MANUEL MORENO RUIZ POVEDA

**ANÁLISE ECONÔMICA E AMBIENTAL DO PROCESSAMENTO DA VINHAÇA COM
APROVEITAMENTO ENERGÉTICO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências

Orientadora: Profa. Dra. Suani Teixeira Coelho

Versão corrigida

**São Paulo
2014**

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

FICHA CATALOGRÁFICA

Poveda, Manuel.

Análise econômica e ambiental do processamento da vinhaça com aproveitamento energético; Manuel Moreno Ruiz Poveda; Orientadora Suani Teixeira Coelho. São Paulo, 2014.

160 f. Il.; 30cm.

Dissertação (Mestrado em Ciências) - Programa de Pós-Graduação em Energia - Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo.

1.Etanol 2.Vinhaça 3.Bioenergia I.Título.

Nome: POVEDA, Manuel Moreno Ruiz

Título: Análise econômica e ambiental do processamento da vinhaça com aproveitamento energético

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências

Aprovado em

Banca examinadora:

Prof. Dr. _____ Instituição: _____

Julgamento _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____ Instituição: _____

Julgamento _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____ Instituição: _____

Julgamento _____ Assinatura: _____

DEDICATÓRIA

Com toda humildade, dedico este trabalho ao povo brasileiro.

AGRADECIMENTOS

Ao povo brasileiro, pela acolhida.

À minha orientadora, Profa. Dra. Suani Teixeira Coelho, pelo tempo e pela dedicação.

Aos colegas do CENBIO, pela colaboração.

A Monique, pela companhia, pelo carinho, pelo apoio e pela compreensão.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pelo financiamento.

*Tudo é considerado impossível,
até acontecer.*

Nelson Mandela

RESUMO

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

A vinhaça é o principal resíduo da produção de etanol de cana-de-açúcar e, no Brasil, são gerados aproximadamente 250 milhões de m³ de vinhaça por safra. Atualmente, este efluente é usado para fertirrigação dos canaviais em sua forma *in natura*, ou seja, sem tratamento prévio. Devido à sua grande quantidade de matéria orgânica e de sais, a disposição inadequada no meio ambiente pode ser causa tanto de impactos no solo e na água, como de emissões de gases de efeito estufa. O objetivo geral deste estudo é comparar diferentes alternativas de processamento para o aproveitamento energético da vinhaça, em busca daquela com maior desenvolvimento tecnológico, que mitigue os possíveis impactos ambientais da fertirrigação com vinhaça *in natura* e que esteja associada a um menor custo. Para esta finalidade, foram configurados cinco cenários que representam as tecnologias mais estudadas atualmente. Como cenário de referência, foi estabelecido a fertirrigação com vinhaça *in natura* e, como suas alternativas, consideraram-se: 1.concentração, 2.biodigestão e 3.incineração com produção de energia elétrica, bem como 4.combinação da biodigestão com a concentração e com o uso veicular do biogás. Uma vez feita a avaliação, concluiu-se que todas as alternativas melhoram o desempenho ambiental da gestão do resíduo e, ao mesmo tempo, permitem o aproveitamento e a economia de energia. Entretanto, o sistema de concentração é a única opção que se mostra viável economicamente na situação atual. Para ser atrativo o investimento nas demais tecnologias, seria necessária a introdução de medidas que premiem monetariamente os serviços ambientais, tais como a mitigação de emissões de gases de efeito estufa, a redução do consumo de água e a produção de energia a partir de fontes renováveis. A combinação da biodigestão com a posterior concentração pode ser a opção que reúne o maior número de vantagens com respeito ao cenário de referência. Com esta combinação, o biogás produzido é utilizado para suprir o consumo de energia do processamento e para substituir o diesel na frota usada na produção da cana-de-açúcar. Relativo aos impactos ambientais, esta configuração tecnológica diminui o volume da vinhaça, facilita sua distribuição a longas distâncias, evita a concentração de nutrientes no entorno das usinas, elimina o odor da decomposição da vinhaça e as emissões de metano, possibilita a reutilização da água e permite a substituição de combustíveis fósseis. Além disso, a vinhaça biodigerida e concentrada tem boas qualidades como fertilizante.

Palavras-chave: Vinhaça, Etanol, Concentração, Biodigestão, Incineração, Biogás.

ABSTRACT

POVEDA, M. M. R. **Economic and environmental analysis of vinasse processing with energy recovery.** 2014. 150 p. Master's Dissertation - Graduate Program on Energy, University of São Paulo, São Paulo, 2014.

The vinasse is the main residue of ethanol production from sugarcane. In Brazil, around 250 million m³ of vinasse are generated per harvesting season. Currently, this effluent is used *in natura*, ie, without previous treatment, for sugarcane fertirrigation. Due to its large amount of organic matter and salts, inadequate disposal in the environment may cause impacts on soil and water, as well as greenhouse gases emissions. This study aims to compare different alternative process for vinasse energy recovery, searching which ones have the highest technological development nowadays, mitigate the possible environmental impacts of fertirrigation using *in natura* vinasse and involve the lowest cost. For this purpose, five scenarios were configured, representing the most widely studied technologies. As the baseline scenario it was established fertirrigation using *in natura* vinasse and, as alternatives scenarios, the following ones were considered: 1. concentration, 2. digestion and 3. incineration with electricity generation, and 4. digestion plus concentration with vehicular use of biogas. It was concluded that all the alternatives improve the environmental performance of vinasse management since they also allow energy recovery and savings. However, only vinasse concentration system is economically feasible nowadays. For the other technologies to become an attractive investment, it would be necessary to include an economic valuation of environmental services, such as greenhouse gas emissions mitigation, reduction of water consumption and renewable energy production. The combination of digestion and subsequent concentration may be the option that brings together the largest number of advantages comparing to the baseline scenario. In this solution, the biogas produced is used to supply the process power consumption and to replace diesel in the fleet used for sugarcane production. Regarding the environmental impacts, this technology configuration reduces vinasse's volume, facilitates its distribution to long distances, prevents nutrient concentration around mills, eliminates decomposition odor and methane emissions, enables water reuse and allows fossil fuels replacement. Furthermore, digested and concentrated vinasse has good qualities as fertilizer.

Keywords: Vinasse, Ethanol , Concentration, Digestion, Incineration, Biogas.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fluxograma do processo.....	28
Figura 2. Produção estimada de vinhaça no Brasil.	29
Figura 3. Vinhaça.....	30
Figura 4. Descarga rápida defletida em pratos de um caminhão-tanque sobre a lavoura.	34
Figura 5. Aspensor tipo montagem direta sugada de canal.	34
Figura 6. Carretel enrolador com captação no canal e acoplado diretamente no caminhão. ...	35
Figura 7. Distância econômica de fertirrigação.....	36
Figura 8. Evaporador de película descendente.	38
Figura 9. Tecnologia <i>Thermally Accelerated Short Time Evaporator</i> (TASTE).....	39
Figura 10. Evaporador de seis efeitos.	40
Figura 11. Concentrador de vinhaça Ecovin.	41
Figura 12. Caminhão aplicando vinhaça concentrada.	42
Figura 13. Processo de biodigestão anaeróbia.....	43
Figura 14. UASB. Reator anaeróbio de fluxo ascendente.....	44
Figura 15. Reator anaeróbio de Circulação Interna (IC).....	45
Figura 16. Esquema do processo do biodigestor da Usina São Martinho.....	51
Figura 17. Esquema do processo do biodigestor da Usina Ester.....	52
Figura 18. Imagem do sistema de biodigestão da Usina Ester.	53
Figura 19. Esquema básico de Instalação Térmica de Concentração para Combustão de Vinhaça e Geração de Energia Elétrica.....	55
Figura 20. Queimador para queima de gás natural e vinhaça concentrada.	56
Figura 21. Queimador torsional Saacke para vinhaça concentrada de melão, modelo SSB de 40 MW _t	57
Figura 22. Recuperação de calor e potência na incineração de vinhaça.	58
Figura 23. Planta de combustão da vinhaça da destilaria <i>Bangyikhan</i> (Tailândia).	59
Figura 24. Diagrama ilustrativo e de fluxos do Cenário 0 de referência, Fertirrigação com vinhaça <i>in natura</i>	62
Figura 25. Diagrama explicativo e de fluxos do Cenário 1, Concentração evaporativa. Fonte: Autor.	63
Figura 26. Diagrama explicativo e de fluxos do Cenário 2, Biodigestão anaeróbia com geração de eletricidade.....	64

Figura 27. Diagrama explicativo e de fluxos do Cenário 3, Incineração com geração de eletricidade.	65
Figura 28. Diagrama explicativo e de fluxos do Cenário 4, Biodigestão com concentração e uso veicular.....	66
Figura 29. Representação do sistema de cogeração e diagrama termodinâmico ideal T-S do ciclo que supre o evaporador no Cenário 1.	72
Figura 30. Representação do sistema de cogeração e diagrama termodinâmico ideal T-S do ciclo que supre o evaporador no Cenário 4.	79
Figura 31. Balanço energético em cada cenário de tratamento da vinhaça em usinas de etanol de cana.....	86
Figura 32. Representação esquemática do efeito da Norma P4.231 sobre a fertirrigação com vinhaça.	89
Figura 33. Tendência das concentrações de nitrato no Aquífero Bauru, no período de 1998 a 2012.....	90
Figura 34. Balanço de emissões de GEEs dos cenários.	113
Figura 35. Emissões por fonte nos diferentes cenários.	114
Figura 36. Balanço de emissões de NO _x e SO _x dos Cenários.	115
Figura 37. Relação entre o preço da eletricidade e do CER para que o Cenário 2 tenha uma TIR = 21%.....	123
Figura 38. Histórico do preço das CER.	124
Figura 39. Relação entre o preço da eletricidade e do CER para que o Cenário 3 tenha uma TIR = 21%.....	127
Figura 40. Relação entre o preço da eletricidade e do CER para que o Cenário 4 tenha uma TIR = 21%.....	131
Figura 41. Investimento inicial, Custo anual O&M e VPL (TIR = 21%) nos diferentes cenários.....	134

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Indicadores utilizados.	26
Tabela 2. Características da usina média no Estado de São Paulo na safra 2009-2010.....	27
Tabela 3. Parâmetros físico-químicos da vinhaça <i>in natura</i> resultante de três tipos de mostos diferentes.	30
Tabela 4. Caracterização físico-química da vinhaça obtida de levantamentos realizados no CTC.....	31
Tabela 5. Sistemas de aplicação de vinhaça nas lavouras de cana-de-açúcar do Estado de São Paulo.....	36
Tabela 6. Propriedades físicas da vinhaça <i>in natura</i> e concentrada.	37
Tabela 7. Consumo de vapor por diferentes modelos de evaporadores.....	40
Tabela 8. Concentradores de vinhaça instalados.	42
Tabela 9. Taxa de aplicação das diferentes tecnologias para a digestão de vinhaça.	46
Tabela 10. Características físico-químicas da vinhaça biodigerida – Usina São Martinho.	46
Tabela 11. Composição do biogás em geral.....	46
Tabela 12. Parâmetros da vinhaça concentrada.....	54
Tabela 13. Sistemas instalados de combustão de vinhaça no Brasil.	59
Tabela 14. Consumo de combustíveis na maquinaria empregada para fertirrigação.	68
Tabela 15. Quantidade de água a evaporar por m ³ de V _{4°Bx} para atingir diferentes graus de concentração.	71
Tabela 16. Parâmetros termodinâmicos do ciclo de cogeração do Cenário 1.	72
Tabela 17. Consumo de diesel na fertirrigação com vinhaça concentrada e <i>in natura</i>	74
Tabela 18. Biogás produzido com vinhaça.	76
Tabela 19. Parâmetros da Planta de Biodigestão de São Martinho.	76
Tabela 20. Balanço energético em cada cenário para uma usina média (960.000 m ³ de vinhaça/ano).	85
Tabela 21. Tipos de antibióticos utilizados na fabricação do etanol.....	91
Tabela 22. Composição da vinhaça kg/m ³ em diferentes secções do canal.	98
Tabela 23. Composição da vinhaça kg/m ³ em diferentes secções do canal ajustando a diluição.	99
Tabela 24. Carbono eliminado da vinhaça e emitido na forma de CH ₄ em lagoas e canais. .	100
Tabela 25. Cálculo das emissões de NO _x no Cenário 0 de referência.	106
Tabela 26. Emissões gasosas no Cenário 0.....	107

Tabela 27. Calculo das emissões de NO _x no Cenário 1.	107
Tabela 28. Emissão de NO _x e SO _x da geração elétrica do Brasil.	108
Tabela 29. Emissões gasosas no Cenário 1	108
Tabela 30. Emissões gasosas no Cenário 2	109
Tabela 31. Emissão de NO _x e SO _x do incinerador de vinhaça.	110
Tabela 32. Emissões gasosas no Cenário 3.	110
Tabela 33. Emissões gasosas no Cenário 4.	111
Tabela 34. Potenciais impactos dos Cenários sobre o solo e a água.	112
Tabela 35. Emissões atmosféricas associadas aos Cenários.	113
Tabela 36. Custos no Cenário 1.....	120
Tabela 37. Indicadores financeiros do investimento no Cenário 1.....	120
Tabela 38. Custos no Cenário 2.....	121
Tabela 39. Indicadores financeiros do investimento no Cenário 2.....	122
Tabela 40. Custo de produção da eletricidade gerada com biogás de vinhaça.....	122
Tabela 41. Variação dos indicadores financeiros no Cenário 2 em função do preço da eletricidade e das CERs.....	124
Tabela 42. Custo de instalação de pequenas centrais de biomassa.....	125
Tabela 43. Custos no Cenário 3.....	125
Tabela 44. Indicadores financeiros do investimento no Cenário 3.....	126
Tabela 45. Variação dos indicadores financeiros no Cenário 3 em função do preço da eletricidade e do CER.	128
Tabela 46. Custos no Cenário 4 sem concentração.	129
Tabela 47. Custos no Cenário 4 com concentração.	130
Tabela 48. Custo de produção do litro diesel equivalente no cenário 3.....	130
Tabela 49. Variação dos indicadores financeiros no Cenário 4 em função do preço do diesel e do CER.	132
Tabela 50. Resultados da avaliação econômica.....	133
Tabela 51. Volume estequiométrico de gases de exaustão da combustão de vinhaça 65°Bx.	157
Tabela 52. Composição mássica e volumétrica em base seca e úmida dos produtos da combustão da vinhaça concentrada.....	158
Tabela 53. Volume estequiométrico de gases de exaustão da combustão de gás natural.....	159
Tabela 54. Composição mássica e volumétrica em base seca e úmida dos produtos da combustão gás natural.	160

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANA – Agencia Nacional de Águas

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

ANP – Agencia Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

APP – Área de proteção permanente.

BEN – Balanço Energético Nacional

BNDES – Banco Nacional do Desenvolvimento

CER – *Certificate Emission Reduction*

CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental

CGEE – Centro de Gestão de Estudos Estratégicos

CIP – *Clean-in-Place*

CNI – Confederação Nacional de Indústria

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

COPAM – Conselho de Política Ambiental

CPFL – Companhia Paulista de Força e Luz

CTC – Capacidade de Troca Catiônica

CTC – Centro de Tecnologia Canavieira

DBO – Demanda Biológica do Oxigênio

DQO – Demanda Química de Oxigênio

EISA – *Energetic Independence Security Act*

EUA – Estados Unidos de America

GEEs – Gases de Efeito Estufa

GN – Gás Natural

GNV – Gás Natural Veicular

ICGEB – Intensidade de Carbono na Geração Elétrica Brasileira

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas

O&M – Operação e manutenção

PCI – Poder Calorífico Inferior

PCS – Poder Calorífico Superior

Proálcool – Programa Nacional do Alcool

PROINFA - Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica

RED – Diretiva de Energias Renováveis

SIN – Sistema Interligado Nacional

TASTE – *Thermally Accelerated Short Time Evaporator*

TIR – Taxa Interna de Rendimento

UASB – *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*

UNICA – União da Indústria da Cana-De-Açúcar

VPL – Valor Presente Líquido

LISTA DE SÍMBOLOS

% – porcentagem

€ – Euros

CH₄ – Metano

CO₂ – Dióxido de Carbono

CO₂eq – dióxido de carbono equivalente

cP – Centipoise

g – gamas

G – Giga

h – horas

H₂SO₄ – Ácido Sulfúrico

ha – Hectare

HP – *Horse Power*

J – Julio

k – Kilo

K – Potássio

l – Litros

M – Mega

m – Metro

m³ – Metros cúbicos

NO_x – Óxidos de nitrogênios

°B_x – Graus Brix

°C – Grau Celsius

R\$ – Reais

SO_x – Óxidos de enxofre

T – Tera

t – Tonelada

W – Watt

W_e – Watt elétrico

Wh – Watt hora

W_t – Watt térmico

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO, OBJETIVO E METODOLOGIA	19
1.1. Introdução	19
1.2. Objetivo e Metodologia	24
CAPÍTULO 2. ESTADO DA ARTE DOS TRATAMENTOS DA VINHAÇA	28
2.1. Produção e características da vinhaça.....	28
2.2. Fertirrigação com vinhaça	32
2.3. Concentração da vinhaça	37
2.3.1. <i>Processo da concentração</i>	37
2.3.2. <i>Implantação da tecnologia e estudos de caso</i>	41
2.4. Biodigestão anaeróbia da vinhaça	43
2.4.1. <i>Processo da biodigestão</i>	43
2.4.2. <i>Biodigestores para vinhaça</i>	44
2.4.3. <i>O biogás de vinhaça</i>	46
2.4.4. <i>Limpeza, compressão e armazenamento de biogás</i>	47
2.4.5. <i>Tecnologias de conversão energética do biogás</i>	48
2.4.6. <i>Implantação da tecnologia e estudos de caso</i>	49
2.5. Combustão da vinhaça	54
2.5.1. <i>Características da vinhaça como combustível</i>	54
2.5.2. <i>Características gerais do processo</i>	55
2.5.3. <i>Tecnologia de combustão de vinhaça</i>	56
2.5.4. <i>Implantação da tecnologia e estudos de caso</i>	58
2.6. Resultados da revisão do estado da arte dos tratamento da vinhaça.	60
CAPÍTULO 3. DESCRIÇÃO DOS CENÁRIOS A SEREM ANALISADOS PARA TRATAMENTO DA VINHAÇA E SEU BALANÇO ENERGÉTICO.	61
3.1. Descrição dos cenários.....	61
3.1.1. <i>Cenário 0 de referência: Fertirrigação com vinhaça in natura</i>	61
3.1.2. <i>Cenário 1: Concentração evaporativa</i>	62
3.1.3. <i>Cenário 2: Biodigestão anaeróbia com geração de eletricidade</i>	63
3.1.4. <i>Cenário 3: Incineração com geração de eletricidade</i>	65
3.1.5. <i>Cenário 4: Biodigestão com concentração e uso veicular</i>	66
3.2. Balanço Energético de cada Cenário	67
3.2.1. <i>Cenário 0 de referência: Fertirrigação com vinhaça in natura.</i>	67
3.2.2. <i>Cenário 1: Concentração evaporativa</i>	69
3.2.3. <i>Cenário 2: Biodigestão anaeróbia com geração de eletricidade</i>	75
3.2.4. <i>Cenário 3: Incineração com geração de eletricidade</i>	78
3.2.5. <i>Cenário 4: Biodigestão com concentração e uso veicular</i>	82
3.3. Resultados do balanço energético dos cenários considerados.....	84

CAPÍTULO 4. AVALIAÇÃO DE IMPACTO AMBIENTAL	87
4.1. Solo e água	87
4.1.1. <i>Cenário 0 de referência: Fertirrigação com vinhaça in natura</i>	87
4.1.2. <i>Cenário 1: Concentração evaporativa</i>	92
4.1.3. <i>Cenário 2: Biodigestão anaeróbia com geração de eletricidade</i>	93
4.1.4. <i>Cenário 3: Incineração com geração de eletricidade</i>	94
4.1.5. <i>Cenário 4: Biodigestão com concentração e uso veicular</i>	95
4.2. Emissões de GEEs	95
4.2.1. <i>Cenário 0 de referência: Fertirrigação com vinhaça in natura</i>	97
4.2.2. <i>Cenário 1: Concentração evaporativa</i>	102
4.2.3. <i>Cenário 2: Biodigestão anaeróbia com geração de eletricidade</i>	103
4.2.4. <i>Cenário 3: Incineração com geração de eletricidade</i>	104
4.2.5. <i>Cenário 4: Biodigestão com concentração e uso veicular</i>	104
4.3. Emissões de NO_x e SO_x	105
4.3.1. <i>Cenário 0 de referência: Fertirrigação com vinhaça in natura</i>	105
4.3.2. <i>Cenário 1: Concentração evaporativa</i>	107
4.3.3. <i>Cenário 2: Biodigestão anaeróbia com geração de eletricidade</i>	108
4.3.4. <i>Cenário 3: Incineração com geração de eletricidade</i>	109
4.3.5. <i>Cenário 4: Biodigestão com concentração e uso veicular</i>	111
4.4. Resultados da avaliação de impacto ambiental dos cenários considerados	111
4.4.1. <i>Solo e água</i>	111
4.4.2. <i>Emissões de GEEs, NO_x e SO_x</i>	112
CAPÍTULO 5. AVALIAÇÃO ECONÔMICA	117
5.1. Cenário 0 de referência: Fertirrigação com vinhaça in natura	118
5.2. Cenário 1: Concentração evaporativa	119
5.3. Cenário 2: Biodigestão anaeróbia com geração de eletricidade	121
5.4. Cenário 3: Incineração com geração de eletricidade	125
5.5. Cenário 4: Biodigestão com concentração e uso veicular	128
5.6. Resultados da avaliação econômica	132
CAPÍTULO 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	136
6.1. Cenário 0 de referência: Fertirrigação com vinhaça in natura	136
6.2. Cenário 1: Concentração evaporativa	138
6.3. Cenário 2: Biodigestão anaeróbia com geração de eletricidade	139
6.4. Cenário 3: Incineração com geração de eletricidade	141
6.5. Cenário 4: Biodigestão com concentração e uso veicular	142
CAPÍTULO 7. CONCLUSÕES	145
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	148

APÊNDICE A - CÁLCULO DO VOLUME DE EXAUSTÃO PARA CALDEIRAS QUEIMANDO VINHAÇA CONCENTRADA E GÁS NATURAL.....	157
---	------------

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO, OBJETIVO E METODOLOGIA

1.1. Introdução

O Brasil pode ser considerado um caso especial em termos de quota de energias renováveis na sua matriz energética, devido à geração majoritária de eletricidade utilizando energia hidráulica e às iniciativas brasileiras relacionadas a biocombustíveis que têm sido intensamente implementadas desde 1975. 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.

A cana-de-açúcar é originária da Ásia e começou a ser plantada no Brasil pelos portugueses em 1532. No começo, as plantações prosperaram principalmente no Nordeste do país, tendo sido o principal produto brasileiro nos séculos XVI e XVII. A cana-de-açúcar é um cultivo próprio de regiões tropicais, pois necessita de grande quantidade de insolação para seu desenvolvimento. As terras adequadas para o cultivo são as mais férteis, mas também evolui de forma satisfatória em territórios menos fecundos, tais como o cerrado (BNDES, 2008).

No Brasil, o ciclo da cana-de-açúcar é geralmente de seis anos, ocorrendo cinco cortes, sendo que o primeiro deles é feito 12 ou 18 meses após o plantio, quando é colhida a chamada cana-planta. Depois de realizado este primeiro corte, produz-se o rebrote que é chamado de cana-soca. Então, é feito um corte por ano ao longo de quatro safras consecutivas com uma redução gradual da produtividade. Depois de realizado o quinto corte, substitui-se a cana antiga por um novo plantio, o que reinicia o ciclo produtivo. Para melhorar a fertilidade do solo, a área cultivada fica alguns meses em descanso, inclusive sendo cultivadas leguminosas fixadoras de nitrogênio.

No ano 2014, o Brasil era líder mundial na produção de cana-de-açúcar e na fabricação de etanol a partir desta matéria prima, processando cerca de 600 milhões de toneladas em cada safra, das quais aproximadamente a metade é utilizada para produzir 25 milhões de m³ do combustível. A maior parte dos canaviais se localiza no interior do Estado de São Paulo

(~60% da área plantada), com a produção mais importante na região de Ribeirão Preto (UNICA, 2013).

O etanol é um combustível líquido utilizado principalmente nos motores de explosão ciclo Otto. Com a crise do petróleo da década de 1970, o etanol converteu-se em produto estratégico para o Brasil. Em 1975 foi instituído o Programa Nacional do Álcool (Proálcool), cujo objetivo era diminuir as importações de petróleo expandindo a produção e o uso energético do etanol. Nos anos 1980, o governo investiu em usinas, destilarias e fábricas de automóveis para realizar esta expansão (GOLDEMBERG *et al.*, 2003). Um incentivo importante do Proálcool consistiu no estabelecimento de níveis mais significativos no teor de etanol anidro na gasolina até atingir 25%. Por outro lado, o governo regulou que o preço do etanol hidratado deveria ser menor do que o da gasolina. Estabeleceu-se também a abertura de linhas de crédito favoráveis para que os usineiros incrementassem sua capacidade de produção.

