corte. *In:* CONGRESSO NACIONAL DE PESQUISA E ENSINO EM CIÊNCIAS, 2016, Campina Grande. **Anais** [...]. Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba, 2016.

NOGUEIRA, L. A. H. **Biodigestão:** a alternativa energética. São Paulo: Nobel, 1986.

NOVACANA. Contextualização histórica do etanol. **Novacana**, 2014. Disponível em: https://www.novacana.com/estudos/contextualizacao-historica-do-etanol-120913. Acesso em: 26 ago. 2019.

NOVACANA. Curiosidades sobre o etanol. **Novacana**. Disponível em: https://www.novacana.com/etanol/curiosidades. Acesso em: 06 out. 2019.

NUVOLARI, A. **Esgoto sanitário coleta transporte e tratamento e reuso agrícola.** 2. ed. São Paulo: Blucher, 2011. 565 p.

OLIVEIRA, B. G. **Vinhaça da cana-de-açúcar:** fluxo de gases de efeito estufa e comunidades de archaea presente no sedimento do canal de distribuição. 2011. 96 f. Dissertação (Mestrado em Microbiologia Agrícola) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

OLIVER, A. P. M. *et. al.* **Manual de treinamento em biodigestão.** Bahia: Instituto de Estúdios Del Hambre, 2008.

ORTOLANI, A. F.; BENINCASA, M.; LUCAS JUNIOR, J. **Biodigestores rurais:** modelos indiano, chinês e batelada. Jaboticabal: FUNEP, 1991. 3p.

PANORAMA. Siemens e São Martinho se associam a ABiogás para desenvolvimento de insumo. **Panorama Offshore**, 24 de jan. de 2019. Disponível em: https://www.panoramaoffshore.com.br/siemens-e-sao-martinho-se-associam-a-abiogas-para-desenvolvimento-de-insumo/. Acesso em: 01 out. 2019.

PASSOS, R. R. G. **Avaliação energético-econômica da utilização da vinhaça via biogás ou evaporação seguida de incineração**. 2009. 47 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

PELLEGRINI, L. F. **Análise e otimização termo-econônica-ambiental aplicada à produção combinada de açúcar, álcool e eletricidade.** 2008. 350f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica de Energia de Fluidos) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

PERMINIO, G. B. **Viabilidade do uso de biodigestor como tratamento de efluentes domésticos descentralizado.** 2013. 57 f. Monografia (Curso de Pós Graduação Latu Sensu em Formas Alternativas de Energia). Universidade Federal de Lavras – UFLA. Lavras. 2013.

PINTO, C. L. B. **Modelagem de opções reais com processos de reversão à média em tempo discreto:** uma aplicação na indústria brasileira de etanol. Rio de Janeiro: PUC-Rio, 2009.

PINTO, C. P. **Tecnologia da digestão anaeróbia da vinhaça e desenvolvimento**

sustentável. 1999. 145f. Dissertação (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1999.

POVEDA, M. M. R. **Análise econômica e ambiental do processamento da vinhaça com aproveitamento energético.** 2014. 150f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

PROCKNOR, C. **Energia elétrica a partir da vinhaça.** 2008. Disponível em: https://www.procknor.com.br/br/artigos/energia-eletrica-a-partir-da-vinhaca. Acesso em: 01 out. 2019.

RAJESHWARI K. V. *et al.* State of the art of anaerobic digestion technology for industrial wastewater treatment. **Renew Sustain Energy,** n. 4, p. 135–156, 2000.

RAMOS, C. S. São Martinho inaugura era dos canaviais 4.0. 2019. **Valor Econômico.** Disponível em: https://valor.globo.com/agronegocios/noticia/2019/08/05/sao-martinho-inaugura-era-dos-canaviais-4-0.ghtml. Acesso em: 06 out. 2019.

RAMOS, P. Os mercados mundiais de açúcar e a evolução da agroindústria canavieira do Brasil entre 1930 e 1980: do açúcar ao álcool para o mercado interno. **Economia Aplicada,** n. 11, p. 559-585, 2007.

ROCHA DE ALMEIDA, J. **O problema da vinhaça em São Paulo.** Piracicaba: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – ESALQ/USP, 1952.

ROCHA, M. H. *et al.* Resíduos da produção de biocombustíveis: vinhaça e glicerina. *In:* LORA, E. E. S.; VENTURINI, O. J. Biocombustíveis. **Interciência,** Rio de Janeiro, v. 2., n. 12, p. 691-809, 2012.