Quanto ao setor automobilístico, incentivou-se por meio da redução de impostos a venda de carros exclusivamente movidos a álcool (E100¹). Todos estes incentivos tiveram como resultado o incremento na produção de etanol no início da década de 80.

Durante o ano de 1985, os preços do petróleo caíram e houve uma recuperação dos preços do açúcar, e em 1986 o governo federal reduziu os incentivos para a agroindústria canavieira dando lugar ao que se chamou de crise do álcool. Em 1989 aconteceram descontinuidades no abastecimento de etanol, afetando seriamente a confiança do consumidor, o que provocou a queda nas vendas dos carros E100. O ponto de inflexão nessa queda não chegou até 2003, quando houve o lançamento dos veículos flexíveis e, em consequência, o consumo de etanol hidratado voltou a crescer.

A produção deste combustível cresceu de 0,6 milhões de m³ no ano de 1975 (GOLDEMBERG *et al.*, 2003) até superar os 27 milhões de m³ no ano 2009 (UNICA, 2013). Nos dias de hoje, o etanol é usado no Brasil como um aditivo para gasolina, cuja mistura é chamada “gasohol” com uma proporção de 20% (E20) a 26% (E26) de etanol anidro. Por outro lado, o etanol hidratado é dedicado a veículos flex que funcionam com qualquer proporção de gasolina e etanol, até E100.

Em 2010, o etanol substituiu 44,6% da gasolina no Brasil, quando nos Estados Unidos de America (EUA) esta porcentagem só chegava a 9,5% (DATAGRO, 2012). A meta definida em 2007 nos EUA pelo *Energetic Independence Security Act* (EISA) foi alcançar a

¹ A nomenclatura E100 refere-se a proporção de etanol no combustível, neste caso 100% de etanol. No caso de E20 seria 20% de etanol.

substituição de 20% de todos os combustíveis de transporte até 2022 (EUA, 2007). A Diretiva de Energias Renováveis (RED), emitida pela Comissão Europeia, estabeleceu a meta de substituir 10% de todos os combustíveis de transporte com combustíveis renováveis na Europa até 2020 (EU, 2009). Em 2010, a proporção real de etanol e biodiesel no consumo de combustíveis na Europa foi de apenas 3,4% (DATAGRO, 2012).

O Brasil tem um desempenho notável no rendimento agroindustrial medido em termos de litros de etanol hidratado produzido por hectare. Este rendimento era de 4.450 litros de etanol hidratado por hectare na fase inicial do Proálcool (1977-78), mas até o ano 2014 tem evoluído para 6.800 litros de hidratado equivalente de etanol por hectare (CGEE, 2005). O rendimento agrícola médio, medido em toneladas de cana por hectare, no período de 2005 até 2009 foi de 85,5 t/ha na região Centro-Sul (DATAGRO, 2012), sendo esta a mais produtiva. No entanto, devido às secas severas em 2010 e em 2011, bem como ao envelhecimento dos canaviais causados por uma taxa mais baixa do que o normal de renovações, o rendimento agrícola médio caiu para 67 t/ha em 2011 (DATAGRO, 2012).

Na fabricação do etanol as etapas iniciais (até a filtração) são basicamente as mesmas da produção de açúcar. Após o corte da cana é fundamental o transporte o mais rápido possível para sua moagem na usina, evitando perdas de sacarose, sendo prejudicial seu armazenamento. Este fato obriga às usinas a operarem apenas durante o período da safra. Quando a cana chega à usina é limpa antes de ser extraído o caldo por moenda ou difusão. Nos rolos utilizados para a moenda, o caldo rico em sacarose é separado da fibra, chamada de bagaço. Outra opção para a extração do caldo é a difusão, que consiste em lavar sucessivamente com água quente a cana picada e desfibrada. Em qualquer um dos dois casos, o caldo obtido é destinado à produção de açúcar ou etanol.

No caso da produção de açúcar, o caldo é tratado quimicamente e filtrado para a eliminação de impurezas, gerando um resíduo chamado de torta de filtro, que é aproveitado como adubo na plantação de cana. O caldo purificado é concentrado em evaporadores e cozedores, sendo posteriormente centrifugado para conseguir a cristalização da sacarose. Desta etapa se obtém outro resíduo chamado de melaço, uma solução que contém um elevado teor de açúcares, podendo ser utilizado como matéria-prima para a produção do etanol mediante fermentação.

Desta forma, a produção de etanol de cana-de-açúcar pode vir tanto da fermentação do caldo quanto de misturas de caldo e melaço. A este caldo, chamado de mosto, é adicionado leveduras, fungos unicelulares da espécie *Saccharomyces cerevisiae*, para ser fermentado,

dando origem ao vinho que possui uma concentração de 7% a 10% de etanol. Após a fermentação, as leveduras são recuperadas usualmente por centrifugação e tratadas para novo uso, enquanto o vinho é enviado para as colunas de destilação. Na destilação, o etanol é recuperado em forma hidratada, com aproximadamente 96% de etanol em volume e 4% de água. O etanol hidratado pode ser o produto final ou ser desidratado pelos processos de destilação extrativa (usando metil-etileno glicol) ou utilizando uma peneira molecular (pelo processo de adsorção em colunas com um zeólito), obtendo o etanol anidro com aproximadamente 99,7% de etanol em volume (BNDES, 2008).

Além do etanol, o bagaço de cana, que é o resíduo sólido da extração do caldo, é utilizado em sistemas de aquecimento e geração de energia combinados (cogeração) para fornecer energia térmica e eletromecânica dentro das usinas e vender o excedente de eletricidade para a rede comercial. Em junho de 2012, havia 352 sistemas de cogeração em usinas de açúcar e etanol no Brasil, registrados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), com uma capacidade instalada total de 7.588 MW (ANEEL, 2012).

A vinhaça é o principal subproduto da produção de etanol, resultante da destilação do vinho, que é o resultado da fermentação do caldo da cana-de-açúcar ou do melaço no processo de fabricação deste álcool. As destilarias brasileiras produzem entre 7 a 15 litros de vinhaça por litro de etanol dependendo do porte da instalação e tecnologia empregada, sendo as menores e mais antigas as que apresentam maior geração de resíduo (SALOMON, 2007).

O uso da vinhaça para fertirrigar os canaviais tem sido a solução empregada para destinar o enorme volume produzido. Assim, pode ser aproveitado seu importante conteúdo em potássio e outros nutrientes, o que incrementa a produção de cana por hectare e reduz o consumo de fertilizantes. Ao mesmo tempo evita seu descarte em corpos hídricos com os impactos ambientais decorrentes (COELHO *et al.* 1986). Por outro lado, esta prática pode causar salinização do solo e contaminação de aquíferos subterrâneos. Vários autores (HASSUDA, 1989, GLOEDEN *et al.*, 1991, HIRATA *et al.*, 1991, LYRA *et al.*, 2003, SILVA *et al.*, 2007, e outros) discutiram o risco da contaminação do lençol freático com a prática da fertirrigação com a vinhaça.

A aplicação sem critérios adequados de dosagem da vinhaça ao solo pode causar um desequilíbrio de nutrientes e gerar resultados diferentes dos esperados, pois a dosagem adequada varia segundo o tipo de solo e segundo as variedades de cana (GLÓRIA; ORLANDO FILHO, 1984). A partir do ano 2006, no Estado de São Paulo, a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB) recomenda a aplicação de vinhaça no solo

por meio da Norma P4.231, que inclui uma metodologia para determinação do volume máximo de vinhaça aplicado ao solo de acordo com as características físico-químicas deste (CETESB, 2006). O cumprimento dessa norma prevê a sobreacumulação de potássio nos solos e a contaminação do lençol freático. O problema da dispersão do potássio presente na vinhaça vem sendo contornado com o emprego de concentradores, os quais reduzem o volume de vinhaça e permitem ampliar o raio econômico de transporte.

Um assunto ainda inexplorado é a determinação do impacto que a fertirrigação promove com a dispersão no meio ambiente de antibióticos ativos presentes na vinhaça. Apesar da importância do impacto potencial da seleção de microrganismos resistentes a estes antibióticos, este problema tem sido pouco tratado pela pesquisa científica.

A fertirrigação com vinhaça possui um alto potencial para a emissão de metano (CH_4) e óxido nítrico (N_2O), reconhecidos Gases de Efeito Estufa (GEEs). Essas emissões são produzidas porque a vinhaça é microbiologicamente ativa por seu importante conteúdo em matéria orgânica e nitrogênio. A decomposição da matéria orgânica em condições de anaerobiose² emite CH_4 durante o armazenamento e transporte da vinhaça. Ainda assim, o conhecimento dos efeitos da fertirrigação dos canaviais com relação a emissões de GEEs é escasso e não bem quantificado (LISBOA *et al.*, 2011). Carmo *et al.*, 2012, indicam que devem ser desenvolvidas melhores práticas de gestão para minimizar os efeitos negativos da aplicação de vinhaça sobre as emissões de GEEs. Como possível solução a estas emissões encontra-se a biodigestão anaeróbia da vinhaça que reduz significativamente a carga orgânica e possibilita a captura e o uso do biogás, mitigando as emissões de CH_4 para a atmosfera.

Também se considera a possibilidade de incinerar a vinhaça, por permitir solucionar os problemas importantes de sua disposição. Por um lado, elimina-se o enorme volume e os problemas atrelados a seu transporte; e por outro, a elevada carga orgânica é aproveitada para a geração de energia térmica e elétrica. Com a incineração, são evitadas tanto as emissões de CH_4 como as que são produzidas no transporte da vinhaça provenientes do diesel. Como único resíduo sólido remanescente obtêm-se as cinzas com grande concentração de potássio, utilizáveis como fertilizante.

Outra possibilidade é integrar a biodigestão anaeróbia com a posterior concentração, para utilizar o biogás como substituto de diesel na frota da usina ou para fornecer parte da energia necessária na concentração da vinhaça.

² O termo anaerobiose faz referência a reações metabólicas na ausência de oxigênio. Determinados microrganismos são capazes de realizar suas funções nessas condições, como por exemplo, as Arqueas metanogênicas.

Em definitivo, a valorização energética da vinhaça, em um contexto de aumento da demanda e preço da energia e de uma crescente dependência de fontes não renováveis na matriz energética brasileira (MME, 2013), pode ser uma alternativa interessante. Neste contexto, este trabalho faz uma revisão de quais são os impactos ambientais atrelados a cada uma das tecnologias e discute as barreiras de implantação, com a tentativa de elucidar qual delas é a mais conveniente para sua implantação.

Esta dissertação é constituída por sete capítulos, sendo eles: 1.Introdução, Objetivos e Metodologia, 2.Estado da Arte dos Tratamentos da Vinhaça, 3.Descrição dos Cenários para o Tratamento da Vinhaça e seu Balanço Energético, 4.Avaliação de Impacto Ambiental, 5.Avaliação Econômica, 6.Resultados e Discussão, 7.Conclusões. A seguir será descrito cada um deles.

No Capítulo 1, encontra-se uma introdução geral sobre a dissertação com um resumo sobre a história da produção de etanol de cana-de-açúcar no Brasil e sua consequente geração de vinhaça, dando-se as justificativas para o trabalho. Por outro lado, são definidos os objetivos gerais e específicos deste estudo, assim como a metodologia seguida para atingi-los.

No Capítulo 2, faz-se uma revisão sobre o estado da arte dos tratamentos da vinhaça disponíveis utilizando fontes bibliográficas e dados levantados em entrevistas e visitas técnicas.

Os dados coletados são utilizados no Capítulo 3 para configurar uma série de cenários que representam as possíveis alternativas para o tratamento da vinhaça. Também no Capítulo 3, são calculados os balanços energéticos de cada cenário descrito, discriminando a forma de energia consumida e produzida.

O Capítulo 4 trata dos potenciais impactos de cada alternativa sobre a água, o solo e a atmosfera.

A viabilidade econômica da implantação de cada sistema de tratamento é avaliada no Capítulo 5.

O Capítulo 6 resume, analisa, compara e discute todos os resultados obtidos nos capítulos anteriores para, em seguida, extrair as conclusões, apresentadas no Capítulo 7.

1.2. Objetivo e Metodologia

O objetivo geral deste estudo é comparar as diferentes alternativas de processamento para o aproveitamento energético da vinhaça, na procura daquelas com maior viabilidade tecnológica, impactos ambientais reduzidos e que estejam associadas a um menor custo. Com

isto, pretendesse auxiliar à indústria do etanol e aos formuladores de políticas ambientais e energéticas na escolha da melhor tecnologia disponível, através da comparação do desempenho ambiental e da avaliação técnico-econômica, ponderando também as barreiras encontradas na implantação. Este trabalho propõe como objetivos específicos:

1. Levantar o estado da arte de cada tecnologia de processamento da vinhaça, incluindo a escala atual de implantação e as barreiras encontradas para expandir seu uso.
2. Calcular o balanço energético no ciclo produtivo de cada alternativa.
3. Analisar os impactos ambientais de forma abrangente, abarcando os impactos locais no solo e na água, assim como impactos globais com emissões na atmosfera de GEEs.
4. Avaliar a viabilidade econômica das distintas opções, considerando os custos iniciais, de manutenção e operacionais de cada tecnologia, assim como os benefícios associados à produção de energia e fertilizante.
5. Validar ou refutar a hipótese de que existem tecnologias disponíveis e viáveis que melhoram o desempenho ambiental e o aproveitamento da vinhaça quando comparadas com seu uso atual na fertirrigação *in natura*.

Para atingir estes objetivos, são levantadas informações sobre a composição da vinhaça e o estado da arte dos seus possíveis tratamentos. Este levantamento foi realizado através de uma revisão bibliográfica e entrevistando os principais fornecedores de equipamentos para a concentração, biodigestão e incineração de vinhaça presentes no Brasil. Por outro lado, foram realizadas visitas técnicas a instalações industriais de biodigestão para o levantamento de dados primários.

Os dados obtidos na primeira fase foram utilizados para configurar cinco cenários correspondendo às alternativas tecnológicas para o processamento da vinhaça:

1. Fertirrigação com vinhaça *in natura*.
2. Concentração.
3. Biodigestão com produção de energia elétrica.
4. Incineração com produção de energia elétrica.
5. Biodigestão com concentração posterior e uso veicular do biogás.

Definidos os cenários, são calculados os balanços energéticos para as cinco alternativas propostas. Determinam-se quais são as quantidades de energia térmica e elétrica que é

consumida e produzida por cada sistema de tratamento de vinhaça, assim como especificada a origem fóssil ou renovável dessa energia.

Posteriormente, os resultados obtidos no balanço energético são utilizados para estimar as emissões atmosféricas em cada cenário, aproximando qual seria a magnitude das emissões evitadas com a introdução das diferentes tecnologias. Além disso, outros impactos são considerados, como o consumo de água e salinização do solo.

Os resultados das etapas anteriores são valorados economicamente através do preço da energia e dos direitos de emissão para sua inclusão na análise econômica, junto com o investimento e custos de operação e manutenção atrelados a cada processo.

Finalmente, integra-se toda esta informação por meio de tabelas e gráficos que facilitem a comparação entre cenários e discutem-se os resultados.

Resumidamente, para cada um destes cenários são calculados diferentes indicadores quantitativos e qualitativos. Os indicadores avaliados são os apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Indicadores utilizados.

Categoria de indicador	Indicador	Unidade de medida
Energético	Balanço Elétrico	GWh/ano
	Balanço Térmico	TWh/ano
	Consumo de energia fóssil	TWh/ano
Ambiental	Impactos no solo e água	Qualitativo
	Emissões Atmosféricas	GEEs teqCO ₂ /ano
		NO _x e SO _x kg/ano
Econômico	Valor Presente Líquido (VPL)	R\$
	Taxa Interna de Retorno (TIR)	%
	<i>Payback</i> descontado	Anos

Fonte: autor

Com a intenção de facilitar a comparação entre cenários e dar uma ordem de magnitude que permita o cálculo de indicadores quantitativos, é tomada como referência uma usina mista

de produção de açúcar e álcool de características médias no Estado de São Paulo. Para a definição dos parâmetros desta Usina média foi consultado o relatório sobre o perfil do setor do açúcar e do álcool no Brasil (CONAB, 2012) referente à safra 2009-2010 (Tabela 2).

Tabela 2. Características da usina média no Estado de São Paulo na safra 2009-2010.

Variável	Unidade	Magnitude
Número de Usinas	-	169
Dias corridos de atividade na safra por unidade	Dias	242
Média aritmética de moagem diária por unidade	(t/dia)	8.867
Média aritmética de moagem anual por unidade	(t/ano)	2.145.814
Produtividade física	(t/ha)	85,73
Percentual de cana destinada para álcool etílico	%	53,9%
Quantidade de cana destinada para álcool etílico	(t/ano)	1.156.594
Quantidade de álcool etílico total por ton. de cana processada	(l)	76,3
Quantidade de álcool etílico total por ano	(m ³)	88.248
Quantidade de álcool etílico total por hectare e cana colhida	(l)	6.686
Produção de litros de vinhaça por litro de álcool etílico	(l/l)	10,85
Quantidade de vinhaça por ano	(m ³)	960.000

Fonte: CONAB (2012).

Esta usina com características médias será utilizada como base para a criação de cenários no Capítulo 3, e consequentemente como referência para os cálculos realizados nos capítulos 5 e 6.

CAPÍTULO 2. ESTADO DA ARTE DOS TRATAMENTOS DA VINHAÇA

2.1. Produção e características da vinhaça

A vinhaça é um subproduto proveniente da destilação de uma dissolução alcoólica chamada “vinho”. O vinho é o produto da fermentação alcoólica do caldo de cana, do melaço ou da mistura de ambos em distintas proporções (Figura 1). Segundo a região, a vinhaça recebe diferentes nomes, tais como vinhoto, restilo ou garapão (ELIA NETO, 2014). Este efluente das destilarias está constituído principalmente por água, sais, sólidos em suspensão, solúveis e quantidades importantes de Demanda Química de Oxigênio (DQO) e Demanda Biológica de Oxigênio (DBO), o que produz mau cheiro com a putrefação da matéria orgânica (CETESB, 1982). Esta suspensão aquosa tem características muito variáveis dependendo da matéria-prima, do solo, do clima e do processo industrial empregado para a produção de etanol, assim como da mistura de melaço e caldo utilizada na fermentação.

Figura 1. Fluxograma do processo.
Fonte: Adaptado de Seabra (2008).

A quantidade de vinhaça produzida por litro de etanol varia entre 7 e 15 litros. De forma geral, em usinas implantadas recentemente obtém-se uma média de 7 a 10 litros de vinhaça por litro de etanol, entretanto em usinas antigas registra-se uma média de 10 a 15 litros de vinhaça por litro de etanol (SALOMON, 2007). Este volume depende basicamente do teor

alcoólico do vinho e do emprego de vapor *direto*³ para aquecer o caldo. Sem o uso vapor direto e com fermentação de grau alcoólico acima de 12°GL tem-se uma relação próxima a 7 litros de vinhaça/litro de álcool. No outro extremo, quando existe incorporação de vapor e fermentação de baixo grau alcoólico se obtém até 15 litros (ELIA NETO & NAKAHODO, 1995). Com um valor médio de referência 10,85 litros de vinhaça por litro de etanol (ELIA NETO e NAKAHODO, 1995) e os dados de produção nacional de etanol (UNICA, 2013), pode calcular-se a produção de vinhaça no Brasil (Figura 1), que resulta ser de aproximadamente 250 milhões de m³ de vinhaça por ano nas últimas safras.

Figura 2. Produção estimada de vinhaça no Brasil.

Fonte de dados: UNICA (2013).

Segundo Ludovice (1997), a vinhaça possui uma coloração parda (Figura 3), escurecendo-se à medida que é oxidada pela exposição ao ar. Com a putrefação da matéria orgânica ganha turbidez e intensifica-se seu mau cheiro característico devido ao conteúdo em enxofre que permite a formação de mercaptanos⁴ (ELIA NETO, 2014). A vinhaça é extraída no processo de destilação a uma temperatura que varia de 85 a 90 °C quando não há reaproveitamento regenerativo do seu calor (ROSSETTO, 1987). Devido à utilização de ácido sulfúrico (H₂SO₄) nas dornas de fermentação o efluente possui características ácidas, com pH variando entre 3,5 e 5 (CETESB, 1982; ANA, 2009), o que a torna corrosiva. A variabilidade nas características de esta suspensão aquosa pode ser observada na Tabela 3 e Tabela 4. Apresenta uma importante quantidade de matéria orgânica biodegradável, com elevada DBO

³ No aquecimento direto, o vapor entra em contato com o caldo e, com sua condensação, aumenta o volume da água nas dornas.

⁴ São denominados como mercaptanos os compostos orgânicos que contem o grupo -SH.

e nitrogênio, o que a torna biologicamente ativa. Também possui uma elevada condutividade elétrica devido ao alto conteúdo de sais, sobretudo de potássio.

Figura 3. Vinhaça.
Fonte: Elia Neto (2014).

Na literatura são encontradas poucas informações sobre a caracterização da vinhaça, sendo muito referenciado o trabalho "Utilização de Restilo como Fertilizante em Solo Cultivado com Cana de Açúcar - Relatório Final", (CETESB, 1982) que agrupa dados de vinhaça obtidos por vários pesquisadores, desde o ano de 1952. Este trabalho apresenta largos intervalos de variabilidade procedentes de mostos de melaço, caldo e misto (Tabela 3).

Tabela 3. Parâmetros físico-químicos da vinhaça *in natura* resultante de três tipos de mostos diferentes.

Parâmetro	Melaço	Caldo	Misto
pH	4,2 – 5,0	3,7 – 4,6	4,4 – 4,6
DBO mg/l	25.000	6.000 – 16.500	19.100
DQO mg/l	65.000	15.000 – 33.000	45.000
Sólidos Totais mg/l	81.500	23.700	52.700
Sólidos Fixos mg/l	21.500	3.700	12.700
Nitrogênio mg/l	450 – 1.600	150 – 700	480 – 710
Fósforo mg/l P ₂ O ₅	100 – 290	10 – 210	9 – 200
Potássio mg/l K ₂ O	3.740 – 7.830	1.200 – 2.100	3.340 – 4.600
Cálcio mg/l CaO	450 – 5.180	130 – 1.540	1.330 – 4.570
Magnésio mg/l MgO	420 – 1.520	200 – 490	580 – 700
Sulfato mg/l SO ₄ ⁻²	6.400	600 – 760	3.700 – 3.730
Carbono mg/l C	11.200 – 22.900	5.700 – 13.400	8.700 – 12.100
Relação C/N	16 – 16,27	19,70 – 21,07	16,40 – 16,43
Matéria Orgânica mg/l	63.400	19.500	38.000
Substâncias redutoras mg/l	9.500	7.900	8.300

Fonte: CETESB (1982).

Outras caracterizações de referencia mais recentes são as obtidas em dois levantamentos realizados pelo Centro de Tecnologia Canavieira (CTC), o primeiro em 1995 (ELIA NETO & NAKAHODO, 1995) e o segundo em 2007 (ELIA NETO & ZOTELLI, 2008), onde são apresentadas as médias e os resultados extremos (Tabela 4). A composição e características da

vinhaça tem sofrido uma evolução temporal, consequência do progresso na tecnologia empregada na fabricação do etanol. Pode ser observado que a vinhaça atual é mais concentrada, tendo maior teor de sólidos e matéria orgânica que no passado, sendo esta uma consequência da evolução tecnológica das usinas.

Tabela 4. Caracterização físico-química da vinhaça obtida de levantamentos realizados no CTC.

Descrição	Uni.	Valores Médios		Valores extremos	
		CTC, 1995(*1)	CTC, 2007(*2)	Mínimo	Máximo
Alumínio	mg/L	-	18,30	< 5,0	120,0
Bário	mg/L	-	13,3	< 10	25,0
Cálcio (CaO)	mg/L	515,25	863,9	71	2614,7
Chumbo	mg/L	-	< 2,50	< 2,50	< 2,50
Cloreto	mg/L	1.218,91	-	480	2.300
Cobre	mg/L	-	0,50	< 0,2	3,2
Condutividade	µS/cm	-	6.553	3.780	12.500
DBO5	mg/L	16.949,76	11.331,1	5.879	75.330
DQO	mg/L	28.450,00	31.504,6	9.200	97.400
Dureza	mg/L	-	4.505,7	1.080	9.200
Etanol-CG	%v/v	0,09	-	0,01	1,19
Ferro	mg/L	25,17	14,71	2	200
Fósforo total	mg/L	60,41	32,0	< 10	188
Glicerol	%v/v	0,59	< 1,00	0,26	2,50
Levedura	%v/v	1,35	-	0,38	5,00
Lítio	mg/L	-	< 0,50	< 0,50	< 0,50
Magnésio (MgO)	mg/L	225,64	535,0	97	1.112,9
Manganês	mg/L	4,82	4,50	1	12
Nitrogênio total	mg/L	356,63	352,5	81,2	1.214,6
Nitrogênio amoniacal	mg/L	10,94	36,6	0,4	220,0
Nitrogênio nitrato	mg/L	-	< 0,8	< 0,1	4,2
Nitrogênio nitrito	mg/L	-	< 0,2	< 0,1	1,2
pH	-	4,15	4,8	3,50	4,90
Potássio total	mg/L	2.034,89	2.666,6	814	7.611,5
Resíduos Sedimentáveis	mg/L	2,29	7,0	0,1	40
Sódio	mg/L	51,55	30,6	2,7	220
Sólidos Dissolvidos Fixos	mg/L	11.872,36	7.517,7	921	24.020
Sólidos Dissolvidos Totais	mg/L	18.420,06	24.520,4	1.509	45.630
Sólidos Dissolvidos Volát.	mg/L	6.579,58	1.7004,3	588	29.325
Sólidos Suspensos Fixos	mg/L	294,38	< 327,8	< 20	2.350
Sólidos Suspensos Totais	mg/L	3.966,84	-	260	9.500
Sólidos Suspensos Voláteis	mg/L	3.632,16	4901,1	40	15.900
Sólidos Totais (ST)	mg/L	25.154,61	29.596,3	10.780	56.780
Sulfato	mg/L	1.537,66	861,2	92,3	3.363,5
Sulfito	mg/L	35,90	-	5	153
Temperatura	°C	89,16	-	65	110,5
Zinco	mg/L	-	< 1,0	< 0,5	4,6

Fontes: *1. ELIA NETO & NAKAHODO (1995); *2. ELIA NETO & ZOTELLI, (2008).

Uma característica que não aparece nestas referências é a eventual presença de antibióticos procedentes das dornas de fermentação que, por serem termostáveis permanecem ativos depois da destilação (BRASMETANO, 2011; OMNIS BIOTECHNOLOGY, 2013⁵; USINA SÃO MARTINHO, 2013⁶). Segundo Pires (informação verbal)⁷, existem grandes dificuldades para medir antibióticos na vinhaça, sendo que agora estão sendo desenvolvidos protocolos para identificar e quantificar a presença destes compostos.

Estas características fazem deste resíduo um potencial poluidor de solos, águas superficiais e subterrâneas, além de ser uma fonte potencial de emissão de metano, se não for adequadamente tratado. A vinhaça é classificada como resíduo líquido Classe II A – Não Inerte, por conter substâncias solubilizadas a concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água, conforme o anexo G da norma ABNT NBR 10.004 (ABNT, 2004).

2.2. Fertirrigação com vinhaça

Entende-se como fertirrigação o processo conjunto de irrigação e adubação, utilizando a própria água para distribuir o fertilizante na lavoura. No caso da fertirrigação com vinhaça, este resíduo é utilizado como fertilizante podendo assim substituir parte da adubação mineral. Existe variação entre as usinas sobre o método utilizado para realizar a fertirrigação, pelas particularidades relacionadas à orografia, espaçamento e localização dos talhões, etc., provocando uma infinidade de possibilidades, combinações e configurações para o transporte e a distribuição da vinhaça. Uma situação comumente encontrada é o recalque da vinhaça para cotas elevadas onde é armazenada em lagoas a céu aberto, a partir das quais é transportada ao canal mediante canais, dutos (LORENCINI, 2009), caminhões-tanque e rodotrem.

As lagoas de armazenamento são um reservatório de segurança que permitem amortecer as diferenças entre o ritmo de produção e o de distribuição, evitando a aplicação em excesso da vinhaça ou o descarte em áreas impróprias. Ainda, as lagoas são pontos de abastecimento de caminhões-tanque que junto com a aspersão representam os principais sistemas de distribuição e aplicação da vinhaça (PAREDES, 2011). Segundo a Norma CETESB P4.231 Dez/2006, na construção dos reservatórios e dos canais de distribuição, devem ser utilizadas geomembranas sintéticas de impermeabilização (PEAD, Asfáltica, PVC e geotêxtil).

⁵ Visita ao biodigestor instalado pela OMNIS BIOTECHNOLOGY na Usina Ester, Cosmópolis/SP, abril de 2013.

⁶ Visita ao biodigestor da usina São Martinho, Pradópolis/SP, novembro de 2013.

⁷ Informação dada pelo Prof. Dr. Eduardo Cleto Pires, durante o exame de qualificação da presente dissertação, São Paulo, agosto de 2014.

Entretanto, estas membranas não suportam a alta temperatura da vinhaça que sai da destilaria, sendo necessário, as vezes, sistemas de esfriamento. Além disso, tanto a instalação de bombas e tubulações, como a disponibilidade da frota de caminhões e sistema de aspersão, exigem elevados investimentos e custos de manutenção, proporcionais ao volume de vinhaça e à superfície a ser fertirrigada.

Existem vários sistemas de fertirrigação, sendo os mais importantes caracterizados a seguir. No passado, era comum a aplicação por **inundação**, onde a vinhaça diluída tinha entrada pela parte mais elevada do talhão, produzindo uma inundação bastante heterogênea, principalmente em solos arenosos. No início da distribuição podiam ocorrer danos à planta devido à elevada quantidade aplicada, com consequentes problemas de salinização do solo. Outro sistema ultrapassado é a aplicação por **infiltração**, técnica que exige uma preparação prévia do terreno com canais e sulcos com uma rigorosa sistematização, de acordo com a topografia e o tipo de solo. Mاتيoli e Menezes (1984) afirmaram que este sistema, pode demandar muita mão de obra, além da aplicação de dosagens excessivas e heterogênea, que podem implicar em graves prejuízos para a cultura e o solo. Diante destas dificuldades, seu emprego a passou a ser bastante restrito (LORENCINI, 2009).

Em um passado recente, o uso de **caminhões-tanque** era o sistema de fertirrigação mais difundido, como mostra o estudo realizado por Mاتيoli e Menezes (1984), o qual indicava a predominância do uso destes equipamentos nos canaviais paulistas, atingindo 80% da área total irrigada com vinhaça pura. Este sistema tem baixo custo de implantação e vantagens na mobilidade, mas precisa de estradas em bom estado, frota de veículos, sistematização dos talhões e um planejamento de corte de cana de modo a permitir a aplicação 24 horas por dia. Como desvantagens desse sistema se encontram a compactação do solo pelos veículos, a impossibilidade de aplicação na cana-planta, a inviabilidade da diluição da vinhaça e as dificuldades de aplicação em dias de chuva (ORLANDO FILHO *et al.* 1983). O caminhão-tanque transporta e distribui a vinhaça no campo, despejando-a pela traseira por gravidade ou bombeamento. A distribuição por gravidade é feita normalmente por chuveiros que podem atingir de 3 a 5 linhas de cana ou descarga rápida defletida em pratos formando um leque de distribuição (Figura 4). A distribuição por bombeamento é realizada com bombas acionada pela tomada de força do caminhão (ANA, 2009), o que proporciona uma vazão constante.

Figura 4. Descarga rápida defletida em pratos de um caminhão-tanque sobre a lavoura.
Fonte: Elia Neto (2014).

A capacidade do tanque varia entre 7 e 18 m³, sendo que os veículos de maior capacidade transportam e aplicam o resíduo mais economicamente, porém os de menor capacidade apresentam maior versatilidade. Este sistema está limitado pela distancia econômica do ponto de carregamento até as áreas de aplicação, devido principalmente ao consumo de combustível.

Posteriormente, passou a ser muito difundida a fertirrigação por **aspersão** onde, em primeiro lugar, são precisos canais, dutos ou o uso de rodotrem para o transporte da vinhaça até os talhões. Posteriormente, são aplicadas duas alternativas:

- a) sistema de montagem direta;
- b) carretel enrolador ou *hydroroll*.

A aspersão com montagem direta consiste em um conjunto motobomba com um aspersor tipo canhão-hidráulico, montado em chassi com rodas, aspergindo vinhaça sugada diretamente de um canal (Figura 5). O canhão pode ser equipado com extensões para aumentar o espaçamento entre canais e diminuir a necessidade destes nos canaviais, implicando em menores custos de implantação.

Figura 5. Aspersor tipo montagem direta sugada de canal.
Fonte: ANA (2009).

Igualmente, o carretel enrolador precisa de uma motobomba que alimente as tubulações donde são acoplados estes equipamentos. Este é um sistema que possui um aspersor tipo canhão, montado em um pequeno chassi com rodas que se desloca continuamente puxado pela própria mangueira ao ser enrolada no carretel (Figura 6). O carretel gira acionado por uma turbina hidráulica com um redutor de velocidade.

Figura 6. Carretel enrolador com captação no canal e acoplado diretamente no caminhão.
Fonte: ANA (2009).

Segundo Leme *et al* (1979), o método de aplicação de vinhaça por aspersão com canhão hidráulico, apresenta como vantagem poder ser usado em áreas com declive acentuado e operado em qualquer tipo de solo, assim como em todos os ciclos e fases da cultura. Este sistema permite um perfeito controle da quantidade de vinhaça aplicada, irrigando extensas áreas por unidade de tempo, o que implica em baixo custo operacional e em economia de mão-de-obra. Como inconveniente este sistema apresenta a curta vida útil dos aspersores e das tubulações de aço zincado ou alumínio, devido ao elevado poder corrosivo da vinhaça.

A distância econômica de aplicação de vinhaça é definida a partir do ponto em que os custos de transporte seriam maiores aos da adubação mineral. Esta distância é função da topografia local e da concentração de potássio da vinhaça, pois estas variáveis afetam o transporte e a aplicação, que são comparados com os custos de adubação mineral. Segundo o manual da ANA (2009) em um passado recente, o sistema de “rodotrem e aspersão” apresentava a distância econômica de 12 km, mas com o incremento dos preços do adubo mineral, Elia Neto *et al.* (2008) estimou que a distância econômica é de aproximadamente 38 km (Figura 7).

Figura 7. Distância econômica de fertirrigação.

Fonte: ELIA NETO *et al.* (2008).

Existem poucos estudos publicados sobre a porcentagem da área de cultivo classificada por sistema de fertirrigação. As referências mais recentes são Macedo (2004) e Souza (2005) utilizando dados do ano de 2002, para as usinas associadas à Copersucar⁸, mostrados na Tabela 5.

Tabela 5. Sistemas de aplicação de vinhaça nas lavouras de cana-de-açúcar do Estado de São Paulo.

Sistema de transporte e aplicação	Maquinaria	% da área fertirrigada	Dosagem m³/ha
Caminhão-tanque aplicando diretamente	MB2318 com tanque de 15 m³	6	100
	Montagem direta	10	
Aspersão	Canal com rolão	53	150
	Rodotrem com dois tanques de 30 m³/cada e rolão	31	
TOTAL		100	131,5

Fonte: Macedo *et al* (2004) e Souza (2005).

Conforme se verifica na Tabela 5, as diferentes formas de aspersão são utilizadas em 94% da superfície fertirrigada. Por outro lado, a superfície que precisa de vinhaça transportada em caminhão é de 37%, sendo o restante transportado em canais.

⁸ <http://www.copersucar.com.br/>

2.3. Concentração da vinhaça

2.3.1. Processo da concentração

Concentrar a vinhaça, através do processo físico da evaporação, é uma das alternativas para economizar no seu transporte. A evaporação permite concentrar os sólidos presentes na vinhaça em uma parte do líquido e o vapor resultante pode ser condensado para fornecer água de reúso ao processo da usina.

A evaporação é uma importante operação unitária⁹ dos processos na indústria química, abrangendo: alimentos, polpas e papel, sucroalcooleira, farmacêuticas, fertilizantes, etc. É utilizada basicamente para concentrar uma solução, que consista de um soluto não volátil e um solvente volátil. O princípio de funcionamento dos evaporadores é uma superfície de transferência de calor do fluido de aquecimento com a dissolução que se quer concentrar, não havendo contato entre eles e existindo só uma troca térmica. O fluido a concentrar deve circular por um meio que permita a separação do vapor e do líquido concentrado.

O tipo de equipamento utilizado depende das características do soluto e do solvente. O soluto pode ser termo-sensível, tender a polimerizar, aglomerar ou incrustar sobre a área de troca térmica. Por outro lado, o solvente pode ter alta viscosidade dificultando o fluxo e a troca térmica (ETAL, 2011)¹⁰, sendo que a viscosidade do concentrado é normalmente o que determina o limite superior de concentração (GEA, 2007). A seleção do evaporador também depende da concentração e da taxa de evaporação que precisa ser obtida, do tipo de sistema de aquecimento ou recuperação de calor, e em particular da viscosidade do fluido. A Tabela 6 resume as propriedades físicas da vinhaça procedente da destilação da cana-de-açúcar que determinam o tipo de equipamento a escolher.

Tabela 6. Propriedades físicas da vinhaça *in natura* e concentrada.

	Vinhaça <i>in natura</i>	Vinhaça concentrada
Teor de sólidos	23 - 81 g/l (CETESP, 1982)	500 - 650 g/l (50 a 65 °Brix) ¹¹
Viscosidade	1 cP	20 a 150 cP

⁹ Na engenharia química e em seus campos relacionados, uma operação unitária é uma etapa básica de um processo. Um processo tem várias operações unitárias presentes para que possa se obter o produto desejado. Uma operação unitária sempre tem o mesmo objetivo, independente da natureza química dos componentes envolvidos (ISENMANN, 2013).

¹⁰ ETAL. Sistemas evaporativos para indústria de alimentos, <http://www.etaltecnologia.com.br/>, 2011.

¹¹ O grau Brix (°Bx) indica a quantidade total de sacarose dissolvida em um líquido. Uma solução de 25 °Bx contém 25 g de açúcar (sacarose) por 100 g de dissolução. No caso da vinhaça, os sólidos presentes não são somente sacarose. Por este motivo, para medir a concentração da vinhaça, convencionalmente se utiliza a seguinte definição de grau Brix: gramas de sólidos totais dissolvidos por cada 100 gramas de efluente.

	Vinhaça <i>in natura</i>	Vinhaça concentrada
Densidade	1.030 kg/m ³	1.300 – 1.400 kg/m ³
Temperatura	60 - 100 °C	50 - 60 °C

Fonte: Adaptado de GEA, 2007.

Tradicionalmente, os evaporadores de película descendente (*falling film*) são usados para baixas viscosidades (de até 100 cP¹²) e elevadas taxas de evaporação para instalações de grande porte com capacidade para concentrar até 150 m³ de vinhaça *in natura* por hora (GEA, 2007). Neste tipo de evaporador, uma película de fluido a ser concentrado desce por gravidade mantendo o contato com a superfície de troca térmica. Durante este contato o fluido se aquece até a volatilização do solvente em forma de vapor. A Figura 8 ilustra como são os fluxos de massa dentro do evaporador. Os termos vapor vivo e vapor vegetal¹³ designam, respectivamente, ao vapor de aquecimento e ao proveniente da evaporação.

Figura 8. Evaporador de película descendente.
Fonte: Adaptação de animação da GEA (2014).

Segundo Rodrigues (2008), esta é a tecnologia para concentração oferecida por *Vogelbusch*, GEA e Alfa Laval, entre outros fabricantes, mas este tipo de evaporador sofre os

¹² A unidade no Sistema Cegesimal de unidades para a viscosidade dinâmica é o poise (P). O centipoise (cP) é seu submúltiplo mais usado.

¹³ Nas usinas de álcool é denominado como “vapor vivo” o vapor de processo, e como “vapor vegetal” aquele vapor resultante da evaporação da água em uma operação de concentração.

problemas relacionados à rápida incrustação e cristalização espontânea à medida que o teor de sólidos aumenta. As incrustações diminuem a troca térmica e a eficiência do evaporador, aumentando consequentemente as paradas, insumos para limpeza e custos para manutenção. Para evitar este problema foi desenvolvida a tecnologia de névoa turbulenta descendente também conhecida por *Thermally Accelerated Short Time Evaporator* (TASTE), onde o líquido a concentrar é transformado em névoa na entrada do evaporador por meio de um difusor.

O processo de evaporação precisa de muita energia, consequentemente a viabilidade de seu emprego depende determinantemente de diminuir o consumo de combustíveis, pois normalmente o vapor saturado procedente de caldeiras é utilizado como fonte de calor. Para reduzir o consumo utilizam-se basicamente duas estratégias: o sistema de evaporação em múltiplos efeitos e o uso de fontes residuais de calor.

Figura 9. Tecnologia *Thermally Accelerated Short Time Evaporator* (TASTE).
Fonte: Adaptado de LME (2014)¹⁴, e Dedini (2010)¹⁵.

No sistema de evaporação em múltiplos efeitos (Figura 10), um evaporador é montado em continuação ao outro, de modo que o vapor vegetal de um evaporador é utilizado como fonte de calor para o seguinte e assim sucessivamente. Cada evaporador individual é chamado de “efeito”. O vapor vegetal produzido no último efeito passa por um condensador, encerrando o processo.

Quanto maior o número de efeitos, maior será a redução do consumo de energia. Além da economia de vapor, também se obtém uma economia de água de resfriamento no condensador, já que este último condensa somente o vapor vegetal gerado no último efeito.

¹⁴ www.lme.com.br.

¹⁵ DEDINI. Concentração de Vinhaça. Tecnologia T.A.S.T.E “Thermally Accelerated Short Time Evaporator”, 2010.

Por outro lado, o aumento de número de efeitos aumenta os custos de investimento e de manutenção (CARVALHO; SILVA, 2008)

Figura 10. Evaporador de seis efeitos.
Fonte: Dedini, 2010

Com relação ao uso de fontes residuais de calor, existem duas possibilidades:

- acoplar o evaporador à coluna de destilação de tal forma que os vapores provenientes dela sirvam como fonte de calor para o seguinte efeito. Isto é, a coluna de destilação funcionaria como se fosse o primeiro efeito do evaporador.
- utilizar os gases da caldeira produzidos na combustão do bagaço como fonte de aquecimento, mas isto exige de mais potência de exaustão para coseguir evacuar os gases pela chaminé. Esta tecnologia encontra-se em desenvolvimento.

Segundo o fabricante Citrotec SL (2013)¹⁶, que fornece três modelos de evaporadores de múltiplo efeito baseados no princípio de névoa turbulenta, os consumos de vapor dos equipamentos são os mostrados na Tabela 7. Este fabricante indica que, para seus modelos com aproveitamento de calor residual, não é necessário consumo de vapor adicional.

Tabela 7. Consumo de vapor por diferentes modelos de evaporadores.

Tecnologia:	Fonte de calor	Número de efeitos	Consumo de kg vapor por kg de evaporação
Ecovin®	Vapor de processo de 1,5 bar	5	1:4,3
		6	1:5,3
		7	1:6,2
EcovinJL®	Vapor de colunas de destilação	5-7	0
Ecowaste®	Gases de exaustão das caldeiras	5-7	0

Fonte: Citrotec®, 2013

¹⁶ <http://www.citrotec.com.br/>

2.3.2. Implantação da tecnologia e estudos de caso

A partir do ano 2009, a utilização de concentradores de vinhaça se encontra em expansão. As normas que restringem a dosagem de vinhaça, assim como a disponibilidade de equipamentos que aproveitam calor residual de outros processos, têm impulsionado este aumento na implantação. Os primeiros evaporadores de vinhaça datam de 1954, instalados pela companhia austríaca *Vogelbusch*. Esta empresa desenvolveu o evaporador *falling film*, mostrado na Figura 8, também chamado de película fina, que utiliza o princípio de evaporação de filme descendente (BIASE, 2007). As primeiras experiências no Brasil datam de 1978, sendo que um caso foi o da Usina Tiúma/PE, com um evaporador integrado na destilaria, e outro caso foi o da Usina Santa Elisa/SP, mas estas unidades apresentavam problemas com incrustações e elevado consumo energético respectivamente (CARVALHO; SILVA, 2008). O uso de sistemas *Clean-in-Place* (CIP)¹⁷ e TASTE reduziram as incrustações. O consumo energético foi diminuído com sistemas de cogeração e com aproveitamento de calor residual utilizando concentradores acoplados à destilaria. No ano 2014, os principais fornecedores de equipamentos no Brasil são a empresa Citrotec®¹⁸ e a Dedini®¹⁹.

Figura 11. Concentrador de vinhaça Ecovin.
Fonte: Citrotec® (2014).

A unidade do Grupo Cerradinho (atual NG Bioenergia), em Potirendaba/SP, instalou em 2008 um concentrador de vinhaça com capacidade para passar 100 m³/h de 4,5° Brix até 22° Brix (JORNALCANA, 2009). A partir desse momento várias destilarias tem adquirido

¹⁷ *Clean-in-place* (CIP) é um método que utiliza químicos para a limpeza sem desmontagem, sendo empregado para superfícies internas dos tubos, vasos, equipamentos de processo, filtros e acessórios associados.

¹⁸ www.citrotec.com.br

¹⁹ www.codistil.com.br/

este equipamento, como indica Santa Cruz (2011). Na Tabela 8 se enumeram exemplos de usinas que tem instalado concentradores de vinhaça.

Tabela 8. Concentradores de vinhaça instalados.

Usina	Localização	Capacidade do concentrador
Usina Boa Vista (Grupo São Martinho)	Quirinópolis/GO	200 m ³ /h
Usina Rio Pardo	Cerqueira César/SP	110 m ³ /h
Usina Angélica	Angélica/MS	200 m ³ /h
Usina Guarani (Unidade Cruz Alta)	Olímpia/SP	220 m ³ /h
Usina Santa Rosa	Boituva/SP	?
Usina Zanin	Araraquara/SP	?
Usina da Pedra	Serrana/SP	?

Fonte: Citrotec® (2014) e Santa Cruz (2011).

Estas usinas contam geralmente com caminhões de 12 a 15 m³ de capacidade adaptados para aplicação da vinhaça concentrada como biofertilizante. Os caminhões são preparados para fertilizar várias ruas ao mesmo tempo, aplicando o concentrado sobre as linhas de cana. Este tipo de aplicação é muito mais eficiente ao uso da vinhaça que os sistemas de aspersão, pois não existem perdas nos dutos nem na entrelinha (Figura 12).

Figura 12. Caminhão aplicando vinhaça concentrada.

Fonte: Barganha (2010)²⁰.

²⁰ https://www.youtube.com/watch?v=eDG-O6_z_Pw

2.4. Biodigestão anaeróbia da vinhaça

2.4.1. Processo da biodigestão

A digestão anaeróbia é realizada por diversos grupos de microrganismos que convertem a matéria orgânica complexa em biogás, amônia, água e novas células bacterianas (SALOMON, 2007). Este é um processo complexo que envolve muitas espécies de bactérias e sucessivas etapas intermediárias. As principais reações bioquímicas que ocorrem no processo estão representadas na Figura 13 e descritas a seguir (LETTINGA & RINZEMA, 1985):

Figura 13. Processo de biodigestão anaeróbia.

Fonte: Salomon (2007), adaptado de Lettinga e Rinzema (1985).

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

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

3º) Acetogênese: Nesta etapa os produtos formados anteriormente são oxidados para acetato, hidrogênio e gás carbônico. De todos os produtos produzidos por estes microrganismos, somente o acetato e o hidrogênio podem ser assimilados pelas *arqueas metanogênicas*.

4º) Metanogênese: O processo de degradação é finalizado nesta etapa, que consiste na transformação dos produtos formados anteriormente em metano e dióxido de carbono pelos microrganismos do grupo de *arqueas hidrogenotróficas*.

2.4.2. Biodigestores para vinhaça

Existem numerosos tipos de biodigestores disponíveis no mercado, podendo funcionar em bateladas ou em fluxo contínuo. Na indústria do etanol seriam mais adequados os reatores de fluxo contínuo, dada a grande produção de vinhaça. Segundo estudos realizados por Souza *et al.* (1992) os reatores tipo *Upflow anaerobic sludge blanket* (UASB) se mostrariam adequados para tratamento da vinhaça. O reator UASB consiste em um tanque onde o efluente a tratar, no caso, vinhaça *in natura*, é injetado na parte inferior, atravessando de forma ascendente uma manta de lodo formada por grânulos de micro-organismos. Na sua parte superior há um separador trifásico, onde é retido o lodo no reator, captado o biogás e retirado o efluente tratado (Figura 14). O problema deste tipo de reator é que quando submetido a alto carregamento orgânico, a turbulência na zona de decantação pode se tornar muito grande devido às elevadas taxas de produção de biogás, resultando no arraste para fora do reator do lodo ativado.

Figura 14. UASB. Reator anaeróbio de fluxo ascendente.
Fonte: PAQUES (2014)²¹.