SALES, L. S. **Viabilidade técnico-econômica de sistemas de cogeração para atender a demandas elétricas, térmicas e de refrigeração em aplicações de pequeno e médio porte.** 2008. 345 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, 2008.

SALOMON, K. R.; LORA, E.; MONROY, E. Custo do biogás proveniente da biodigestão da vinhaça e sua utilização. *In:* CONGRESSO IBEROAMERICANO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 8., 2007, Cusco. **Anais** [...], Cusco: Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas – ABCM, 2007.

SALOMON, K. R. **Avaliação técnico-econômica e ambiental da utilização do biogás proveniente da biodigestão da vinhaça em tecnologias para geração de eletricidade.** 2007. 219 f. Tese (Doutorado em Conversão de Energia) – Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2007.

SANTOS, J. *et al.* Treatment of sugarcane vinasse from cachaça production for the obtainment of candida utilis CCT 3469 biomass. **Biochemical Engineering Journal**, v. 148, p. 131-137, 2019.

SÃO MARTINHO. **Negócios e unidades.** 2018a. Disponível em: https://www.saomartinho.com.br/show.aspx?idMateria=rk2CGXH5SOIFTobanx1b+g== .

Acesso em: 05 out. 2019.

SÃO MARTINHO. **Nossos números**. 2018b. Disponível em: https://www.saomartinho.com.br/show.aspx?idMateria=mjxyRaoSyJIanSd9Ivb/XA==. Acesso em: 04 ago. 2019.

SÃO MARTINHO. **Relatório anual e de sustentabilidade:** 2017/2018. Pradópolis: São Martinho, 2019a. 78 p.

SÃO MARTINHO. **Relatório trimestral 4T17**. 2017. Disponível em: https://ri.saomartinho.com.br/listresultados.aspx?idCanal=fS+4uUvKJHXkO8cVhhZAlQ=. Acesso em: 13 out. 2019.

SÃO MARTINHO. **Relatório trimestral 4T18**. 2018c. Disponível em: https://ri.saomartinho.com.br/listresultados.aspx?idCanal=fS+4uUvKJHXkO8cVhhZAlQ=. Acesso em: 13 out. 2019.

SÃO MARTINHO. **Relatório trimestral 4T19**. 2019b. Disponível em: https://ri.saomartinho.com.br/listresultados.aspx?idCanal=fS+4uUvKJHXkO8cVhhZAlQ=. Acesso em: 13 out. 2019.

SÃO MARTINHO. **Resultados:** 1º trimestre – safra 2019/2020. 2019c. Disponível em: https://ri.saomartinho.com.br/listresultados.aspx?idCanal=fS+4uUvKJHXkO8cVhhZAlQ=. Acesso em: 13 out. 2019.

SGANZERLA, E. **Biodigestor:** uma solução. Porto Alegre: Agropecuária, 1983.

SHINDELL, D. T. *et al.* Improved attribution of climate forcing to emissions. **Science**, v. 326, p. 716-718, 2009.

SILVA, G.M.A. **Avaliação das tecnologias de disposição de vinhaça de cana de açúcar quanto ao aspecto de desenvolvimento ambiental e econômico**. 2012. 208 f. Tese (Doutorado em Térmica e Fluidos) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

SILVA, G. M. A.; ORLANDO FILHO, J. Caracterização da composição química dos diferentes tipos de vinhaça no Brasil. **Boletim Técnico Planalsucar**, v. 8, p. 5-22, 1981.

SILVA, M. A. S.; GRIEBELER, N. P.; BORGES, L. C. Uso de vinhaça e impactos nas propriedades do solo e lençol freático. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 1, p. 108-114, 2007.

SILVEIRA, J. L. **Cogeração disseminada para pequenos usuários:** estudos de casos para o setor terciário. 1994. 216 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1994.

SILVEIRA FILHO, A. S. L. *et al.* Dimensionamento de um reator UASB para tratamento de efluentes domésticos e recuperação do biogás para produção energética: um estudo de caso em Pouso Alegre (MG). **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 7, n. 1, 2018.

SMEETS, E. *et al.* The sustainability of brazilian ethanol: an assessment of the possibilities of certified production. **Biomass Bioenerg**, n. 32, p. 781-813, 2008.