²¹ <http://br.paques.nl/>

Para evitar esta perda de lodo foi desenvolvido o *Internal Circulation Reactor* (IC), que consiste basicamente na instalação de dois reatores UASB sobrepostos, onde o reator inferior recebe um alto carregamento orgânico deixando o superior com pouca carga (estágio de polimento). Sua principal vantagem é a separação do biogás em dois estágios, pois o gás coletado no primeiro estágio proporciona o arraste de efluente e lodo para o topo do reator. Aqui o lodo é separado e internamente recirculado à parte inferior do reator. Este tipo de reator é muito empregado no tratamento dos efluentes das cervejarias.

Figura 15. Reator anaeróbio de Circulação Interna (IC).
Fonte: PAQUES (2014).

Por último, também existe a possibilidade de tratamento do efluente em lagoas anaeróbias. Estas lagoas ocupam grandes áreas, com uma profundidade de 4 a 6 m, sendo revestidas com geomembrana e cobertas para a coleta do biogás. São reatores que exigem elevados volumes, pois a taxa de aplicação varia de 2 a 3 kg DQO/m³dia. O grande volume dificulta a homogeneização do meio e o controle da temperatura podendo aparecer caminhos preferenciais, reduzindo assim a eficiência (PROCKNOR, 2009).

As diferenças entre a capacidade de tratamento destes sistemas de tratamento aparecem na Tabela 9.

Tabela 9. Taxa de aplicação das diferentes tecnologias para a digestão de vinhaça.

Tipo de tecnologia	Taxa de aplicação kgDQO/m ³ dia
Lagoas anaeróbias	2 a 3
UASB	8 a 10
IC	25 a 30

Fonte: Procknor (2009).

A biodigestão modifica as características químicas da vinhaça *in natura*, principalmente se observam os seguintes efeitos (Tabela 10):

- a) elevação do pH até atingir valores neutros;
- b) substancial diminuição da DBO e DQO;
- c) aumento da quantidade de nitrogênio amoniacal,
- c) permanência constante do conteúdo em potássio.

Tabela 10. Características físico-químicas da vinhaça biodigerida – 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 P ₂ O ₅ (mg/l)	17	32
Sulfato (mg/l)	450	32
Potássio K ₂ O (mg/l)	1400	1400

Fonte: Cortez *et al.* (1998).

2.4.3. O biogás de vinhaça

Segundo Pompermayer e Paula (2000), a proporção em volume de CH₄ presente no biogás produzido a partir de vinhaça é de 55 a 65%, e o restante esta constituído principalmente por CO₂. A Usina São Martinho (2013) informa que o valor obtido no seu biodigestor é próximo a 50% em CH₄. A composição do biogás resultantes da digestão de resíduos orgânicos em geral aparece na Tabela 11.

Tabela 11. Composição do biogás em geral

Gases	Porcentagem (%)
Metano (CH ₄)	50 - 80
Dióxido de Carbono (CO ₂)	25 - 40
Nitrogênio (N)	0,5 - 2,5
Oxigênio (O)	0,1 - 1
Acido sulfídrico (H ₂ S)	1 - 2
Hidrogênio (H)	1 - 2

Fonte: Coelho *et al.* (2004).

O Poder Calorífico Inferior (PCI) do biogás é variável dependendo da concentração de metano. Normalmente chega a 60% do PCI do gás natural de aproximadamente 40 MJ/Nm³ (SGC, 2012).

O biogás é um gás corrosivo, exigindo cuidados especiais com os materiais empregados nos equipamentos utilizados. Esta característica é consequência da presença de sulfeto de hidrogênio (H₂S). Na combustão do biogás, este sulfeto é oxidado e transformado em dióxido de enxofre (SO₂). A amônia, também presente no biogás em baixas concentrações, é corrosiva para o cobre e pode emitir como produto da sua combustão os óxidos de nitrogênio (NO_x)

2.4.4. Limpeza, compressão e armazenamento de biogás

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

- **Remoção de umidade:** Pode ser feita por condensação, com glicóis, com sílica gel, etc. Dependendo da utilização final do gás será estabelecido o grau de umidade aceitável.
- **Remoção de CO₂:** Existe uma variedade de processos de remoção do CO₂ presente no gás natural utilizado pelas indústrias petroquímicas, podendo ser por absorção física e química, adsorção em uma superfície contínua, separação por membranas, separação criogênica e a partir de conversão química.
- **Remoção de H₂S:** Os principais processos de remoção de H₂S utilizados podem ser biológicos ou químicos.
- **Remoção de Partículas:** Os tipos mais comuns de lavadores são os lavadores tipo torre, centrífugos e Venturi.

Uma vez extraído o metano do biogás, este não pode ser facilmente armazenado e nem liquefeito à pressão e temperatura ambiente. Para ser transportado e utilizado como combustível para veículos, o metano é armazenado em botijões de aço, com uma pressão de 200 bar.

2.4.5. Tecnologias de conversão energética do biogás

Existem diferentes tecnologias de conversão energética do biogás, estando cada uma delas em diferentes estágios de desenvolvimento ou comercialização. A seguir são resumidas as características mais importantes de cada tecnologia disponível:

- **Motor de combustão interna alternativo:** São máquinas simples e robustas, sendo os equipamentos mais utilizados para queimar biogás por sua flexibilidade. Podem utilizar diversos tipos de combustíveis líquidos ou gasosos tais como óleo diesel, óleo pesado, gás natural, biogás ou ainda uma mistura deles. Os motores diesel e Otto são facilmente adaptados para biogás, mas atualmente já são preparados para queimar biogás com diferentes teores de metano, dióxido de carbono e ácido sulfídrico. Normalmente são aplicados para fornecer pequenas e médias potências elétricas, da ordem de centenas de kW até dezenas de MW. A eficiência dos motores²² praticamente não é alterada com as condições ambientais como o são as turbinas a gás (PECORA, 2006). O problema desta opção é seu consumo de óleo lubrificante e as manutenções frequentes.

- **Caldeiras:** A adaptação desses equipamentos para uso do biogás pode ser realizada através de pequenas modificações. Os níveis de umidade do gás devem ser controlados com a instalação de purgadores e linhas de condensado para impedir danos aos equipamentos e problemas na operação das caldeiras. Para a adaptação das caldeiras para a queima do biogás deve-se aumentar a vazão de combustível, uma vez que o biogás possui menor quantidade de metano que o gás natural. A instabilidade da chama - decorrente da menor concentração de metano e das flutuações na composição do biogás - pode ser controlada com a instalação de sensores ultravioletas que monitoram a chama da caldeira impedindo que esta apague, ou com o uso de um sistema de combustível auxiliar. A corrosão devido à umidade e ao ácido sulfídrico presentes no biogás é outro problema para as caldeiras. O revestimento do pré-aquecedor e da chaminé com material anticorrosivo, o controle da temperatura dos gases de exaustão acima do ponto de orvalho e a circulação adequada da água podem reduzir os efeitos corrosivos (USEPA, 1991).

- **Microturbinas a gás:** As microturbinas são fabricadas na faixa de potência de 15 a 300 kW. O conteúdo de metano não afeta a eficiência, desde que o teor volumétrico do CH₄

²² Com gás natural a eficiência é de 40% e com biogás pouco mais de 30%. (COELHO *et al.*, 2006).

seja superior a 35% (PECORA, 2006). O custo por potência instalada é consideravelmente superior ao motor.

- **Uso veicular do biogás.** Uma vez extraído do biogás, o metano pode ser utilizado em motores de veículos nas mesmas condições que o gás natural. Existe a possibilidade de transformar veículos de gasolina e diesel para seu funcionamento com metano fazendo modificações no tanque de armazenagem de combustível, no motor e no chassi. Para o armazenamento o gás, este é comprimido de 204 a 245 bar antes de ser bombeado para os cilindros de alta pressão. Os motores de ciclo Otto que utilizam gasolina podem ser facilmente modificados para o funcionamento com metano, trocando o sistema de injeção de combustível e regulando os sensores e computadores que ajustam a mistura de ar e combustível. No caso dos motores diesel, existem duas possibilidades de modificação para operar com metano: operação bi-combustível (diesel-metano) com ignição por injeção de combustível piloto, e funcionamento unicamente a gás utilizando ignição por faísca. No primeiro caso, a tecnologia diesel *dual-fuel* (dff) utiliza o diesel como chama piloto e o gás natural como combustível principal, sendo necessária a modificação do sistema de injeção eletrônica de combustível. No segundo caso o motor tem que ser transformado para ciclo Otto, retirando os injetores, colocando velas de ignição e um gás carburador, além de diminuir a taxa de compressão.

2.4.6. Implantação da tecnologia e estudos de caso

Pinto (1999) relata que a primeira experiência de grande porte no Brasil com a digestão anaeróbia da vinhaça foi realizada na Destilaria Central Jacques Richer, em Campos/RJ, que tinha uma produção de 180 m³ de álcool por dia. Segundo Campos (1981) o biodigestor de 330 m³ funcionou até 1982, obtendo uma média de eliminação de DQO de 62%, com 16,5 litros de biogás por cada litro de vinhaça, com 55 % de CH₄, com um tempo de retenção de 10 dias. O gás foi utilizado na caldeira sem modificação dos queimadores, originalmente projetados para trabalhar com óleo combustível. O biodigestor trabalhava a 35°C e foi inoculado com esterco de boi que durante 60 dias foi adaptado à vinhaça.

Em 1981, o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) iniciou uma experiência na unidade Penedo Agroindustrial Destilaria, em Penedo/AL, em que se pesquisou a digestão anaeróbia da vinhaça a 32°C, utilizando-se dois biodigestores de fluxo ascendente com 11 e 24 m³. A Confederação Nacional de Indústria (CNI) publicava em 1982 (CNI *apud* PINTO,1999) que a produção média de gás foi de 13,1 litros por litro de vinhaça, com 65 % de CH₄, um tempo de retenção de 1,5 dias e remoção de 95 % da DQO.

Em 1984, a CODISTIL - com tecnologia holandesa para digestores anaeróbios UASB, chamada METHAX BIOPAQ - instalou estes digestores na Usina São Luís, em Pirassununga/SP, e na Destilaria São João. Segundo Pinto (1999), na Usina São Luís o projeto foi desativado pouco tempo depois, mas a Destilaria São João, cuja capacidade é de 300 m³ de álcool por dia, produzindo 3.000 m³ de vinhaça, manteve em operação uma planta de biodigestão anaeróbia de vinhaça até o final de 1997. O projeto era parcialmente financiado pelo Governo Brasileiro e a ideia era criar uma demonstração do funcionamento da tecnologia (CORTEZ, 1998). Esta planta era equipada com um reator UASB, cuja capacidade era de 1500 m³/dia, com carga efetiva de cerca de 1.000 m³/dia e remoção de 85% da DQO, operando em temperatura de 35°C e sendo efluente usado como fertilizante no canavial. O biogás gerado, que tinha um teor de 70% de metano, era purificado até 98% de metano, comprimido a 220 bar e armazenado em cilindros de 400 Nm³ de capacidade. Segundo Barberi (1998), a produção média global foi de 4.274 Nm³/dia, com um pico de 7.190 Nm³/dia na safra 92/93. O metano comprimido era utilizado para movimentar 41 veículos da destilaria que foram convertidos para o seu uso, sendo 50% da frota de caminhão e 40% da frota de veículos utilitários; a maioria era movida a álcool anteriormente.

Segundo Barberi (1998) o rendimento dos veículos movidos a gás metano superou o dos movidos a álcool e dos caminhões a diesel, uma vez efetuadas as mudanças necessárias para sua adaptação. Porém, o diesel não podia ser substituído nos motores de alta potência dos treminhões (240 CV), utilizados pela indústria para o transporte da cana. A Destilaria São João resolveu suspender o programa de uso do metano a partir da safra de 1996/1997. Isto porque, no caso dos motores movidos a álcool, não existia interesse em substituir este combustível que é produzido pela destilaria. Para os motores a diesel dos treminhões, os resultados não foram satisfatórios, sendo constatada muita perda de potência e aumento da frequência de manutenção. Estes problemas só podiam ser superados mudando a estrutura do motor.

Na Usina São Martinho, em Pradópolis/SP, encontra-se um exemplo de digestão anaeróbia da vinhaça que funciona até os dias de hoje. Esta usina de grande porte tem uma capacidade de moagem de 8,5 milhões de toneladas de cana por safra (SÃO MARTINHO, 2013). Com uma produção de 20.000 m³ de vinhaça por dia, este resíduo possui uma concentração de sólidos de 2,6°Brix e uma DQO que varia entre de 20 a 30 g/l. Com uma temperatura superior a 60°C na tubulação de saída, é retirada uma quantidade próxima a 45m³/h de vinhaça *in natura* que é armazenada temporariamente em um tanque de

equalização de 800 m³. Deste depósito passa a um tanque de mistura onde é diluído numa vazão de 190 m³/h proveniente do biodigestor, de 5.000 m³ de capacidade. O controle da temperatura da vinhaça na entrada do biodigestor é feita através de dois trocadores de calor, um que utiliza água para resfriamento e outro que emprega a própria vinhaça como fonte de calor. Este processo de controle é automatizado e mantém uma temperatura no entorno de 55°C no interior do biodigestor. A vinhaça é injetada no fundo do biodigestor, onde atravessa uma camada de lodo de aproximadamente 1 m. Na parte superior, a vinhaça é direcionada para dois decantadores, que recuperam o lodo e o recirculam no biodigestor. O esquema do processo descrito é representado na Figura 16.

O biogás, com um conteúdo de metano em volume de 50% segundo foi informado pelos técnicos (SÃO MARTINHO, 2013), é capturado na parte superior e direcionado para um sistema de limpeza de umidade antes de ser encaminhado para o secador tipo *spray drier*, onde o poder calorífico do biogás é aproveitado para a secagem de levedura. Este sistema não incorpora a limpeza de H₂S, pois sua produção é inferior a 1% em volume (SÃO MARTINHO, 2013). Dependendo da produção de levedura, o biogás produzido não é suficiente para sua secagem, tendo que ser utilizado vapor. O sistema de exaustão do secador não possui tratamento dos gases.

Figura 16. Esquema do processo do biodigestor da Usina São Martinho.
Fonte: Autor, a partir de visita de campo (2013).

O maior problema de operação deste sistema é o controle do pH, que limita a carga orgânica introduzida. A diminuição do pH pode ser realizada através do aumento da recirculação (diminuição da carga orgânica), ou introduzindo sosa cáustica, mas o uso deste insumo é limitado pelo custo. Outro fator para a baixa carga orgânica que suporta o biodigestor é devida à carência de micronutrientes contidos na vinhaça que limita a produção e a atividade dos microrganismos. Igualmente, a adição destes micronutrientes é inviabilizada pelos custos. Quando são aplicados antibióticos durante o processo de produção do etanol, a operação consiste em evitar a entrada da vinhaça no biodigestor durante 48 a 72 h depois da centrifugação das dornas.

Outro sistema recentemente instalado é a lagoa de alta taxa instalada na Usina Ester em Cosmópolis/SP. A empresa OMNIS Biotechnology S.A. desenvolveu este projeto de escala piloto com o financiamento da Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL), empresa de distribuição de energia do interior de São Paulo.

Segundo os técnicos do sistema (OMNIS, 2013), a Usina Ester produz 600 m³/h de vinhaça com 20 a 60 kg de DQO/m³. Não existe tratamento químico da vinhaça antes da entrada no biodigestor, mas é resfriada da temperatura de chegada de 65°C até 50°C por meio de uma coluna de resfriamento, chegando ao reator a 38°C. O esquema do processo é representado na Figura 17.

Figura 17. Esquema do processo do biodigestor da Usina Ester.

Fonte: Autor, a partir de visita de campo (2013).

A vinhaça resfriada passa para um tanque onde é misturada com vinhaça proveniente do reator, sendo diluída nesta com a consequente diminuição de temperatura e aumento do pH. Depois, a vinhaça é injetada na parte inferior da lagoa em vários pontos (Figura 18).

Figura 18. Imagem do sistema de biodigestão da Usina Ester.
Fonte: Autor, visita de campo (2013).

Como foi mencionado, o tipo de biodigestor utilizado é uma lagoa de alta taxa, com um volume de 15.000 m³, de dimensões 60×40×7 m e uma capacidade de tratamento de 2 kgDQO/m³dia. Com um tempo de residência de 12 dias foi informada uma eficiência de remoção de DQO em 95% (OMNIS, 2013). Com relação à produção de biogás, o biodigestor consegue 0,2 m³ de biogás/kgDQO, variando de 4 a 12 m³ de biogás/ m³ de vinhaça, mas a empresa não informou a proporção de metano presente. O biogás passa por um processo biológico de dessulfurização, para ser resfriado e utilizado em um motor gerador de 1 MW_e. Segundo a OMNIS (2013), a lagoa tem potencial para gerar combustível para um sistema de até 1,5 MW_e. O consumo das cargas internas do sistema é de 4% da energia gerada.

Para a operação, é necessária uma comunicação entre a usina e a central de controle do biodigestor para alertar sobre o uso de antibióticos nas dornas. Durante as três safras de funcionamento, só teve um evento onde foi prejudicada a produção de biogás e ocorreu por 3 dias quando foram detectadas 10 ppm de antibiótico termoestável na vinhaça.

O modelo de negócio adotado consiste em que a usina leve uma porcentagem do lucro da venda de energia elétrica pelo fornecimento da vinhaça.

A Cetrel, em parceria com o Grupo JB, inaugurou em 2012 uma termoelétrica a partir de biogás de vinhaça. As instalações estão localizadas na unidade industrial da Companhia Alcoolquímica Nacional, usina do Grupo JB, em Vitória de Santo Antão/PE. Foram

investidos R\$ 15 milhões e a potência instalada é de 0,85 MW com motogeradores tratando aproximadamente mil metros cúbicos de vinhaça/dia (DIARIO DE PERNAMBUCO, 2012)²³.

O empreendimento de maior porte na atualidade é o da empresa GEO-Energética, que tem 4 MW elétricos instalados no Estado de Paraná. Depois de um amplo trabalho de pesquisa na geração de biogás, R\$ 55 milhões de investimento e um difícil *start-up* no ano 2012, a planta está gerando energia elétrica firme (365 dias por ano), a partir de biogás de vinhaça e outros resíduos sólidos orgânicos do setor, sendo utilizados bagaço, palha e torta de filtro, sendo esta sua grande novidade em comparação aos outros sistemas que só utilizam a vinhaça (GEO-ENERGÉTICA, 2014)²⁴.

2.5. Combustão da vinhaça

2.5.1. Características da vinhaça como combustível

A vinhaça *in natura* contém aproximadamente 95% de água, o que torna sua combustão impossível. Portanto, para viabilizar a queima é necessário aumentar a sua concentração até atingir suficiente teor de sólidos.

Segundo Rocha (2009), testes realizados indicam que a partir de 60% de sólidos a vinhaça já possui um poder calorífico suficiente para a queima. Por outro lado, determinar o teor de sólidos que torna a combustão economicamente viável deve ser considerado o balanço entre o consumo de energia para a concentração e a energia produzida pela incineração.

Avram *et al.* (2006) mediram a composição elementar, teor de água, cinzas e poderes caloríficos superior e inferior para uma vinhaça concentrada proveniente de mosto misto (Tabela 12). Com já foi mencionado, exististe uma variação importante entre as vinhaças produzidas nas destilarias e, por este motivo, o poder calorífico e a viscosidade dependerão do teor de sólidos e da proporção entre os constituintes (ROCHA, 2009).

Tabela 12. Parâmetros da vinhaça concentrada

Parâmetro	Vinhaça seca livre de cinza	Vinhaça seca	Vinhaça em forma de combustível líquido 65 °Bx
Carbono % peso	41,19	32,85	21,36
Hidrogênio % peso	6,47	5,16	3,35
Enxofre % peso	1,60	1,28	0,83
Oxigênio % peso	48,30	38,52	25,04

²³ DIARIO DE PERNAMBUCO. Projeto em Vitória de Santo Antão tem investimento de R\$ 15 milhões e vai gerar 612 MWh/mês. Abril de 2012. Disponível em: < <http://pedesenvolvimento.com/2012/04/05/energia-a-partir-da-vinhaca/>>. Acesso em: 10 Dez 2014.

²⁴ <http://www.geoenergetica.com.br/>

Uma característica importante da técnica da incineração de vinhaça é que há necessidade de um combustível suporte para dar estabilidade à chama e conseguir sua queima total. Cortez e Perez (1997) trabalharam com vinhaça concentrada misturada óleo combustível, mas existem diferentes alternativas de combustível suporte a ser usadas, como gás natural ou biomassa solida pulverizada. Na procura de evitar o uso de combustíveis fósseis e de utilizar os coprodutos da usina, pode ser proposto o uso de bagaço ou de palha pulverizados (SAACKE, 2013)²⁵. Atualmente, só é utilizado gás natural nos incineradores de vinhaça devido a diversos problemas técnicos e econômicos que serão comentados no Capítulo 8 de resultados e discussão.

2.5.3. Tecnologia de combustão de vinhaça

A vinhaça *in natura* contém entre 3 a 5% de sólidos (CETESB, 1982), sendo água o restante do volume. Para alcançar um valor mínimo requerido para a combustão estável, o efluente deve ser concentrado até 60-70% de sólidos por meio de evaporação. Depois a vinhaça concentrada é temporariamente armazenada em um tanque pulmão para assegurar o fornecimento à planta de incineração. Antes de ser atomizada a vinhaça deve ser pré-aquecida a 90° C para diminuir sua viscosidade (ROCHA, 2009).

Os líquidos residuais de baixo poder calorífico como a vinhaça, o melaço e o licor negro, podem ser queimados empregando um sistema de combustão com fluxo de vórtice e injeção tangencial, também denominado queimador torsional. Na Figura 20 se mostra este tipo de queimador específico.

Figura 20. Queimador para queima de gás natural e vinhaça concentrada.
Fonte: Schopf e Erbino (2006).

²⁵ SAACKE, comunicação pessoal, 2013.

A combustão se inicia com um combustível líquido ou gasoso de alto poder calorífico até atingir uma temperatura que permita a combustão completa da vinhaça. Injeta-se depois a vinhaça concentrada, reduzindo gradualmente a proporção de combustível auxiliar até que um fluxo mínimo mantenha a estabilidade da chama e a combustão completa. O ar de combustão é tangencialmente subministrado. O ajuste das proporções das correntes deve ser feito para lograr uma combustão ótima e baixos valores de emissões. Segundo Rocha (2009), a temperatura máxima permitida é 600 °C pra que as cinzas não atinjam o ponto de fusão, formando um material vítreo que causaria uma a obstrução nos tubos. Os gases de exaustão deverão ser tratados para atingir os valores de emissões permitidos pela legislação ambiental.

A Figura 21 mostra um queimador torsional Saacke para vinhaça concentrada de melaço de soja, modelo SSB de 40 MW_t, que emprega óleo combustível pulverizado como combustível auxiliar.

Figura 21. Queimador torsional Saacke para vinhaça concentrada de melaço, modelo SSB de 40 MW_t. Fonte: SAACKE (2012)²⁶.

Segundo Freire e Cortez (2000) outra forma de queimar a vinhaça é através da tecnologia de leito fluidizado, baseada fundamentalmente na circulação de sólidos juntamente com o fluido. Estes autores indicam que esta tecnologia não obteve êxito na incineração de vinhaça porque as suas propriedades críticas dificultaram muito a queima, além do elevado custo da planta.

O vapor saturado que sai da caldeira pode ser usado diretamente para evaporação, preaquecimento ou nos processos de destilação. Com a aplicação de um superaquecedor, o vapor superaquecido pode alimentar uma turbina de vapor de contrapressão que aciona um

²⁶ www.saacke.com.br/

gerador elétrico para geração de eletricidade, como pode ser visto na Figura 22. A vantagem deste sistema de cogeração é que o vapor de exaustão da turbina pode ser usado na destilaria e na planta de concentração de vinhaça, após a geração de energia.

Figura 22. Recuperação de calor e potência na incineração de vinhaça.
Fonte: Rocha (2009).

As cinzas recuperadas podem ser vendidas ou utilizadas pela própria destilaria. Rocha (2009) afirma que as cinzas são diferentes para cada tipo de vinhaça, mas geralmente contém elevada quantidade de sais de potássio²⁷, além de outros componentes como óxidos de cálcio (CaO) e de magnésio (MgO) que são solúveis em água e podem ser utilizados como fertilizante.

2.5.4. Implantação da tecnologia e estudos de caso

As experiências em laboratório que podem ser destacados são as de Gupta *et al.* (1968), que conduziram experimentos de queima vinhaça de 30-40° Bx em um leito fluidizado e pulverizada em um secador tipo *spray drier*. De outra forma, Dubey (1974) usou uma fornalha bicomustível com vinhaça a 60° Bx e bagaço. Cortez e Perez (1997) estudaram a combustão de vinhaça de diferentes concentrações de sólidos e emulsões com óleo combustível.

De experiências de porte industrial, tem-se conhecimento de duas plantas de incineração foram instaladas em Pernambuco há 60 anos, mas ambas fecharam devido a problemas econômicos (MONTEIRO, 1975). Uma planta de combustão de vinhaça foi instalada na Tailândia pela destilaria *Bangyikhan* em 1986 e operou por 12 anos, até 1998 (NEM, 2007). A

²⁷ Sais de potássio encontradas nas cinzas da combustão de vinhaça: K_2SO_4 , KCl e K_2CO_3 .

planta de concentração foi projetada pela *Vogelbusch* e a caldeira de combustão foi projetada pela empresa holandesa NEM. A capacidade da planta era de 6 t/h de vinhaça concentrada, enquanto seriam produzidos 15 t/h de vapor saturado. A Figura 23 ilustra a planta de concentração de vinhaça da destilaria *Bangyikhan* (Tailândia).

Figura 23. Planta de combustão da vinhaça da destilaria *Bangyikhan* (Tailândia).
Fonte: NEM (2007).

Chaudhari, Mishra e Chandb (2008) apresentam em seu estudo que, na China, um grande número de destilarias usa evaporadores de múltiplo efeito para concentrar os efluentes e efetuar sua incineração, sendo recuperada a maior parte do conteúdo energético.

No Brasil operam atualmente dois sistemas de combustão de vinhaça concentrada em duas plantas da empresa IMCOPA, localizadas nos municípios de Araucária e Cambe do Estado do Paraná (PERERA, 2009). Esta vinhaça é produzida durante a destilação do etanol fabricado com soja.

Tabela 13. Sistemas instalados de combustão de vinhaça no Brasil.

Localização	Araucária, Paraná, Brasil	Cambe, Paraná, Brasil
Aplicação	Gerador de vapor acuo-tubular	Gerador de vapor acuo-tubular
Tipo	Desenho para biomassa	Desenho para biomassa
Capacidade	60 t/h	40 t/h
Pressão	42 bar	42 bar
Temperatura do vapor	400°C	400°C
Marca do queimador	Saacke GmbH & Co. KG	Saacke GmbH & Co. KG
Tipo de queimador	2 x SSBS-LCG 200	SSBS-LCG 200
Potência equivalente	2 x 26 MW _t	35 MW _t
Data de começo operação	Abril de 2007	Abril de 2007

Fonte: Perera (2009).

Um projeto semelhante foi instalado em 2012 em Becej, Sérvia, diferenciando-se em relação aos casos brasileiros nas exigências ambientais mais rigorosas e ao investimento significativamente menor (SAACKE, 2013).

2.6. Resultados da revisão do estado da arte dos tratamento da vinhaça.

Como foi abordado neste capítulo, existem alternativas para o processamento da vinhaça que melhoram o desempenho ambiental, a gestão do resíduo e permitem o aproveitamento energético. Essas alternativas à fertirrigação com vinhaça *in natura* se encontram em diferentes níveis de desenvolvimento e de implantação.

O uso da tecnologia da concentração tem-se expandido nos últimos anos devido à necessidade de diminuir os custos de logística na fertirrigação e ao desenvolvimento de equipamentos com melhor desempenho operacional e menor consumo energético.

A biodigestão de vinhaça tem sido pesquisada no Brasil por mais de 30 anos, com experiências de porte industrial como resultado, mas que tem demonstrado na maioria dos casos pouca viabilidade e curta duração. Nos dias de hoje, existe um renovado interesse em aplicar esta tecnologia, sobretudo com o intuito de produzir energia elétrica através do biogás da vinhaça para sua comercialização.

A incineração se encontra em fase experimental, não havendo experiências no Brasil com a vinhaça de etanol de cana. Porém, as possíveis vantagens da recuperação energética e a quase total redução de volume de resíduo, fazem desta tecnologia uma alternativa a considerar.

Toda a informação contida no presente Capítulo fornece a base para a configuração dos cenários que serão definidos no Capítulo 4 e que, subsequentemente, permitirão a realização das comparações entre as tecnologias contempladas. Nos capítulos de balanço energético, impacto ambiental e avaliação econômica se aprofundará no estudo destes aspectos em cada uma das técnicas apresentadas.

CAPÍTULO 3. DESCRIÇÃO DOS CENÁRIOS A SEREM ANALISADOS PARA TRATAMENTO DA VINHAÇA E SEU BALANÇO ENERGÉTICO.

No Capítulo 2 desta dissertação foram descritas as diferentes alternativas tecnológicas para o tratamento e processamento da vinhaça, dando um panorama sobre o estado da arte de cada técnica. Em continuidade a esta revisão bibliográfica, as informações levantadas serão utilizadas para configurar as principais características dos cenários que representam a cada possibilidade de processamento.

Para tal, serão analisados cinco cenários, a saber:

- Cenário 0 de referência: Fertirrigação com vinhaça *in natura*
- Cenário 1: Concentração evaporativa
- Cenário 2: Biodigestão anaeróbia com geração de eletricidade
- Cenário 3: Incineração com geração de eletricidade
- Cenário 4: Biodigestão com concentração e uso veicular

3.1. Descrição dos cenários

3.1.1. *Cenário 0 de referência: Fertirrigação com vinhaça in natura*

Neste cenário, analisa-se o armazenamento temporário da vinhaça em lagoas a céu aberto unido ao transporte e distribuição mediante canais e caminhões, para ser aplicada no canavial diretamente ou por aspersão. A caracterização do Cenário 0 é realizada por meio de uma revisão bibliográfica, uma vez que a fertirrigação com vinhaça é um assunto amplamente discutido na indústria e na Academia desde os anos 50, com abundantes referências sobre o uso desta técnica. Na Figura 24, mostra-se um diagrama esquemático do processo de fertirrigação que contém os principais valores assumidos neste estudo. As porcentagens de volume de vinhaça distribuído através de canais e caminhões são extraídas do trabalho de Macedo (2004).

Como mostra a figura, no cenário considerado é utilizado um modelo simplificado constituído por uma única lagoa de armazenamento, onde os caminhões são carregados com 29% do volume de vinhaça produzido e o restante é transportado por um único canal até o canavial. A realidade é muito mais complexa, pois existe uma infinidade de possibilidades geométricas para o sistema dependendo da localização da usina e das características do território onde se encontra. Normalmente, são encontrados exemplos de sistemas com várias

lagoas principais e secundárias que se conectam por canais e tubulações pressurizadas, bem como com múltiplos pontos de carregamento para caminhões.

Figura 24. Diagrama ilustrativo e de fluxos do Cenário 0 de referência, Fertirrigação com vinhaça *in natura*. Fonte: Autor.

Como se especifica na Figura 24, do volume total da vinhaça 71% é captada do canal por uma motobomba a diesel e aplicada por aspersão, com a possibilidade de usar montagem direta ou carretel enrolador indistintamente. Com relação ao volume que é levado em caminhão, 5% é aplicado com caminhões-tanque de 15 m³ diretamente sobre o canavial, e 24% é transportado por rodotrem de 30 m³ para ser aplicado por aspersão com motobomba. Todos estes equipamentos consomem diesel para seu funcionamento nas quantidades que são calculadas no Capítulo 5 de balanço energético.

3.1.2. Cenário 1: Concentração evaporativa

No Cenário 1, o volume de vinhaça que é transportado em caminhão no Cenário de referência passa previamente por um processo de concentração (Figura 25). A vinhaça *in natura*, que possui 4% de sólidos (4°Brix ou 4°Bx) é concentrada até alcançar 20°Bx utilizando um evaporador de múltiplo efeito, para ser posteriormente transportada e aplicada

com caminhões-tanque diretamente no canavial. O volume de vinhaça transportada no canal não é concentrado.

Figura 25. Diagrama explicativo e de fluxos do Cenário 1, Concentração evaporativa. Fonte: Autor.

Neste cenário, são utilizados os dados fornecidos pela Citrotec SL (2013), sendo este o fabricante nacional com maior participação no mercado de concentradores de vinhaça. Como mostrado na Figura 25, para a concentração é preciso o fornecimento de energia térmica, em forma de vapor de processo, além de eletricidade. Ambos os insumos são fornecidos pelo sistema de cogeração da usina, mas considera-se que a eletricidade consumida pelo sistema de concentração deixaria de ser exportada para o Sistema Interligado Nacional (SIN), sendo contabilizada como energia recebida desta rede.

3.1.3. Cenário 2: Biodigestão anaeróbia com geração de eletricidade

Neste cenário propõe-se tratar a vinhaça por meio de um biodigestor anaeróbio com produção e captura de biogás para geração de eletricidade. O efluente do biodigestor é utilizado como fertilizante na lavoura, sendo distribuído da mesma forma que no cenário de referência, uma vez que a biodigestão não produz redução do volume do efluente (Figura 26).

O biogás obtido é tratado para reduzir a umidade e o H_2S , para ser utilizado como combustível em motogeradores termelétricos de combustão interna. Parte da eletricidade gerada é consumida nas cargas internas do biodigestor e o excedente exportado ao SIN. Foram utilizados tanto dados bibliográficos, como dados primários dos biodigestores da Usina São Martinho e da Usina Ester, assim como dados fornecidos pelos fabricantes de equipamentos.

Figura 26. Diagrama explicativo e de fluxos do Cenário 2, Biodigestão anaeróbia com geração de eletricidade. Fonte: Autor.

3.1.4. Cenário 3: Incineração com geração de eletricidade

Neste Cenário 3, primeiramente a vinhaça é concentrada mediante evaporação de múltiplo efeito até atingir 65°Bx, concentração com a qual a vinhaça adquire suficiente PCI para ser incinerada na caldeira. Para que esta combustão seja completa e estável é necessário utilizar um combustível auxiliar de suporte, assumindo neste caso a utilização de gás natural. O calor despreendido na queima conjunta da vinhaça e do gás natural será utilizado para a geração de vapor e energia elétrica (Figura 27). O consumo térmico do sistema de concentração é suprido parcialmente com o vapor produzido no sistema de cogeração com vinhaça, e deve ser completado com vapor de processo proveniente da usina. A energia elétrica gerada abastece as cargas internas do sistema e o excedente é exportado para o SIN.

Neste caso, o volume de vinhaça é totalmente eliminado, evitando o sistema de transporte e distribuição do mesmo. O único resíduo do processo seriam as cinzas potássicas, utilizadas como fertilizante na lavoura. Os dados sobre a incineração foram obtidos do único fabricante com tecnologia testada para vinhaça, a *SAACKE Boiler and Process Firing Systems*, com duas plantas no estado do Paraná, Brasil, e outra na Sérvia (SAACKE, 2013).

Figura 27. Diagrama explicativo e de fluxos do Cenário 3, Incineração com geração de eletricidade.
Fonte: Autor.

3.1.5. Cenário 4: Biodigestão com concentração e uso veicular

Este cenário propõe uma combinação dos Cenários 1 e 2, com a realização da biodigestão para depois concentrar o efluente tratado até alcançar 20°Bx, distribuindo a vinhaça biodigerida e concentrada no canavial utilizando caminhões-tanque (Figura 28). Além disso, este cenário introduz uma substituição parcial do diesel consumido em todas as operações de campo com o biometano produzido a partir da vinhaça. Existe um exemplo de uso veicular na frota da Usina São João relatado na literatura (BARBERI, 1998). Ainda não existe um exemplo de implantação conjunta destas tecnologias que possa ser estudado como nos casos anteriores, então será utilizada a informação levantada para os Cenários 1 e 2.

Figura 28. Diagrama explicativo e de fluxos do Cenário 4, Biodigestão com concentração e uso veicular.
Fonte: Autor.

Com a descrição destes cenários, definem-se os elementos que os compõem e estabelecem-se as premissas básicas que serão utilizadas como ponto de partida nos cálculos de balanço energético, e nos capítulos que tratam da avaliação de impacto ambiental e da análise de viabilidade econômica.

Importante ressaltar que estas alternativas não esgotam as possibilidades de processamento e de uso final da vinhaça, mas representam as tecnologias mais desenvolvidas que permitem o aproveitamento energético da mesma.

3.2. Balanço Energético de cada Cenário

A seguir, calculam-se os balanços energéticos para cada um dos cinco cenários propostos, isto é, a quantidade de cada tipo de energia consumida e produzida por cada sistema de processamento.

São diferenciados os consumos de energia térmica em forma de vapor de processo, de energia elétrica e de combustíveis fósseis, como o gás natural e o diesel. As premissas básicas foram estabelecidas no capítulo anterior por meio da descrição dos cenários; a seguir são somadas novas considerações que possibilitem a estimativa dos balanços energéticos. Em cada cenário são calculados, quando aplicáveis, os seguintes parâmetros:

- a) Consumo e produção de energia elétrica
- b) Consumo e produção de energia térmica
- c) Consumo de combustível fóssil (diesel ou gás natural)
- d) Produção de combustível renovável (biogás).

3.2.1. Cenário 0 de referência: Fertirrigação com vinhaça *in natura*.

Para o cenário de referência é contabilizada a energia consumida no bombeamento, transporte, distribuição e aplicação da vinhaça *in natura*. O diesel é considerado a única fonte de energia para realizar estas operações unidas à fertirrigação, sabendo que são pouco significativos os casos onde se utilizam motores elétricos para o acionamento de bombas de aspersão. Não foi incluída neste estudo a eletricidade gasta no bombeamento de recalque, necessário para elevar a vinhaça até os reservatórios desde onde é distribuída por gravidade, por não ter conseguido acesso a este dado. Por tanto, no cenário de referência somente é contabilizado o diesel consumido na fertirrigação.

Consumo de combustível na fertirrigação no Cenário 0:

Para o cálculo do consumo de diesel são assumidos os valores expostos na Tabela 14, onde é definida a porcentagem de vinhaça que é dispersa mediante caminhão com aplicação direta na lavoura, caminhão com aspersão e a sucção desde canal por aspersão, sendo última esta a técnica mais estendida. Nesta tabela, também é indicada a porcentagem de área fertirrigada com cada método, a dosagem de vinhaça em m³/ha, a distância média que percorrem os caminhões e, por fim, qual é consumo de diesel por m³ de vinhaça e por ha.

Tabela 14. Consumo de combustíveis na maquinaria empregada para fertirrigação.

Sistema de transporte e aplicação	Maquinaria	% de volume vinhaça	% da área fertirrigada	Dosagem (m ³ /ha)	Distancia media (km)	Consumo. diesel	Consumo diesel por m ³ de Vinhaça (l/m ³)	Consumo diesel. (l/ha) ponderado por % área
Caminhão aplicando diretamente	MB2318 com tanque de 15 m ³	5 ^b	6 ^a	100 ^a	7 ^a	2,2 km/l ^a	0,42 ^b	2,54 ^a
Caminhão com aspersão combinado com motobomba	Caminhão Volvo rodotrem com dois tanques de 30 m ³ /cada e motobomba.	24 ^b	31 ^a	100 ^a	12 ^a	1,3 km/l ^a	0,31 ^b	9,55 ^a
						7,5 m ³ vinhaça/l ^a	0,13 ^b	5,30 ^{b28}
Motobomba em canal com montagem direta ou com rolão	Motor MB-OM352 160cv Bomba EQ 90-48 140 m ³ /h	71 ^b	63 ^a	150 ^a	-	7,5 m ³ vinhaça/l ^a	0,13 ^b	12,60 ^a
Valores médios ponderados por % área fertirrigada				131,5^b	-	-	-	30,00^b

Fonte: a) Macedo *et al.* (2004); b) Calculado pelo autor.

Com estes dados, pode-se estimar a superfície de cultivo que é possível fertirrigar com a quantidade de vinhaça produzida. Para calcular a área total fertirrigada são adotados valores médios da produção anual de vinhaça *in natura* de 4°Brix (doravante V_{4°Bx}²⁹) e da dose de vinhaça por hectare (Equação 1).

Para estimar qual seria a porcentagem do cultivo de cana que é fertirrigado, calcula-se a área coletada necessária correspondente à produção anual de etanol, tendo em conta a produção média de cana por hectare no Estado de São Paulo e a produtividade de etanol hidratado por tonelada de cana processada (Equação 2).

$$S_F = \frac{V_{4^\circ Bx/ano}}{D_{4^\circ Bx}} \quad \text{Equação 1}$$

$$S_P = \frac{V_{E/ano}}{V_{E/ha}} \quad \text{Equação 2}$$

²⁸ Macedo *et al.* (2004) consideraram unicamente o consumo de diesel do transporte em rodotrem, excluindo o consumo da motobomba (Macedo *et al.* (2004), Anexo 1, pag. 24, Memória de cálculo). No presente trabalho se inclui este consumo.

²⁹ Para fazer referência à Vinhaça de X °Brix a nomenclatura adotada neste trabalho é V_{XBx°}

Onde:

Dados de entrada			
Símbolo	Significado	Valor	Fonte
$D_{4^{\circ}Bx}$	Dosagem média de fertirrigação com vinhaça 4 ^o Bx	131,5 m ³ /ha	Tabela 14
$V_{4^{\circ}Bx/ano}$	Volume de vinhaça 4 ^o Bx produzido por ano	960.000 m ³ /ano	Tabela 2
$V_{E/ha}$	Volume de etanol produzido por ha	6,7 m ³ /ha	Tabela 2
$V_{E/ano}$	Volume de etanol produzido por ano	88.248 m ³ /ano	Tabela 2
Resultados			
S_F	Superfície fertirrigada	7.281 ha/ano	<i>Equação 1</i>
S_P	Superfície coletada	13.200 ha/ano	<i>Equação 2</i>

Pode-se observar que, nas condições propostas, poderia ser fertirrigada mais da metade da área destinada à produção de etanol.

Com os valores obtidos, estima-se o consumo médio de diesel para distribuir 1 m³ da vinhaça para fertirrigação (*Equação 3*). Multiplicando este consumo unitário pelo volume anual de vinhaça, obtém-se o consumo total de diesel neste cenário (*Equação 4*). Sabendo o PCI deste combustível, é calculada a energia térmica equivalente (*Equação 5*).

$$C_{diesel/V4^{\circ}Bx} = \frac{C_{diesel/ha}}{D_{4^{\circ}Bx}} \quad \text{Equação 3}$$

$$C_{diesel/ano} = C_{diesel/V4^{\circ}Bx} \times V_{4^{\circ}Bx/ano} \quad \text{Equação 4}$$

$$Q_{diesel/ano} = C_{diesel/ano} \times PCI_{diesel} \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

Dados de entrada			
Símbolo	Significado	Valor	Fonte
$D_{4^{\circ}Bx}$	Dosagem media de fertirrigação com vinhaça 4 ^o Bx	131,5 m ³ /ha	Tabela 14
$V_{4^{\circ}Bx/ano}$	Volume de vinhaça 4 ^o Bx produzido por ano	960.000 m ³ /ano	Tabela 2
PCI_{diesel}	Poder Calorífico Inferior do diesel	36.031 kJ/l	ANP, 2014
$C_{diesel/ha}$	Consumo de diesel por ha fertirrigada	30 l/ha	Tabela 14
Resultados			
$C_{diesel/V4^{\circ}Bx}$	Consumo de diesel por m ³ de vinhaça 4 ^o Bx por ano	0,228 L/m ³	<i>Equação 3</i>
$C_{diesel/ano}$	Consumo de diesel anual	219 m ³ /ano	<i>Equação 4</i>
$Q_{diesel/ano}$	Energia consumida proveniente de diesel por ano	7,9 TJ/ano	<i>Equação 5</i>

Observa-se a significativa quantidade de diesel empregada na distribuição da vinhaça (219 m³/ano). Este consumo energético do cenário de referência será comparado com o correspondente dos demais cenários.

3.2.2. Cenário 1: Concentração evaporativa

Nesta seção, calcula-se a energia consumida na concentração, considerando a energia térmica e elétrica necessária para a evaporação e, posteriormente, o consumo de combustível

empregado nos equipamentos que distribuem o volume de vinhaça concentrada e *in natura*. Com esta finalidade, deve ser dimensionada a capacidade de evaporação necessária de um concentrador no caso estudado (*Equação 6*).

$$M_{\text{evap/ano}} = V_{\% \text{conc}} \times V_{4^\circ \text{Bx/ano}} \times m_{\text{evap/V}4^\circ \text{Bx}} \quad \text{Equação 6}$$

$$C_{\text{evap}} = \frac{M_{\text{evap/ano}}}{T_s} \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

Dados de entrada			
Símbolo	Significado	Valor	Fonte
$V_{4^\circ \text{Bx/ano}}$	Volume de vinhaça 4°Bx produzido por ano	960.000 m ³ /ano	Tabela 2
$m_{\text{evap/V}4^\circ \text{Bx}}$	Água evaporada por m ³ de $V_{4^\circ \text{Bx}}$ concentrada até $V_{20^\circ \text{Bx}}$	811,2 kg/m ³	Tabela 15
$V_{\% \text{conc}}$	Porcentagem de volume concentrado	29%	Tabela 14
T_s	Tempo de safra	5.808 h/ano	Tabela 2
Resultados			
$M_{\text{evap/ano}}$	Água evaporada por ano	225.838 t/ano	Equação 6
C_{evap}	Capacidade do evaporador	40 t/h	Equação 7

Como resultado obtém-se que, para a usina de porte médio proposta e a porcentagem de vinhaça destinada à concentração, seria necessário instalar, no mínimo, um concentrador com 40 t/h de capacidade de evaporação. Este evaporador pode ser considerado de baixa capacidade, pois no mercado existem concentradores de 250 t/h de capacidade de evaporação, não existindo uma limitação técnica neste aspecto para o cenário configurado.

Consumo de energia elétrica na concentração no Cenário 1:

Segundo os fornecedores de equipamentos, a potência instalada nos motores de um evaporador de 250 t/h de capacidade de evaporação seria de 800 kW_e com demanda de 80%, podendo-se assumir como consumo específico de eletricidade na concentração o valor de 2,6 kWh_e por tonelada de evaporação. Neste caso o evaporador utilizado no Cenário 1 é de 40 t/h (*Equação 7*) de modo que a potência instalada proporcional deveria ser de 128 kW_e, tendo um consumo elétrico de 600 MWh_e/ano. Como foi indicado anteriormente, é considerado que a eletricidade consumida pelo sistema de concentração deixaria de ser exportada para o SIN porque seria proveniente dos excedentes produzidos pelo sistema de cogeração da usina, podendo ser contabilizada como energia retirada desta rede.

Consumo de energia térmica na concentração no Cenário 1:

Este fabricante de equipamentos Citrotec SL possui três modelos de evaporadores de múltiplo efeito. O modelo mais antigo é o Ecovin®, um evaporador de 5 a 7 efeitos que

utiliza vapor de processo de 1,5 bar (Tabela 7). A segunda opção é o EcovinJL®, que está acoplado às colunas de destilação, evitando o consumo adicional de vapor. Por último, a terceira opção é o Ecowaste® (ainda em fase de testes) que utiliza como fonte energética os gases de exaustão das caldeiras de bagaço e que permite, segundo o fabricante, a concentração sem consumo adicional de vapor. Neste estudo é utilizado o consumo de energia para um evaporador Ecovin® de 7 efeitos, cujo consumo é de 1 kg de vapor por 6,2 kg de evaporação, assumindo uma porcentagem de sólidos iniciais da $V_{4^{\circ}\text{Bx}}$. A Tabela 15 ilustra a evolução das características da solução, a quantidade de água a evaporar e o consumo de vapor necessário por cada m^3 de $V_{4^{\circ}\text{Bx}}$, conforme a concentração final é incrementada. Os valores desta tabela foram calculados com base na concentração de soluto mostrada na Tabela 3, a densidade indicada na Tabela 6 e o consumo de vapor que aparece na Tabela 7.

Tabela 15. Quantidade de água a evaporar por m^3 de $V_{4^{\circ}\text{Bx}}$ para atingir diferentes graus de concentração.

Concentração (°Bx)	Massa de Solute (kg/m^3 de $V_{4^{\circ}\text{Bx}}$)	Massa de Água (kg/m^3 de $V_{4^{\circ}\text{Bx}}$)	Massa Total (kg/m^3 de $V_{4^{\circ}\text{Bx}}$)	Densidade (kg/m^3)	Água Evaporada (kg/m^3 de $V_{4^{\circ}\text{Bx}}$)	Consumo de vapor Ecovin (kg/m^3 de $V_{4^{\circ}\text{Bx}}$)
4	40,56	973,4	1014,0	1,01	0	0
10	40,56	365,0	405,6	1,04	608,4	98,1
20	40,56	162,2	202,8	1,07	811,2	130,8
30	40,56	94,6	135,2	1,12	878,8	141,7
40	40,56	60,8	101,4	1,16	912,6	147,2
50	40,56	40,6	81,1	1,21	932,9	150,5
60	40,56	27,0	67,6	1,26	946,4	152,6
65	40,56	21,8	62,4	1,29	951,6	153,5

Fonte: Cálculos do autor baseados nos dados da CETESB (1982), GEA (2007) e CITROTEC® (2013).