SOARES, J. R. J. **Eficiência de reatores anaeróbicos de manta de lodo:** influência da concentração dos sólidos sedimentáveis. 2017. 57 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Centro Universitário de Formiga – UNIFOR, Formiga, 2017.

SOUZA, M. E.; FUZARO, G.; POLEGATO, A. R. Thermophilic anaerobic digestion of vinasse in pilot plant UASB reactor. **Water Science and Technology**, Oxford, v. 25, n. 7, p. 191-200, 1992.

SOUZA, S. N. M. *et al.* Custo da eletricidade gerada em conjunto motor gerador utilizando biogás da suinocultura. **Acta Scientiarum Technology**, Maringá, v.26, p.127-133, 2004.

STEMAC. **Folder grupos geradores a gás 2017.** Stemac: São Paulo, abr. 2017. 2p. Disponível em: https://www.aecweb.com.br/cls/catalogos/1721/25235/Grupo-gerador-MWM-gas.pdf. Acesso em: 09 out. 2019.

SYAICHURROZI, I. *et al.* Kinetics studies impact of initial pH and addition of yeast saccharomyces cerevisiae on biogas production from tofu wastewater in Indonesia. **International Journal of Engineering-Transactions B:** Applications**,** v. 29, n. 8, p.1037, 2016.

TARRENTO. G. E.; MARTINES, J. C. Análise da implantação de biodigestores em pequenas propriedade rurais, dentro do contexto da produção limpa. *In:* SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO – SIMPEP. 13. 2006. Bauru, **Anais** [...]. Bauru: Universidade Estadual Paulista – UNESP, 2006.

TOLEDO, M. Entressafra da cana será mais longa e preços sobem antes. **A cidade on Ribeirão Preto**, 2018. Disponível em: https://www.acidadeon.com/ribeiraopreto/economia/NOT,0,0,1375353,Entressafra+da+cana+sera+mais+longa+e+precos+sobem+antes.aspx. Acesso em: 09 out. 2019.

TUNA, C. E. **Um método de análise exergoeconômica para otimização de sistemas energéticos.** 1999. 145 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 1999.

UNICADATA. **Produção por produto.** 2019. Disponível em: http://unicadata.com.br/historico-de-producao-e-moagem.php?idMn=31&tipoHistorico=2&acao=visualizar&idTabela=2333&produto=etanol_total&safraIni=1980%2F1981&safraFim=2018%2F2019&estado=RS%2CSC%2CPR%2CSP%2CRJ%2CMG%2CES%2CMS%2CMT%2CGO%2CDF%2CBA%2CSE%2CAL%2CPE%2CPB%2CRN%2CCE%2CPI%2CMA%2CTO%2CPA%2CAP%2CRO%2CAM%2CAC%2CRR. Acesso em: 26 ago. 2019.

VAN HAANDEL, A. C.; LETTINGA, G. **Tratamento anaeróbio de esgoto:** um manual para regiões de clima quente. Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba/ Epgraf, 1994. 240 p.

VAN HAANDEL, A. C.; CATUNDA, P. F. C. Profitability increase of alcohol distilleries by the rational use of byproducts. **Water Science Technology**, Oxford, v. 29, n. 8, p. 117-124, 1994.

VAN LIER, J. B. *et al.* Celebrating 40 years anaerobic sludge bed reactors for industrial wastewater treatment. **Reviews in Environmental Science and Biotechnology,** n.14, p. 681–702, 2015.

VIAN, C. E. F. Árvore do conhecimento: cana-de-açúcar: açúcar. **Agência Embrapa de Informação Tecnológica.** Disponível em: http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_109_22122006154841.html. Acesso em: 06 out. 2019.

VON SPERLING, M. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**: introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 4. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - DESA/UFMG, 2014.

WANG, J. *et al.* Modeling and performance analysis of CCHP (combined cooling, heating and power) system based on co-firing of natural gas and biomass gasification gas. **Energy,** v. 93, p. 801-815, 2015.

YSATÎ. **A contribuição da água contida na vinhaça irrigada não é importante para a cana.** Ysatî, 2015. Disponível em: http://www.ysati.com.br/YSATI/QRFs___FQAs_(Agricultura)/Entries/2015/6/7_A_contribuicao_da_agua_contida_na_vinhaca_irrigada_nao_e_importante_para_a_cana_2.html. Acesso em: 10 abr. 2017.