Neste Cenário 1 se estabelece que seja concentrada a fração do volume de vinhaça que precisa ser transportado em caminhão (29 % do volume total de $V_{4^{\circ}\text{Bx}}$) até uma concentração final desejada de 20°Bx , podendo ser estimado o consumo de vapor de processo (*Equação 8*).

$$M_{\text{vap/ano}} = V_{\% \text{conc}} \times V_{4^{\circ}\text{Bx/ano}} \times m_{\text{vap}/V_{4^{\circ}\text{Bx}}} \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

Dados de entrada			
Símbolo	Significado	Valor	Fonte
$V_{4^{\circ}\text{Bx/ano}}$	Volume de vinhaça 4°Bx produzido por ano	$960.000 \text{ m}^3/\text{ano}$	Tabela 2
$m_{\text{vap}/V_{4^{\circ}\text{Bx}}}$	Vapor consumido por m^3 de $V_{4^{\circ}\text{Bx}}$ concentrada até $V_{20^{\circ}\text{Bx}}$	$130,8 \text{ kg}/\text{m}^3$	Tabela 15
$V_{\% \text{conc}}$	Porcentagem de volume concentrado	29%	Tabela 14
Resultados			
$M_{\text{vap/ano}}$	Vapor consumido por ano no evaporador	$36,3 \times 10^6 \text{ kg/ano}$	Equação 8

Uma vez conhecida a quantidade de vapor necessária para realizar a concentração, calcula-se a energia e o combustível consumido para produzi-lo. Como foi definido

anteriormente, este suprimento de vapor vem da usina que possui um sistema de cogeração (Figura 29).

Figura 29. Representação do sistema de cogeração e diagrama termodinâmico ideal T-S do ciclo que supre o evaporador no Cenário 1. Fonte: Autor.

Este sistema funciona com uma caldeira de 42 bar de pressão manométrica, 400 °C e $\eta_c = 0,8$ (rendimento da caldeira). O vapor é expandindo em uma turbina com $\eta_t = 0,8$ (rendimento da turbina isentrópico). O vapor de processo deve ser tratado como um insumo, mas a energia elétrica gerada (W) por este sistema de cogeração não é inserida como produto no balanço energético deste cenário, pois não é decorrente do tratamento da vinhaça.

O calor que deve ser fornecido pelo combustível na caldeira vem determinado pela quantidade de vapor consumida no evaporador e sua entalpia de entrada e de saída. Observa-se que o evaporador funciona como condensador deste ciclo Rankine. Na Tabela 16 se resumem os parâmetros termodinâmicos que caracterizam os pontos do ciclo, considerando-se que a pressão manométrica do vapor do processo é 1,5 bar.

Tabela 16. Parâmetros termodinâmicos do ciclo de cogeração do Cenário 1.

Ponto	Tabela	Pressão (MPa)	Temper. (°C)	Entalpia específica “h” (kJ/kg)	Entropia específica “s” (kJ/kg K)	s_L (kJ/kg K)	s_v (kJ/kg K)	h_L (kJ/kg)	h_v (kJ/kg)
1	água saturada	0,25 ^a	126,8 ^b	535,34 ^b	-	1,6072 ^b	-	535,34 ^b	-
2	água saturada	-	126,8 ^b	535,34 ^b	-	-	-	-	-
3	vapor superaquecido	4,3 ^a	400 ^a	3209,1 ^b	6,7319 ^b	-	-	-	-
4	vapor saturado	0,25 ^a	126,8 ^b	2712,56*	6,7319 ^b	-	7,0526 ^b	-	2716,9 ^b

Fonte:

a) Valor preestabelecido no cenário.

b) Valor tabelado obtido em <http://www.steamtablesonline.com/> (acessado em 2014)

c) Valor calculado (Equação 11)

Com os valores da Tabela 16, é calculado o título isentrópico do vapor na entrada do evaporador (Equação 9), assim como a entalpia isentrópica (Equação 10) e a real (Equação

11). O calor a ser fornecido pela caldeira vem definido pela *Equação 12*. Considerando o rendimento da caldeira, o calor a ser fornecido pelo combustível é calculado na *Equação 13*. Esta energia térmica necessária se traduz no consumo anual de bagaço calculado na *Equação 14*.

$$X_{4\text{iso}} = \frac{S_4 - S_L}{S_V - S_L} \quad \text{Equação 9}$$

$$h_{4\text{iso}} = X_{4\text{iso}} \times h_V + (1 - X_4) \times h_L \quad \text{Equação 10}$$

$$h_4 = \eta_t \times (h_{4\text{iso}} - h_3) + h_3 \quad \text{Equação 11}$$

$$Q_{c/\text{ano}} = M_{\text{vap}/\text{ano}} \times (h_4 - h_1) \quad \text{Equação 12}$$

$$Q_{\text{comb}/\text{ano}} = \frac{Q_{c/\text{ano}}}{\eta_c} \quad \text{Equação 13}$$

$$M_{\text{bagaço}/\text{ano}} = \frac{Q_{\text{comb}/\text{ano}}}{\text{PCI}_{\text{bagaço}}} \quad \text{Equação 14}$$

Onde:

Dados de entrada			
Símbolo	Significado	Valor	Fonte
$h_{4\text{iso}}$	Entalpia específica isotrópica do vapor no ponto 4	2588,42 kJ/kg	Tabela 2
h_L	Entalpia específica da água saturada	535,34 kJ/kg	Tabela 16
h_V	Entalpia específica do vapor saturado	2716,9 kJ/kg	Tabela 16
h_x	Entalpia específica do vapor no ponto x	x = 1, 3 e 4	Tabela 16
$M_{\text{vap}/\text{ano}}$	Vapor consumido por ano no evaporador	$36,3 \times 10^6$ kg/ano	Equação 8
$\text{PCI}_{\text{bagaço}}$	Poder calorífico do bagaço com 50% de umidade	9,6 kJ/kg	
S_4	Entropia específica do vapor no ponto 4	6,7319 kJ/kg K	Tabela 16
S_L	Entropia específica da água saturada*	1,6072 kJ/kg K	Tabela 16
S_V	Entropia específica do vapor saturado	7,0526 kJ/kg K	Tabela 16
η_c	Rendimento da caldeira	0,8	
η_t	Rendimento da turbina	0,8	
Resultados			
$X_{4\text{iso}}$	Título isentrópico do vapor no ponto 4	0,94	Equação 9
$Q_{c/\text{ano}}$	Calor a ser fornecido pela caldeira por ano	72 TJ	Equação 12
$Q_{\text{comb}/\text{ano}}$	Calor a ser fornecido pelo combustível por ano	90,2 TJ	Equação 13
$M_{\text{bagaço}/\text{ano}}$	Bagaço consumido pela caldeira por ano	$9,4 \times 10^3$ t	Equação 14

*T = 126,8 °C; P = 0,25 MPa

Por último, o fabricante indica que com os sistemas EcovinJL® e Ecowaste®, este consumo poderia ser considerado praticamente nulo, não existindo necessidade adicional de vapor de processo por aproveitar o calor residual da usina.

Consumo de combustível no transporte no Cenário 1:

Para o cálculo do consumo de diesel na distribuição da vinhaça concentrada, considera-se que deve ser mantida a mesma dosagem de sólidos por ha que no cenário de referência. Utilizando os valores calculados na Tabela 15, pode-se calcular que uma dose de 100 m³/ha com V_{4°Bx} seria equivalente a 19 m³/ha com V_{20°Bx} depois da concentração (Equação 15).

$$d_{V20°Bx} = \frac{[S]_{V4°Bx}}{[S]_{V20°Bx}} \times d_{V4°Bx} \quad \text{Equação 15}$$

Onde:

Dados de entrada			
Símbolo	Significado	Valor	Fonte
[S] _{V4°Bx}	Concentração de soluto em V _{4°Bx}	40 kg/m ³	Tabela 15
[S] _{V20°Bx}	Concentração de soluto em V _{20°Bx}	215 kg/m ³	Tabela 15
d _{V4°Bx}	Dosagem de V _{4°Bx} por ha	100 m ³ /ha	Tabela 14
Resultados			
d _{V20°Bx}	Dosagem de V _{20°Bx} por ha	19 m ³ /ha	Equação 15

Por outro lado, com o aumento da viscosidade provocado pela concentração (GEA WIEGAND GMBH, 2007), os sistemas baseados na aspersão são inviabilizados, devendo ser substituída a aspersão que utiliza o rodo-trem e a motobomba pela aplicação direta da vinhaça. Isto implica em um aumento na distância média e em variações no consumo de diesel, sendo mostrados os resultados dos cálculos na Tabela 17.

Tabela 17. Consumo de diesel na fertirrigação com vinhaça concentrada e *in natura*.

Sistema de transporte e aplicação	Maquinaria	% de vinhaça	% da área fertirrigada	Dosagem (m ³ /ha)	Distan. média (km)	Consumo unitário de diesel	Consumo diesel por m ³ de Vinhaça (l/m ³)	Consumo diesel ponderado (l/ha)
Caminhão aplicando diretamente concentrada	MB2318 com tanque de 15 m ³	29%	37%	19 (V _{20°Bx})	11,19	2,20 km/l	0,13	4,74
Sistema de aspersão aplicando <i>in natura</i>	Motobomba em canal com montagem direta ou rolão	71%	63%	150 (V _{4°Bx})	-	7,5 m ³ vinhaça/l	0,13	12,6
TOTAL		100%	100%	131,5 (V_{4°Bx})	-	-	-	17,34

Fonte: Calculado pelo autor baseado em dados de Macedo *et al.* (2004).

Estima-se que o consumo médio de diesel para a fertirrigação neste cenário seja de 17,34 l/ha, o que significaria um montante de 126 m³ de diesel por ano (Equação 16).

$$C_{\text{diesel/ano}} = c_{\text{diesel/ha}} \times S_F \quad \text{Equação 16}$$

$$Q_{\text{diesel/ano}} = C_{\text{diesel/ano}} \times PCI_{\text{diesel}} \quad \text{Equação 17}$$

Onde:

Dados de entrada			
Símbolo	Significado	Valor	Fonte
PCI_{diesel}	Poder Calorífico Inferior do diesel	36.031 kJ/L	
$c_{\text{diesel/ha}}$	Consumo de diesel por ha fertirrigada	17,34 L/ha	Tabela 17
S_F	Superfície fertirrigada	7.281 ha/ano	<i>Equação 1</i>
Resultados			
$C_{\text{diesel/ano}}$	Consumo de diesel anual	126 m ³ /ano	<i>Equação 16</i>
$Q_{\text{diesel/ano}}$	Energia consumida proveniente de diesel por ano	4,5 TJ/ano	<i>Equação 17</i>

Dessa forma, pode-se concluir que o consumo de diesel de 219 m³/ano no cenário de referência se reduziria a 126 m³, o que significa 43% de redução do consumo de diesel com a concentração de 29% do volume de vinhaça e mantendo a mesma dosagem de nutrientes.

3.2.3. *Cenário 2: Biodigestão anaeróbia com geração de eletricidade*

Neste caso, o balanço energético incorpora o consumo do sistema de biodigestão e da fertirrigação. Por outro lado, há uma produção de biogás que é utilizado para alimentar motogeradores e produzir energia elétrica, suprimindo as cargas internas do biodigestor e exportando o excedente no SIN.

Consumo de eletricidade na biodigestão e dessulfurização no Cenário 2:

Segundo o fabricante de reatores IC, para tratar 4.200 m³ de vinhaça por dia com uma carga de DQO 40 kg/m³ seria necessário instalar 150 kW_e em cargas internas. Por outro lado, a potência elétrica instalada de um biodigestor UASB para tratar 5.000 m³/dia e de um sistema de dessulfurização do biogás somam 250 kW_e (SALOMON, 2007). Baseado nestes dados, assume-se uma potência elétrica instalada de 200 kW_e para um biodigestor de 4.000 m³/dia incluindo o dessulfurizador. A energia consumida em todo o período da safra é calculada na *Equação 18*.

$$C_{e.biod/ano} = P_{e.biod} \times T_s \quad \text{Equação 18}$$

Onde:

Dados de entrada			
Símbolo	Significado	Valor	Fonte
$P_{e.biod}$	Potência elétrica instalada no biodigestor	200 kW _e	
T_s	Duração da safra	5.808 h/ano	Tabela 2
Resultados			
$C_{e.biod./ano}$	Consumo anual de eletricidade na biodigestão	1,2 GWh _e /ano	<i>Equação 18</i>

Essa energia consumida pelas cargas internas do processo é incluída no balanço energético, sendo subtraída da energia gerada pelo motogerador a biogás.

Consumo de combustível no transporte no Cenário 2:

Como a biodigestão não altera de forma significativa o volume de vinhaça, o consumo na fertirrigação seria muito próximo ao calculado no cenário de referência, que foi estimado em 219 m³ de diesel por ano.

Produção de biogás e energia elétrica no Cenário 2:

Para calcular a produção de biogás foram levantados dados dos biodigestores das usinas Ester e São Martinho, bem como os fornecidos pelos fabricantes e os encontrados na bibliografia. Na Tabela 18 são resumidos os resultados deste levantamento, onde se apresentam dados sobre o tipo de reator empregado, os parâmetros que definem sua dimensão e operação, capacidade de tratamento de DQO, produtividade e eficiência na conversão da matéria orgânica em biogás, e finalmente a porcentagem de metano contida no mesmo.

Tabela 18. Biogás produzido com vinhaça.

Referência	Tipo de reator	kg DQO/m ³ vinhaça	Taxa de carregamento orgânico (kg DQO/m ³ de reator.dia)	Tempo de Retenção Hidráulica (h)	Taxa de remoção DQO (%)	Produção de gás (m ³ de gás/kg de DQO alimentada)	Nm ³ de biogás/m ³ de vinhaça	CH ₄ (%)
SOUZA (1992)	UASB (75 m ³)	31,8	26,5	10,8	72	0,37	11,8	60
Destilaria Central Jacques Richer CAMPOS (1981)	UASB (330 m ³)	-	-	10	62	-	16,5	55
Usina São João. PINTO (1999)	UASB (1.000 m ³)	-	-	-	85	-	Média de 4,3 (Max 7,2)	60
Usina Ester, Omnis Biotechnology (2013)	Lagoa (15.000 m ³)	20-60	2,0	288,0	95	0,20	4,0 – 12,0	-
Usina São Martinho (2013)	UASB (5.000 m ³)	20-30	6,0	100,0	70	0,24	6,0	50
Fabricante de IC (2014)	IC (2.520 m ³)	20-25	22,2	24,3	65	0,29	6,4	60-65

Fonte: Autor.

As características do biogás produzido na usina São Martinho são mostradas na Tabela 19, sendo estes valores muito conservadores. Em vista da grande variabilidade nos valores obtidos, foram escolhidos primeiramente para o cálculo os dados provenientes da usina São Martinho, por ser um projeto com porte industrial e longo tempo de funcionamento, além de constituir um dado primário.

Tabela 19. Parâmetros da Planta de Biodigestão de São Martinho.

Parâmetro	Valor
Vazão de vinhaça	50 m ³ /h ^a
DQO	25 g/l ^a
Produção de biogás diária de biogás	300 Nm ³ /h ^a

Composição e características do biogás	
CH ₄	50 % ^a
CO ₂	50 % ^a
H ₂ S	<1 % ^a
PCI do CH ₄	35.530 kJ/Nm ³ ^b
PCI do biogás	17.765 kJ/Nm ³ ^c

Fontes:

a) São Martinho, 2013. b) Salomon, 2007. c) Calculada: 50% do PCI do CH₄

Com estes dados, obtém-se a produção anual de CH₄ (Equação 19). Supondo uma perda de biogás por vazamento de 5% no sistema de biodigestão, e considerando a geração de energia elétrica por meio de um motor de combustão interna de eficiência termelétrica de 29%, pode ser calculada a energia térmica e elétrica disponível por safra proveniente do biogás (Equação 20 e Equação 21), assim como a potência de geração elétrica que deveria ser instalada (Equação 22).

$$V_{\text{biogás/ano}} = v_{\text{biogás/V4ºBx}} \times V_{4^\circ\text{Bx/ano}} \quad \text{Equação 19}$$

$$Q_{\text{biogás/ano}} = V_{\text{biogás/ano}} \times (1 - V_{\% \text{vaz}}) \times \text{PCI}_{\text{biogás}} \quad \text{Equação 20}$$

$$E_{\text{e/ano}} = (Q_{\text{biogás/ano}} \times \eta_{\text{e/t}}) - C_{\text{e.biod/ano}} \quad \text{Equação 21}$$

$$P_g = \frac{Q_{\text{biogás/ano}} \times \eta_{\text{e/t}}}{T_s} \quad \text{Equação 22}$$

Onde:

Dados de entrada			
Símbolo	Significado	Valor	Fonte
C _{e.biod./ano}	Consumo anual de eletricidade na biodigestão	1.162 MWh _e	Equação 18
T _s	Duração da safra	5.808 h	Tabela 2
V _{4ºBx/ano}	Volume de vinhaça 4ºBx produzido por ano	960.000 m ³ /ano	Tabela 2
V _{%vaz}	Porcentagem de volume de biogás vazado	5%	
v _{biogás/V4ºBx}	Volume de biogás produzido por cada m ³ de vinhaça	6 Nm ³ /m ³	Tabela 18
PCI _{biogás}	Poder Calorífico Inferior do biogás	17.765 kJ/Nm ³	Tabela 19
η _{e/t}	Rendimento de termoelétrico do motor	0,29	
Resultados			
V _{biogás/ano}	Volume de biogás produzido por ano	5.745.000 Nm ³ /ano	Equação 19
Q _{biogás/ano}	Energia térmica produzida com biogás por ano	97 TJ/ano	Equação 20
E _{e/ano}	Energia elétrica exportada por ano	6,6 GWh _e /ano	Equação 21
P _g	Potência elétrica de geração instalada	1,3 MW _e	Equação 22

A energia produzida pelos geradores seria de aproximadamente 7,8 GWh_e/ano, do que deve ser subtraído o consumido nas cargas internas do biodigestor e sistema de

dessulfurização. Em definitivo, tem-se um balanço positivo de geração de energia elétrica de 6,6 GWh_e/ano (*Equação 21*) que pode ser exportada para o SIN.

3.2.4. *Cenário 3: Incineração com geração de eletricidade*

Para efetuar o balanço energético da incineração, deve ser calculado por um lado, o consumo de energia do sistema de concentração que leva a vinhaça a uma condição favorável para sua queima, e por outro, a energia produzida nesta queima.

Será considerado o consumo de gás natural como combustível suporte que é misturado e incinerado junto a vinhaça concentrada mediante um queimador torsional. Esta combustão se produz dentro de uma caldeira de 42 bar de pressão manométrica, 400 °C e $\eta_c = 0,8$. O vapor passará por uma turbina de contrapressão de fluxo direto com $\eta_t = 0,6$ acoplada a um gerador de $\eta_g = 0,9$. O vapor extraído da turbina e a eletricidade gerada no sistema de concentração de vinhaça são utilizados para fornecer a demanda de energia do sistema de concentração.

A incineração elimina totalmente o volume de vinhaça, deixando unicamente como resíduo sólido as cinzas potássicas que seriam distribuídas como fertilizante. O consumo energético provocado por esta distribuição não é incluído no balanço energético deste cenário, por ser realizado junto à sulcação³⁰ e adubação, sendo esta uma prática cultural realizada independentemente do tratamento da vinhaça.

Consumo de energia elétrica do sistema de concentração no Cenário 3:

Para calcular a energia elétrica consumida pelo concentrador é estimada a capacidade que deveria ter este equipamento (*Equação 24*).

$$M_{\text{evap/ano}} = V_{4^\circ\text{Bx/ano}} \times m_{\text{evap/V4}^\circ\text{Bx}} \quad \text{Equação 23}$$

$$C_{\text{evap}} = \frac{M_{\text{evap/ano}}}{T_s} \quad \text{Equação 24}$$

Onde:

Dados de entrada			
Símbolo	Significado	Valor	Fonte
$V_{4^\circ\text{Bx/ano}}$	Volume de vinhaça 4°Bx produzido por ano	960.000 m ³ /ano	Tabela 2
$m_{\text{evap/V4}^\circ\text{Bx}}$	Água evaporada por m ³ de $V_{4^\circ\text{Bx}}$ concentrada até $V_{65^\circ\text{Bx}}$	951,6 kg/m ³	Tabela 15
T_s	Tempo de safra	5.808 h/ano	Tabela 2
Resultados			
$M_{\text{evap/ano}}$	Água evaporada por ano	911x10 ³ t/ano	Equação 23
C_{evap}	Capacidade do evaporador	160 t/h	Equação 24

³⁰ Fazer sulcos para realizar o plantio da cultura.

Considerando o consumo específico de eletricidade na concentração igual a 2,6 kWh_e por tonelada de evaporação, estima-se que esta instalação consome 2,3 GWh_e/ano.

Consumo de energia térmica do sistema de concentração no Cenário 3:

A seguir, calcula-se a quantidade de vapor de processo necessária a um concentrador para levar vinhaça *in natura* de 4°Bx até uma concentração final de 65°Bx (*Equação 25*).

$$M_{\text{vap/ano}} = V_{4^{\circ}\text{Bx/ano}} \times m_{\text{vap/V}4^{\circ}\text{Bx}} \quad \text{Equação 25}$$

Onde:

Dados de entrada			
Símbolo	Significado	Valor	Fonte
$m_{\text{vap/V}4^{\circ}\text{Bx}}$	Vapor consumido por m ³ de V _{4°Bx} concentrada até V _{65°Bx}	153,5 kg/m ³	Tabela 15
$V_{4^{\circ}\text{Bx/ano}}$	Volume de vinhaça 4°Bx produzido por ano	960.000 m ³ /ano	Tabela 2
Resultados			
$M_{\text{vap/ano}}$	Vapor consumido pelo evaporador por ano	147×10^6 kg/ano	Equação 25

O vapor de processo vem do sistema de cogeração representado na Figura 30. O vapor é gerado em uma caldeira alimentada com vinhaça e gás natural, posteriormente expandido em uma turbina e finalmente condensado no evaporador que concentra a vinhaça.

Figura 30. Representação do sistema de cogeração e diagrama termodinâmico ideal T-S do ciclo que supre o evaporador no Cenário 4. Fonte: Autor.

Os parâmetros termodinâmicos que caracterizam os pontos do ciclo representado são iguais aos que aparecem na Tabela 16, visto que as pressões de entrada e de saída da turbina são idênticas. O único parâmetro que varia é h_4 devido ao rendimento da turbina ser de 0,6, por se tratar de um sistema de pequeno porte e de menor rendimento. Com os valores termodinâmicos da Tabela 16, calcula-se a entalpia real de saída da turbina. O calor a ser fornecido pela caldeira vem definido pela *Equação 27*, e o calor a ser fornecido pelo

combustível (mistura de vinhaça concentrada e gás natural) é calculado considerando o rendimento da caldeira (*Equação 28*).

$$h_4 = \eta_t \times (h_{4\text{iso}} - h_3) + h_3 \quad \text{Equação 26}$$

$$Q_{c/\text{ano}} = M_{\text{vap}/\text{ano}} \times (h_4 - h_1) \quad \text{Equação 27}$$

$$Q_{\text{comb}/\text{ano}} = \frac{Q_{c/\text{ano}}}{\eta_c} \quad \text{Equação 28}$$

Onde:

Dados de entrada			
Símbolo	Significado	Valor	Fonte
$h_{4\text{iso}}$	Entalpia específica isotrópica do vapor no ponto 4	2588,42 kJ/kg	Tabela 16
h_x	Entalpia específica do vapor no ponto x	x = 1 e 3	Tabela 16
$M_{\text{vap}/\text{ano}}$	Vapor consumido por ano no evaporador	147×10^6 kg/ano	Equação 25
η_c	Rendimento da caldeira	0,8	
η_t	Rendimento da turbina	0,6	
Resultados			
h_4	Entalpia específica do vapor no ponto 4	2.836,7 kJ/kg	Equação 26
$Q_{c/\text{ano}}$	Calor a ser fornecido pela caldeira por ano	393 TJ/ano	Equação 27
$Q_{\text{comb}/\text{ano}}$	Calor a ser fornecido pelo combustível por ano	491 TJ/ano	Equação 28

Como resultado, obtém-se que o calor a ser fornecido pelo combustível para concentrar todo o volume de vinhaça até 65°Bx é 491TJ/ano. A seguir, busca-se verificar se a incineração da vinhaça junto ao gás natural proporciona completamente esta demanda térmica ou se pelo contrário, o balanço energético é negativo.

Produção de energia térmica na incineração no Cenário 3:

Nesta secção, calcula-se o volume de vinhaça que será necessário incinerar (*Equação 29*) conhecendo a massa de $V_{65^\circ\text{Bx}}$ que pode ser obtida de cada m^3 de $V_{4^\circ\text{Bx}}$ (Tabela 15). Com este valor e o PCI da $V_{65^\circ\text{Bx}}$, calcula-se a energia térmica gerada com sua queima (*Equação 30*). Sendo conhecida a proporção de gás e de vinhaça concentrada que deve ser introduzida na caldeira para assegurar sua combustão, pode-se estimar a quantidade de gás natural necessária anualmente (*Equação 31*) e a energia liberada na sua queima (*Equação 32*). Finalmente, obtem-se o calor desprendido através da queima conjunta destes combustíveis (*Equação 33*)

$$M_{65^\circ\text{Bx}/\text{ano}} = V_{4^\circ\text{Bx}/\text{ano}} \times m_{65^\circ\text{Bx}/V_{4^\circ\text{Bx}}} \quad \text{Equação 29}$$

$$Q_{65^\circ\text{Bx}/\text{ano}} = M_{65^\circ\text{Bx}/\text{ano}} \times \text{PCI}_{65^\circ\text{Bx}} \quad \text{Equação 30}$$

$$V_{\text{GN}/\text{ano}} = M_{65^\circ\text{Bx}/\text{ano}} \times V_{\text{GN}/\text{kg}65^\circ\text{Bx}} \quad \text{Equação 31}$$

$$Q_{GN/ano} = V_{GN/ano} \times PCI_{GN} \quad \text{Equação 32}$$

$$Q_{total/ano} = Q_{65^\circ Bx/ano} + Q_{GN/ano} \sim Q_{comb/ano} \quad \text{Equação 33}$$

$$P_t = Q_{total/ano} / T_s \quad \text{Equação 34}$$

Onde:

Dados de entrada			
Símbolo	Significado	Valor	Fonte
$V_{4^\circ Bx/ano}$	Volume de vinhaça 4°Bx produzido por ano	960.000 m ³	Tabela 2
$m_{65^\circ Bx/V_{4^\circ Bx}}$	Massa de vinhaça com 65°Bx por m ³ de vinhaça 4°Bx	62,4 kg/m ³	Tabela 15
$PCI_{65^\circ Bx}$	Poder Calorífico Inferior da vinhaça com 65°Bx	7.167 kJ/kg	AVRAM <i>et al.</i> , 2006
PCI_{GN}	Poder Calorífico Inferior do gás natural	35.530 kJ/Nm ³	Tabela 19
$V_{GN/kg_{65^\circ Bx}}$	Volume de GN por cada kg de vinhaça com 65°Bx	0,02 Nm ³ /kg	SAACKE, 2013
$Q_{comb./ano}$	Calor a ser fornecido pelo combustível por ano	491 TJ/ano	Equação 28
T_s	Tempo de safra	5.808 h/ano	Tabela 2
Resultados			
$M_{65^\circ Bx/ano}$	Massa de vinhaça com 65°Bx por ano	60.000 t/ano	Equação 29
$V_{GN/ano}$	Volume de gás natural consumido por ano	$1,2 \times 10^6$ Nm ³	Equação 30
$Q_{65^\circ Bx/ano}$	Energia térmica produzida com vinhaça 65°Bx por ano	429 TJ/ano	Equação 31
$Q_{GN/ano}$	Energia térmica produzida com gás natural por ano	42 TJ/ano	Equação 32
$Q_{total/ano}$	Energia térmica produzida com vinhaça e gás natural	471 TJ/ano	Equação 33
P_t	Potencia térmica instalada	22,5 MW _t	Equação 34

Somando a energia da queima da vinhaça com a do gás natural, obtém-se 470 TJ/ano, potência muito próxima à demandada para a concentração de 491 TJ/ano (Equação 33). Deve-se ter em conta que existem tecnologias de aproveitamento de calor residual (Ex: EcovinJL® e Ecowaste®), o que reduz significativamente o consumo de vapor, dispensando a necessidade do fornecimento adicional de vapor por parte da caldeira da usina ou de gás natural.

Energia elétrica gerada no Cenário 3:

Para estimar o potencial de produção de energia elétrica a partir da incineração, assume-se que o vapor gerado na caldeira é expandido em uma turbina até a pressão de processo, sendo posteriormente utilizado no evaporador (Figura 30). Para o cálculo da potência fornecida pela turbina aplica-se a Equação 36. Aplicando o rendimento do gerador, calcula-se a energia elétrica produzida por ano (Equação 37) e também a potência instalada (Equação 38).

$$M_{vap/ano} = M_{t/ano} \quad \text{Equação 35}$$

$$-W_{t/ano} = M_{t/ano} \times (h_4 - h_3) \quad \text{Equação 36}$$

$$E_{e/ano} = (W_{t/ano} \times \eta_g) - C_{e.conc./ano} \quad \text{Equação 37}$$

$$P_g = \frac{W_{t/ano} \times \eta_g}{T_s} \quad \text{Equação 38}$$

Onde:

Dados de entrada			
Símbolo	Significado	Valor	Fonte
$m_{vap/ano}$	Vapor consumido pelo evaporador por ano	147×10^6 kg /ano	Equação 25
T_s	Duração da safra	5.808 h/ano	Tabela 2
h_x	Entalpia específica do vapor no ponto x	x = 3 e 4	Tabela 16
η_g	Rendimento do gerador	0,9	
$C_{e.conc./ano}$	Consumo anual de eletricidade na concentração	2,3 GWh _e /ano	
Resultados			
$m_{t/ano}$	Vapor consumido pela turbina por ano	147×10^6 kg/ano	Equação 35
$W_{t/ano}$	Energia mecânica gerada pela turbina ao ano	52 TJ/ano	Equação 36
$E_{e/ano}$	Energia elétrica exportada por ano	10,8 GWh _e /ano	Equação 37
P_g	Potência elétrica de geração instalada	2,3 MW _e	Equação 38

A energia elétrica exportada anualmente pelo sistema de incineração é 10,8 GWh_e, sendo superior à produzida mediante biogás e calculada no cenário anterior (6,6 GWh_e).

3.2.5. Cenário 4: Biodigestão com concentração e uso veicular

O Cenário 4 combina várias tecnologias apresentadas nos cenários anteriores, especificamente a concentração, a biodigestão e a geração elétrica com biogás, que será usada neste caso para suprir as cargas internas do sistema. Além disso, é incorporado um sistema de *upgrading* para a retirada do CO₂ do biogás e um sistema de compressão para adequar o biometano extraído às características necessárias para seu uso veicular. Com esta combinação de tecnologias, é necessário o estudo do balanço energético global do sistema.

Consumo elétrico na biodigestão e dessulfurização no Cenário 4:

O consumo elétrico do sistema de biodigestão e dessulfurização é idêntico ao calculado no Cenário 2, sendo de 1,2 GWh_e no longo da safra (Equação 18).

Consumo elétrico purificação e compressão do biogás no Cenário 4::

A vazão de biogás saindo do biodigestor é de aproximadamente 1.000 Nm³/h. Uma planta purificadora de biogás tipo *water scrubber* com esta capacidade tem uma potência instalada de 0,25 kWh/m³ de biogás (URBAN *et al*, 2009), consumindo no processo um máximo de 1.452 MWh/ano. No que respeita à energia consumida para a compressão, um

compressor de gás natural com pressão de entrada 4 bar e saída de 250 bar, com vazão de 735 Nm³/h, precisa de um motor de 149 kW (GNC, 2014). Em consequência, por cada Nm³ comprimido são necessários 0,2 kWh. A partir desta referência, estima-se um consumo na compressão de 440 MWh_e/ano.

Consumo elétrico na concentração no Cenário 4:

O consumo elétrico da planta de concentração é idêntico ao calculado no Cenário 1, de 600 MWh_e/ano, por ter mesma capacidade.

Consumo térmico na concentração no Cenário 4:

Os gastos térmicos da concentração de vinhaça são os mesmos que no Cenário 1, utilizando as mesmas premissas para o sistema de evaporação. Como foi calculado anteriormente, o evaporador precisa 90,2 TJ/ano.

Consumo de combustível no transporte no Cenário 4:

Este consumo seria praticamente idêntico ao do Cenário 1, pois como já foi indicado, a biodigestão não reduz o volume. Assim, o consumo de combustível no transporte foi estimado em 126 m³ de diesel/ano ou 4,5 TJ/ano.

Produção de biogás no Cenário 4:

O volume de biogás produzido seria mesmo que no Cenário 2, estimado em 5,8 milhões de Nm³ biogás/ano. Parte deste biogás é destinado à produção de energia elétrica para suprir as cargas dos sistemas de biodigestão, concentração e tratamento do biogás (limpeza, purificação e compressão). Dessa forma, precisa-se calcular a quantidade necessária de biogás para abastecer um motogerador de $\eta_{e/t} = 0,29$ (Equação 39).

$$\frac{(C_{e.biod/ano} + C_{e.purif/ano} + C_{e.comp/ano} + C_{e.conc/ano})}{\eta_{e/t}} = C_{biogas.e/ano} \quad \text{Equação 39}$$

$PCI_{biogás}$

Onde:

Dados de entrada			
Símbolo	Significado	Valor	Fonte
$C_{e.biod/ano}$	Consumo anual de eletricidade na biodigestão	1.200 MWh _e /ano	Equação 18
$C_{e.purif/ano}$	Consumo anual de eletricidade na purificação	1.452 MWh _e /ano	URBAN <i>et al</i> , 2009
$C_{e.comp/ano}$	Consumo anual de eletricidade na compressão	581 MWh _e /ano	GNC, 2014

$C_{e.conc/ano}$	Consumo anual de eletricidade na concentração	600 MWh _e /ano	Cenário 1
$PCI_{biogás}$	Poder Calorífico Inferior do biogás	17.765 kJ/Nm ³	Tabela 19
$\eta_{e/t}$	Rendimento termoelétrico do gerador	0,29	
Resultados			
$C_{biogas.e/ano}$	Consumo anual de biogás na geração de eletricidade	2.445.000 Nm ³ /ano	<i>Equação 39</i>

Portanto, dos 5,8 milhões de Nm³ biogás/ano, praticamente 2,4 milhões seriam para a produção de energia elétrica consumida pelo próprio sistema e os 3,4 milhões restantes seriam destinados à compressão para suprir o consumo das operações de campo. Segue adiante o calculo da quantidade de diesel poderia ser substituído pelo biometano produzido (*Equação 41*).

$$Q_{biogás/ano} = \frac{V_{biogás/ano} (1 - V_{\%vaz}) - C_{biogas.e/ano}}{PCI_{biogás}} \quad \text{Equação 40}$$

$$V_{diesel/ano} = \frac{Q_{biogás/ano}}{PCI_{diesel}} \quad \text{Equação 41}$$

Onde:

Dados de entrada			
Símbolo	Significado	Valor	Fonte
$PCI_{biogás}$	Poder Calorífico Inferior do biogás	17.765 kJ/Nm ³	Tabela 19
PCI_{diesel}	Poder Calorífico Inferior do diesel	36.031 kJ/l diesel	ANP, 2014
$V_{\%vaz}$	Porcentagem de biogás vazado	5%	
$V_{biogás/ano}$	Volume de biogás produzido por ano	5.800.000 Nm ³ /ano	<i>Equação 19</i>
$C_{biogas.e/ano}$	Consumo anual de biogás na geração de eletricidade	2.445.000 Nm ³ /ano	<i>Equação 39</i>
Resultados			
$Q_{biogás/ano}$	Energia térmica do biogás disponível	54 TJ/ano	<i>Equação 40</i>
$V_{diesel/ano}$	Volume equivalente de diesel produzido	1.485 m ³ /ano	<i>Equação 41</i>

Observa-se a importante quantidade de diesel que poderia ser substituída pelo biogás, quase 1500 m³/ano, onde o consumo de diesel para fertirrigação no cenário de referência (219 m³ de diesel/ano) seria 15% deste potencial.

3.3. Resultados do balanço energético dos cenários considerados

Os resultados obtidos nos cálculos do balanço energético nos diferentes cenários estão resumidos na Tabela 20. Esta tabela mostra o balanço térmico e elétrico em cada cenário, além do consumo de combustíveis, distinguindo sua origem fóssil ou renovável. Estes valores correspondem a uma usina de porte médio (Tabela 2), e com eles foram calculados os consumos específicos de energia por m³ de vinhaça, representados na Figura 31.

No cenário de referência existe apenas o consumo de diesel. Este consumo de combustível fóssil é reduzido consideravelmente com a introdução da concentração, porém existe um importante consumo térmico na evaporação da água da vinhaça. Esta demanda térmica é suprida com vapor de processo ou com calor residual da usina e, em ambos os casos, o calor é produzido na caldeira alimentada com bagaço, sendo combustível renovável. O consumo de energia elétrica no concentrador não parece ser um fator importante, já que estes equipamentos precisam fundamentalmente de grande quantidade de energia térmica. Diante disso, a fonte desta energia é determinante para a viabilidade desta alternativa de tratamento

Tabela 20. Balanço energético em cada cenário para uma usina média (960.000 m³ de vinhaça/ano).

Cenário	Energia térmica (TJ/ano)	Energia elétrica (GWh _e /ano)	Combustível fóssil (TJ/ano)	Combustível renovável (TJ/ano)
0. Fertirrigação <i>in natura</i>	0,0	0,0	-7,9	0,0
1. Concentração	-90,2	-0,6	-4,5	-90,2
2. Biodigestão + eletricidade	0,0	6,6	-7,9	0,0
3. Incineração + eletricidade	-21,0	10,1	-42,0	429,0
4. Biodigestão + concentração + uso veicular	-90,2	0,0	0	54,0

Fonte: Autor.

Nos cenários onde é produzida energia elétrica excedente para a sua comercialização, a incineração tem quase duas vezes mais produção do que a biodigestão. Na biodigestão tem-se o mesmo consumo de diesel do cenário de referência, já na incineração este consumo é totalmente eliminado. Apesar disso, na incineração é necessário um consumo de energia fóssil quase 7 vezes superior ao cenário de referência, por ser utilizado gás natural na queima da vinhaça. Ainda assim, a incineração possibilita o aproveitamento da vinhaça como combustível, gerando grande quantidade de energia térmica de origem renovável, que é aproveitada na própria concentração da vinhaça e na geração de energia elétrica. O balanço energético do sistema de concentração – incineração não está muito longe do equilíbrio, sendo levemente negativo, o que pode ser compensado com um aporte de calor residual por parte da usina.

O cenário de uso veicular do biogás é o único dos cenários que não tem consumo de combustíveis fósseis. Além de gerar toda a energia elétrica para suprir as cargas internas do sistema de processamento, a produção de biometano é suficiente para abastecer os equipamentos utilizados nos trabalhos de fertirrigação e para substituir parte do consumo de diesel no restante das atividades relativas ao cultivo e transporte da cana-de-açúcar.

Figura 31. Balanço energético em cada cenário de tratamento da vinhaça em usinas de etanol de cana.
Fonte: Autor.

Conclui-se que, do ponto de vista energético, o cenário mais recomendável é o Cenário 4, pela sua característica de ser 100% renovável. O biogás é utilizado para abastecer os veículos, o que melhora o balanço energético do etanol de cana-de-açúcar, chegando muito perto da completa independência dos combustíveis fósseis na sua produção.

Os resultados obtidos acima são utilizados no capítulo seguinte que estuda o impacto ambiental, pois com os valores calculados tanto de consumo de combustível fóssil e renovável, como de eletricidade e energia térmica, é possível calcular as emissões de GEEs e outros poluentes. Da mesma forma, os dados de produção e consumo de energia são fatores fundamentais a serem inseridos na avaliação econômica.

CAPÍTULO 4. AVALIAÇÃO DE IMPACTO AMBIENTAL

O objetivo do presente capítulo é discutir os impactos mais importantes sobre o solo, a água e a atmosfera, que estariam atrelados aos diferentes cenários definidos no Capítulo 3. Para isso, foi realizada uma pesquisa bibliográfica aprofundando nos aspectos ambientais da fertirrigação, completando neste âmbito a descrição da técnica realizada no Capítulo 2. Partindo do cenário de referência, estudam-se quais são os benefícios ou os possíveis problemas ambientais que acompanham a implantação de cada uma das alternativas de processamento, inserindo os ganhos da produção energética na avaliação. Através da análise qualitativa e quantitativa, pretende-se comparar o desempenho ambiental dos diferentes cenários, com o intuito de determinar qual a tecnologia que implique maior mitigação de impactos com respeito ao cenário de referência da fertirrigação com vinhaça *in natura*.

4.1. Solo e água

4.1.1. *Cenário 0 de referência: Fertirrigação com vinhaça in natura*

Existem ainda dúvidas e controvérsias com relação aos impactos ambientais do uso da vinhaça *in natura* para fertirrigação, devido aos possíveis efeitos da vinhaça sobre o solo e a qualidade das águas subterrâneas quando usada em excesso. Nos estudos existentes há resultados variáveis em consequência da grande diversidade de solos e de composição das vinhaças, assim como de sua dosagem (SILVA *et al.*, 2007).

Até o final dos anos setenta, a vinhaça era lançada nos corpos de água superficiais, esgotando o oxigênio dissolvido na água, destruindo os ecossistemas aquáticos e prejudicando o abastecimento de água, além de agravar endemias como a malária, a amebíase e a esquistossomose (ALMEIDA *et al.*, 1950). Com o crescimento da produção nacional de etanol nos anos setenta e o aumento dos impactos ambientais, sociais e econômicos produzidos pelo despejo descontrolado de vinhaça nos rios, o governo instaurou a Portaria MINTER nº 323 de 29/11/1978, que proibia o lançamento (direto ou indireto) da vinhaça nos mananciais superficiais, obrigando as destilarias a apresentar projetos para implantação de sistemas de tratamento e/ou utilização da vinhaça (BRASIL, 1978). Nessa mesma direção, foi aprovada a resolução CONAMA nº 0002 de 05/06/1984, que determinava a necessidade de realizar estudos para controle da poluição causada pelos efluentes das destilarias de álcool e pelas águas de lavagem da cana (CONAMA, 1984). Esta legislação permitiu o

desenvolvimento de práticas mais razoáveis para a destinação da vinhaça, sendo desenvolvida a tecnologia nos anos seguintes para seu aproveitamento como fertilizante.

Outra destinação da vinhaça eram as chamadas "áreas de sacrifício", terrenos que recebiam enormes quantidades de vinhaça *in natura*. Como indica o termo, as "áreas de sacrifício" tornam-se completamente inutilizáveis para quaisquer outras finalidades, devido à salinização do solo. Além do impacto sobre o solo, esta prática pode causar a contaminação do lençol freático devido a possíveis infiltrações de substâncias poluentes, especialmente sais (potássio e nitratos).

Com relação à proteção dos aquíferos diante desta potencial contaminação, não foi encontrada legislação federal que regule o tratamento de efluentes industriais, tal como a vinhaça. Na esfera estadual, existe a Lei nº 6.134 de 02/06/1988, do Estado de São Paulo, que em seu art. 5º estabelece que “os resíduos líquidos, provenientes de atividades industriais ou de qualquer outra natureza, só poderão ser conduzidos ou lançados de forma a não poluírem as águas subterrâneas” (SÃO PAULO, 1988). Em Minas Gerais foi aprovada a Deliberação Normativa do Conselho de Política Ambiental (COPAM) nº 012/86, a qual estabelece critérios para o armazenamento dos efluentes das destilarias e para a disposição de vinhaça no solo, fixando limites às doses de aplicação dependendo da origem do resíduo: caldo direto, melaço ou caldo misto de melaço e caldo de cana (COPAM, 1986). Esta legislação, foi aprovada depois de pesquisas como a de Glória e Magro (1977), que recomendaram dosagens controladas para o uso fertilizante de acordo com o teor de potássio (K) contido na vinhaça e as condições dos solos e da cultura.

A CETESB, no Estado de São Paulo, regulamentou a fertirrigação com vinhaça através da Norma P4.231 (CETESB, 2006), estabelecendo os critérios e procedimentos para o armazenamento, transporte e aplicação. A Norma CETESB P4.231 inclui um conjunto de diretrizes que permitem orientar os produtores na aplicação da vinhaça nos solos de forma mais adequada e correta, no que tange à prevenção de impactos ambientais e à proteção ambiental, em especial, em relação às águas subterrâneas, ao solo, às Área de Preservação Permanente, às Áreas de Reserva Legal e aos núcleos urbanos próximos ao local (KLEIN *et al.*, 2008). Posteriormente, em Minas Gerais, foi aprovada a Deliberação Normativa COPAM nº164, de 30 de março de 2011 (COPAM, 2011), sendo muito semelhante à Norma P4.231.

A Norma P4.231 estabelece o procedimento para calcular a dosagem máxima de vinhaça que pode receber uma determinada área, considerando a Capacidade de Troca

Catiônica (CTC)³¹ do solo e a quantidade de potássio presente tanto no solo como no efluente. As restrições de dosagem podem ser um problema para as destilarias, que vêm incrementado o custo de dispersão da vinhaça, dado que devem de ampliar o seu raio de transporte.

Na Figura 32, representa-se o efeito da Norma P4.231, onde, na situação inicial, só seria atendida a necessidade de minimizar os custos de fertirrigação, sendo efetuada nos cultivos situados dentro de um pequeno raio de distribuição ou nas áreas onde sua dispersão for mais econômica, o que resulta em grandes doses de aplicação. Com a implantação da Norma P4.231 a dose passa a ser controlada e diminuída, incrementando o raio de distribuição e a superfície fertirrigada.

Figura 32. Representação esquemática do efeito da Norma P4.231 sobre a fertirrigação com vinhaça.
Fonte: Autor.

Muitos autores estudaram os efeitos da vinhaça nos solos ao longo do tempo, concluindo que a vinhaça eleva o pH dos solos (ALMEIDA, 1950), aumenta a CTC pelo grande aporte de matéria orgânica (GLÓRIA; ORLANDO FILHO, 1983), fornece e aumenta a disponibilidade de alguns macronutrientes (BARROS *et al.*, 2010), melhora a estrutura do solo, incrementa a retenção de água e amplia a atividade biológica promovendo maior número de insetos, minhocas, bactérias e fungos (FERREIRA & MONTEIRO, 1987). Portanto, a vinhaça pode melhorar as características físico-químicas dos solos elevando sua fertilidade e produtividade de muitos solos cultivados com cana (WORKSHOP VINHAÇA, 2007).

³¹ A Capacidade de Troca de Cátions (CTC) é o número total de cátions que o solo pode reter, o que depende da quantidade de cargas negativas presentes. Quanto maior é o número de cargas negativas de um solo, maior é a sua capacidade de troca de cátions ou de reter cátions.

Apesar destes impactos positivos observados, quando a fertirrigação é realizada de forma inadequada pode ser um fator de vulnerabilidade para os aquíferos próximos da superfície. Com os enormes volumes manejados e transportados, a despesa da fertirrigação é determinante para a viabilidade econômica da produção de etanol, estimulando os usineiros a diminuir o raio de dispersão e produzindo uma excessiva dosagem nas áreas próximas à destilaria. Hassuda (1989), Cruz (1991), Righetto *et alii.* (1991) e Gloeden *et alii.* (1991) realizaram estudos sobre as possibilidades de contaminação das águas subterrâneas. Os resultados desses estudos indicam lixiviação de nutrientes da vinhaça em direção ao lençol freático, principalmente de nitratos, existindo um perigo de degradação futura desses aquíferos (CORAZZA, 2006).

O nitrato tem uma notória tendência de aumento nos Aquíferos Bauru, Pré-Cambriano e Serra Geral, desde o final dos anos noventa (Figura 33), sendo que o Bauru é o aquífero com maior concentração de nitrato (CETESB, 2013a), mas a relação entre este aumento dos níveis de nitrato e a prática da fertirrigação não foi estabelecida. Dessa forma, são necessários mais estudos para estabelecer correlações entre as concentrações de nitrato identificadas em poços e o uso e ocupação do solo.

Figura 33. Tendência das concentrações de nitrato no Aquífero Bauru, no período de 1998 a 2012.
Fonte: CETESB (2013).

No que tange a seu potencial como fertilizante, a vinhaça consegue suprir a necessidade de potássio da cana, mas não a de nitrogênio. Consequentemente, seu emprego reduz a depleção de recursos minerais necessária para a fertilização química, mas não a elimina totalmente.

Aspectos pouco documentados são a presença de antibióticos ativos na vinhaça e os impactos que isto pode ocasionar no meio ambiente. O uso de antibióticos na produção de álcool tem sido a medida adotada pela indústria para controlar as infecções ocorridas nas dornas durante o processo de fermentação do caldo. Estas infecções são produzidas por bactérias provenientes do campo e transportadas junto com a cana. Estes microrganismos competem com a levedura pelo açúcar, comprometendo o rendimento da fermentação. Os tipos de antibióticos utilizados são em sua maioria resistentes à temperatura de destilação (termoestáveis), encontrando-se ativos depois do processo de destilação na vinhaça. O fato de que os antibióticos termoestáveis são os de uso mais difundido deve-se a sua maior economicidade se comparados aos termoláveis (BRASMETANO, 2011).

Na pesquisa realizada pela Brasmetano Ind. Com. Ltda. (2011) foram levantados os produtos utilizados no controle de infecção das dornas de fermentação que interferem no processo de produção do etanol (Tabela 21), constatando que a maioria destas substâncias tinha caráter termoestável.

Tabela 21. Tipos de antibióticos utilizados na fabricação do etanol

Produto	Classificação	Temperatura de Decomposição °C
Kamoran	Termoestável	120
Spectran 100E	Termoestável	110
HJ Gold	Termoestável	120
Kamoran WP	Termoestável	110
Kamoran HJ	Termoestável	110
Busan 978	Termoestável	120
Busan 989	Termoestável	110
AB 1030	Termoestável	120
SM 3	Termoestável	120
Kamoran	Termoestável	110
HJ Gold	Termoestável	110
Corstan	Termoestável	110
PVPOX 40	Termolável	65
Spectran 100E	Termolável	50
Lúpulo Beta Ácido 45%	Termolável	55

Fonte: Brasmetano Ind. Com. Ltda. (2011).

A dispersão de antibióticos no campo enseja a mutação dos microrganismos pela sobrevivência e pode produzir seletividade e resistência (BRASMETANO, 2011). A geração de microrganismos resistentes aos antibióticos disponíveis traz consequências significativas, tal como uma perda de eficiência no emprego destas substâncias para o controle biológico da fermentação.

4.1.2. Cenário 1: Concentração evaporativa

A implantação da concentração da vinhaça mitiga alguns dos impactos produzidos pela fertirrigação, devido fundamentalmente à redução do seu volume.

Com a concentração reduz-se a necessidade de grandes depósitos para a vinhaça. Este armazenamento representa um perigo para o solo e para os corpos de água, considerando a possível percolação da vinhaça no subsolo e, também, o rompimento acidental dos reservatórios que ocasiona graves impactos ambientais. Além de permitir a diminuição em 10 vezes o volume de armazenamento, a vinhaça concentrada não se deteriora em função de seu alto teor de sólidos solúveis, o que lhe confere um alto potencial osmótico impossibilitando sua biodegradabilidade (SILVA, 2012).

Ao diminuir o volume de vinhaça, existe uma necessidade menor no fluxo de caminhões e também uma redução das dimensões dos sistemas de depósito e canalização para o transporte, evitando movimento de terra para a construção desses sistemas e diminuindo o risco de rompimentos, vazamentos, e percolação.

A vinhaça concentrada é aplicada junto à linha de plantio, o que pode aumentar a eficiência da adubação caso a cana seja recém-plantada. Esta suposição assume que, caso as raízes não estejam desenvolvidas em toda a superfície do cultivo, a falta de absorção radicular permitiria uma maior percolação de nutrientes na entrelinha. Nesta condição, a perda do potássio e do nitrogênio parece mais provável com a aspersão realizada em toda a extensão que com a aplicação de vinhaça concentrada junto à linha de plantio.

Como tem sido indicado anteriormente, com a diminuição do volume se evitam perdas por vazamentos em lagoas e canais, o que aumentaria o controle na fertilização e o aproveitamento do adubo. Por outro lado, caso a distribuição da vinhaça concentrada aumente o trânsito de caminhões-tanque de elevado peso dentro do canavial, pode-se promover uma maior compactação do solo quando comparado com o sistema *hidroroll*. Deve-se resaltar que as suposições anteriores não estão fundamentadas em medições, fazendo-se necessária a sua verificação experimental.

Talvez um ponto fundamental para a expansão do uso de concentradores é que esta tecnologia possibilita a reutilização da água do condensado para a produção do álcool, diminuindo o consumo da planta e assim seu impacto ambiental. Com a atual preocupação no Estado de São Paulo ante a escassez de água e a ampliação da regulação pelo seu consumo no Brasil, a economia obtida com a implantação do processo de concentração surge como um dos principais benefícios dessa tecnologia, sendo importante incluir esta variável na análise de

viabilidade do investimento em concentração (SANTA CRUZ, 2012). Este condensado possui concentrações mensuráveis de ácidos orgânicos, nitrogênio nítrico e amoniacal, assim como etanol, não podendo ser reutilizado como água de composição da caldeira de alimentação. Como esta água de reuso tem pH ácido, atualmente está sendo utilizada nas dornas de fermentação pelas suas propriedades antissépticas, diminuindo o consumo de antibióticos.

O Cenário 1 poderia diminuir a captação de água da usina em mais de 10% (*Equação 42* e *Equação 43*) com respeito do cenário de referência, considerando os dados de Santa Cruz (2012) acerca da captação de água e o reúso da totalidade do condensado obtido na evaporação da vinhaça.

$$V_{\text{água/ano}} = m_{\text{cana/ano}} \times V_{\text{água/tcana}} \quad \text{Equação 42}$$

$$m_{\text{cond/ano}} = V_{\% \text{conc}} \times V_{4^{\circ} \text{Bx/ano}} \times m_{\text{cond}/V_{4^{\circ} \text{Bx}}} \quad \text{Equação 43}$$

Onde:

Dados de entrada			
Símbolo	Significado	Valor	Fonte
$V_{4^{\circ} \text{Bx/ano}}$	Volume de vinhaça 4°Bx produzido por ano	960.000 m ³ /ano	Tabela 2
$m_{\text{cond}/V_{4^{\circ} \text{Bx}}}$	Água condensada por m ³ de $V_{4^{\circ} \text{Bx}}$ concentrada até $V_{20^{\circ} \text{Bx}}$	811,2 kg/m ³	Tabela 15
$V_{\% \text{conc}}$	Porcentagem de volume concentrado	29%	Tabela 14
$V_{\text{água/tcana}}$	Volume de água captada por tonelada de cana	1,85 m ³	Santa Cruz, 2012
$m_{\text{cana/ano}}$	Massa de cana processada por ano	1.160.000 t	Tabela 2
Resultados			
$V_{\text{água/ano}}$	Volume de água captada por ano	2.150.000 m ³ /ano	<i>Equação 42</i>
$m_{\text{con/ano}}$	Vapor condensado por ano	226.000 m ³ /ano	<i>Equação 43</i>

Considerando que na região sudeste do país a cana não é irrigada e tem como única fonte de água a precipitação natural da região e a vinhaça, deve ser apontado que a fertirrigação pode ser importante para o plantio em determinados momentos de escassez de chuva como recurso para realizar a chamada “irrigação de salvamento”³².

4.1.3. Cenário 2: Biodigestão anaeróbia com geração de eletricidade

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

³² Irrigação realizada após a colheita ou plantio da cultura.

vinhaça não só se mantém, como também aumenta, dado que a vinhaça digerida tem uma maior proporção de nitrogênio amoniacal. Sparks (1995) *apud* Jadoski *et al.* (2010) descreve que para o nitrogênio na forma de amônio (NH_4^+), a lixiviação é reduzida pela adsorção deste cátion no complexo de cargas negativas do solo.

Por outro lado, neste processo se perderiam os benefícios mencionados sobre a incorporação de matéria orgânica no solo, produzida com a fertirrigação com vinhaça *in natura*, pois o processo de biodigestão elimina a maior parte da mesma. Desse modo, quando se pensa na aplicação no solo, a diminuição da carga orgânica é uma desvantagem para a fertilização.

A acidificação temporária do solo produzida com a fertirrigação com vinhaça *in natura* pode ser evitada com a biodigestão, dado que se produz um aumento importante do pH da vinhaça que atinge valor neutro.

Um impacto colateral positivo a ser considerado é a necessidade de eliminar o uso de antibióticos termostáveis no controle da fermentação alcoólica, com o fim de viabilizar o processo de biodigestão da vinhaça. Supondo que os ganhos econômicos derivados da produção e do uso de biogás fossem superiores aos custos de substituição de antibióticos termostáveis, a biodigestão seria uma opção para evitar a emissão desses compostos ativos na natureza. No presente estudo, não foi incluída uma análise de viabilidade econômica desta substituição pela dificuldade de se obter dados reais sobre o uso de antibióticos, tais como quantidades ou compostos aplicados.

Depois da biodigestão, o volume de vinhaça continua sendo o mesmo e em consequência, mantêm-se os impactos produzidos pelo seu transporte. Para evitar a concentração de nutrientes, tais como o potássio, nas imediações das usinas e para o cumprimento da Norma CETESB P4.231 Dez/2006, é necessária a criação de um sistema de distribuição de vinhaça a longas distâncias, com os movimentos de terra necessários para a construção de lagoas de armazenamento e canais de distribuição. O perigo de salinização de solos e aquíferos continua presente, pois as quantidades de potássio permanecem na biodigestão. Observa-se que a eliminação da carga orgânica não é total, possuindo ainda potencial poluidor de águas.

4.1.4. Cenário 3: Incineração com geração de eletricidade

Com o processo da incineração de vinhaça, evitam-se todos os problemas associados à distribuição da vinhaça, assim como os possíveis riscos de contaminação de corpos de água e do lençol freático, eliminando-se totalmente a necessidade de verter um efluente líquido com

alto DQO e conteúdo em sais no meio ambiente. Com esta tecnologia se obtém um fertilizante sólido constituído por sais de potássio solúveis, facilmente transportável e aplicável, evitando a compra de fertilizantes químicos.

Um ganho importante associado a este sistema é devido à concentração da vinhaça necessária para sua combustão, pois a água proveniente dos condensadores pode ser reutilizada no processo de fabricação do etanol, diminuindo significativamente o consumo de água por parte da usina. Neste cenário concentra-se 100% da vinhaça até atingir 65°Bx, o que significa que, para a usina modelo, existe uma disponibilidade de água de reúso de 913.536 m³/ano. Utilizando o dado de consumo de 1,85 m³/t de cana (SANTA CRUZ, 2012), chega-se a um volume de reúso calculado de 42% da água captada pela usina.

Finalmente, com a incineração, eliminam-se totalmente os resíduos de antibióticos ativos presentes na vinhaça e seus impactos potenciais atrelados.

4.1.5. Cenário 4: Biodigestão com concentração e uso veicular

Com esta solução combinada, unem-se o desempenho ambiental da biodigestão com o da concentração. Com a concentração, diminui-se o volume da vinhaça, facilitando sua distribuição a longas distâncias e, com a biodigestão, reduz-se a carga orgânica. Por tanto, este sistema controla simultaneamente a concentração de potássio no entorno das usinas, favorecendo assim o cumprimento da Norma CETESB P4.231, e a possibilidade de contaminação da água com matéria orgânica.

Possibilita-se também a reutilização da água na produção do álcool ou no processo da biodigestão. Além dos benefícios anteriores, a vinhaça biodigerida e concentrada tem boas características para seu uso fertilizante, eliminando parcialmente a aplicação de adubos minerais.

É fundamental que a vinhaça *in natura* não contenha antibióticos ativos que prejudiquem a biodigestão. Sendo assim, a implantação deste sistema incentiva a substituição de antibióticos termooestáveis por técnicas menos perigosas para o meio ambiente.

4.2. Emissões de GEEs

A fertirrigação com vinhaça possui um alto potencial de emissão de GEEs (MCTI, 2013), devido ao seu importante conteúdo em carbono e em nutrientes, sendo microbiologicamente ativa por sua DBO e por seu conteúdo em nitrogênio. Como a vinhaça é armazenada em lagoas e transportada em canais a céu aberto, existem emissões de metano em consequência à decomposição anaeróbia desta matéria orgânica. Apesar disto, no balanço de

GEEs realizado para o etanol de cana-de-açúcar por Macedo *et al.* (2008), os autores consideram que devido à vinhaça não permanecer em lagoas e ao volume de aplicação no campo ser controlado, não se promovem condições anaeróbicas. Portanto, os autores assumem que as emissões de metano não são significativas, sendo excluídas de seu cálculo.

Em outro trabalho sobre balanço de GEEs para etanol de cana-de-açúcar, elaborado por Soares (2009), indica-se que na época não existiam ainda dados sobre a emissão de CH₄ produzida durante o tratamento de vinhaça por fertirrigação. Porém, este mesmo autor assinala que, devido à significativa quantidade de material orgânico e de nutrientes carregado na vinhaça, assim como à sua mistura com a água da lavagem da cana que é contaminada com algo de açúcar, poderia resultar em emissões de CH₄. Levando isso em conta, Soares (2009) considera que, após a aplicação da vinhaça na lavoura, não se espera emissão de CH₄ do solo, mas inclui no cálculo um valor de emissão de CH₄ nos canais de distribuição de 0,2% do carbono contido na vinhaça.

Com a finalidade de obter dados empíricos sobre emissões de CH₄ durante o processo de fertirrigação têm sido realizados diversos estudos. Nas medições realizadas pela Embrapa Agrobiologia (BODDEY, 2009) foram constatadas emissões de metano em um canal de distribuição de vinhaça, chegando a 185,5 g CH₄/m²hora. As medições de Paredes (2011) mostraram que o armazenamento e a distribuição de vinhaça por lagoas e canais podem ser fontes de CH₄, sendo os canais de terra a principal via de perda. Esses dados também indicam que o percentual de carbono presente na vinhaça emitido na forma de CH₄ pode chegar a 33%, sendo que a presença de lodo acumulado nos reservatórios tem efeito na amplificação das emissões. Como pode ser observado, o valor obtido por Paredes (2011) está bem acima do estimado por Soares *et al.* (2009). Oliveira (2010) corroborou sua hipótese de que a vinhaça é uma fonte de GEEs ao medir emissões de CH₄ no canal de até 1.684 mg de CH₄/m²hora.

Apesar de serem estudos pontuais, de escassa representatividade, com poucas medições e com grande variação nos resultados quantitativos, os estudos citados apontam na mesma direção, corroborando a hipótese de que em lagoas e canais provavelmente são promovidas condições de anaerobiose, com uma significativa emissão de CH₄ que não está sendo considerada no inventário de GEEs do setor do etanol.

Nesta seção, realiza-se uma estimativa das emissões de GEEs em cada cenário, calculando as emissões evitadas com a implantação de cada uma das tecnologias avaliadas. Este cálculo só contabilizará as emissões de CO₂ provenientes de combustíveis fósseis e as de

CH₄ relativas ao tratamento e à distribuição da vinhaça, não incluindo as emissões de óxido nitroso (N₂O) existentes em lagoas e canais.

A decisão de não incluir esta emissão de N₂O tem dois motivos. O primeiro é que, segundo dados de Oliveira (2010), o CH₄ é responsável por 99,84% da emissão do CO₂eq produzida no sistema de distribuição, deixando ao N₂O uma participação considerada insignificante. Por outro lado, não existem dados disponíveis de emissão de N₂O quando se distribui vinhaça biodigerida³³.

Neste estudo tampouco foram consideradas as emissões de CH₄ e N₂O produzidas no solo da lavoura. Com relação às emissões de CH₄ provenientes do solo fertilizado, existem evidências que corroboram a hipótese de que a aplicação de vinhaça geralmente não resulta em emissões significativas de CH₄ (PAREDES, 2011; CARMO *et al.*, 2013; OLIVEIRA *et al.*, 2013), indicando que a matéria orgânica é decomposta no solo em condições aeróbicas.

No que se refere às emissões de N₂O no solo, existem resultados controversos sobre os fatores de emissão do nitrogênio presente na vinhaça. Lisboa *et al.* (2011) e Carmo *et al.* (2013) encontraram fatores de emissão superiores ao valor de 1% considerado pelo IPCC, enquanto as medições de Oliveira *et al.* (2013) indicaram o contrário. Em qualquer caso, os resultados mostram maior importância relativa das emissões de CH₄ em lagoas e canais quando comparadas às emissões de N₂O no solo, até o ponto em que estas se tornam desprezíveis.

Por outro lado, devido à falta de dados acerca da fertilização empregando vinhaça concentrada ou biodigerida, não é possível realizar uma comparação entre estes tratamentos. Portanto, será assumido que todos os cenários têm a mesma emissão de N₂O no solo, não afetando a comparação.

Por estas razões, no presente trabalho serão analisadas apenas as emissões de CH₄ provenientes das lagoas e canais, assunto ainda não considerado com detalhe na literatura, de modo que não formam encontradas publicações revisadas.

4.2.1. Cenário 0 de referência: Fertilização com vinhaça in natura

As emissões de GEEs produzidas neste cenário são tomadas como linha de base para o cálculo de reduções nos demais casos estudados. Neste cálculo são contabilizadas as emissões de CH₄ que se produzem em lagoas de armazenamento e canais de distribuição, assim como as emissões de CO₂ provenientes do consumo de diesel na distribuição de vinhaça.

³³ Esta dissertação se baseia em dados de revisão bibliográfica.

Emissões de CH₄ em lagoas e canais no Cenário 0:

Para estimar as emissões produzidas em lagoas e canais, são utilizados dados não submetidos a ampla revisão, usando como referências dissertações de mestrado ao carecer de outras fontes disponíveis.

Nos estudos de Paredes (2011) e de Oliveira (2010), realizou-se amostragem e caracterização química da vinhaça em diferentes pontos de um canal de distribuição. Em ambos os estudos, observou-se uma queda acentuada nos valores de DBO e DQO da vinhaça com o aumento da distância percorrida no canal condutor. Esta diminuição na quantidade de carbono orgânico é um indicativo das reações de decomposição, que ocasionaram emissões gasosas de CO₂ e CH₄. Esta diminuição é especialmente significativa entre o ponto do canal anterior à lagoa e o posterior, indicando que existe uma maior decomposição de matéria orgânica nos lugares de armazenamento. As medições de Oliveira (2010) mostram que a DQO da vinhaça se reduz em 29% no passo pela lagoa (Tabela 22). Além disso, nas lagoas existe maior possibilidade de anaerobiose, já que estes reservatórios chegam a ter profundidades de até 5 metros, existindo acumulação de lodo no fundo, além de possuir uma temperatura propícia para microrganismos termofílicos e mesofílicos.

No presente estudo, utilizam-se os dados coletados por Oliveira (2010) para contabilizar a diminuição de carbono orgânico da vinhaça no sistema de distribuição (Tabela 22). Observa-se uma diminuição na concentração de potássio nas amostras, o que significa que a vinhaça está sendo diluída no percurso, pois o potássio se encontra dissolvido e não é sedimentado ou retirado de nenhuma forma. Uma explicação para esta diluição pode ser a captação de água de chuva no canal proveniente do escoamento superficial. Esta diluição é calculada para cada secção do canal, considerando que a concentração de potássio se deveria manter constante em todos eles se a captação de água não se produzisse.

Tabela 22. Composição da vinhaça kg/m³ em diferentes secções do canal.

	DBO	DQO	C	K	Fator de Diluição*
Secção inicial	14,97	31,15	10,17	3,28	1,00
Secção depois da lagoa	3,57	11,06	3,47	1,65	1,99
Secção final	1,48	6,86	1,42	0,84	3,91

Fonte: Oliveira (2010).

***Calculado pelo autor considerando a concentração de potássio.**

Utilizando o coeficiente de diluição calculado, pode-se corrigir a estimativa da quantidade de carbono orgânico que é perdido na passagem pela lagoa e no percurso do canal, assim como sua porcentagem, resultados mostrados na Tabela 23.

Tabela 23. Composição da vinhaça kg/m³ em diferentes secções do canal ajustando a diluição.

	DBO	DQO	C	K	Fator de Diluição
Tramo inicial	14,97	31,15	10,17	3,28	1,00
Tramo depois da lagoa	7,10	22	6,9	3,28	1,00
Tramo final	5,81	26,83	5,54	3,28	1,00

Fonte: Cálculo do autor baseado nos dados de Oliveira (2010).

A questão central que deve ser esclarecida é sobre quanto carbono contido é emitido em forma de CH₄. A diversidade de configurações e dimensões que podem ter as lagoas e os canais de distribuição dificulta a tarefa de dar uma porcentagem representativa de matéria orgânica emitida como CH₄. Para dar uma estimativa da emissão deste gás na lagoa, é utilizada a metodologia ACM0014 “*Treatment of wastewater*”³⁴.

Segundo esta metodologia, o cálculo das emissões de CH₄ nas lagoas é baseado na DQO utilizando os parâmetros da *Equação 45*. A DQO eliminada na lagoa depende de vários fatores, tais como as dimensões da lagoa, o tempo de residência, a carga orgânica de entrada, a temperatura ambiente e da vinhaça, etc. Como foi indicado anteriormente, no caso particular estudado por Oliveira (2010), a DQO da vinhaça se reduz em 29%. Seguindo esta referência por falta de estudos mais abrangentes, assume-se que a vinhaça é descarregada na lagoa com 31,15 kg de DQO /m³ de vinhaça, saindo deste armazenamento com 22 kg de DQO/m³ (Tabela 23). Desse modo, são eliminados 9,15 kg de DQO /m³ de vinhaça durante o tempo de residência na lagoa. Por outro lado, considera-se uma capacidade de produção máxima de metano de 0,21 kg CH₄/kg DQO (CLNSA, 2009). Para o cálculo de F_{DQO/CH₄} (*Equação 44*), utilizam-se os valores indicados na metodologia ACM0014, que toma como 50% a fração de degradação sob condições anaeróbicas, existentes em lagoas de profundidade maior a 1,5 m. Esta metodologia assume uma reação anaeróbia completa com valores superiores a 30°C, sendo este o caso da vinhaça. Inclui-se no cálculo um fator de incerteza conservador de 0,89. Com estes valores, pode ser estimada a emissão de CH₄ de 0,86 kg CH₄/m³ de vinhaça (*Equação 45*).

³⁴ Metodologia aprovada pela UNFCCC (ONU, 2012).

$$F_{\text{DQO/CH}_4} = 0,5 \times 1 \times 0,89 = 0,45$$

Equação 44

$$\text{CH}_4 = \text{DQO}_e \times B_o \times F_{\text{DQO/CH}_4}$$

Equação 45

Onde:

Dados de entrada			
Símbolo	Significado	Valor	Fonte
B_o	Capacidade de produção máxima de metano	0,21 kg CH_4 /kg DQO	CLNSA, 2009
DQO_e	DQO eliminada por m^3 de vinhaça na lagoa	9,15 kg/ m^3	
Resultados			
$F_{\text{DQO/CH}_4}$	Fator de conversão da DQO em metano	0,45 (Adimensional)	<i>Equação 44</i>
CH_4	Emissão de CH_4 por cada m^3 de vinhaça	0,86 kg/ m^3	<i>Equação 45</i>

Considerando as massas atômicas do metano e do carbono³⁵, dos 0,86 kg CH_4/m^3 de vinhaça, 0,65 kg correspondem à massa do carbono. Como pode ser deduzido dos dados do carbono presente na vinhaça (Tabela 23), existe uma perda deste elemento de 3,2 kg C/ m^3 de vinhaça durante a residência na lagoa. Desta perda, 0,65 kg são emitidos na forma de CH_4 , e o restante é emitido na forma de CO_2 ou fixado na biomassa dos microrganismos. Portanto, o valor da emissão de carbono na forma de CH_4 representa 6,4% do Carbono inicialmente presente na vinhaça.

Quanto à emissão de CH_4 produzida no canal, assume-se o valor estimado por Oliveira (2010), de 0,11 kg CH_4/m^3 de vinhaça, equivalendo a 0,08 kg C/ m^3 de vinhaça, o que representa 0,8% do carbono inicialmente presente na vinhaça.

Os fatores calculados acima são resumidos na Tabela 24, onde pode ser observado que a emissão na lagoa é significativa.

Tabela 24. Carbono eliminado da vinhaça e emitido na forma de CH_4 em lagoas e canais.

	% de Carbono eliminado	% de Carbono emitido na forma de CH_4
Lagoa	32,2	6,4
Canal	13,3	0,8

Fonte: Autor.

Aplicando estes coeficientes de emissão e o valor médio de 10 kg de carbono/ m^3 de vinhaça (Tabela 3), obtêm-se a emissão por m^3 de vinhaça na lagoa e no canal (*Equação 47*).

³⁵ $[\text{CH}_4] = 16\text{g/mol}$; $[\text{C}] = 12\text{g/mol}$

Para saber qual é a emissão de GEEs deste cenário, deve-se considerar que 29% da vinhaça é transportada em caminhão, evitando-se a emissão de CH₄ nos canais. Assim, calcula-se a quantidade de CO₂ equivalente emitido por m³ de vinhaça no Cenário 0 (*Equação 46* e *Equação 47*):

$$m_{CH_4/V_4^oBx} = m_{C/V_4^oBx} \times F_{C/CH_4} \times \frac{M_{CH_4}}{M_C} \quad \text{Equação 46}$$

$$CO_{2eqano} = (1 - V_{\%cam}) \times m_{CH_4/V_4^oBx} \times F_{CH_4/CO_{2eq}} \quad \text{Equação 47}$$

Onde:

Dados de entrada			
Símbolo	Significado	Valor	Fonte
m_{C/V_4^oBx}	Carbono contido por m ³ vinhaça	10 kg	Tabela 3
M_C	Massa molecular do carbono	12 g/M	
M_{CH_4}	Massa molecular do metano	14 g/M	
F_{C/CH_4}	Fator de conversão do carbono em metano	lagoa: 6,4%; canal: 0,8%	Tabela 24
$F_{CH_4/CO_{2eq}}$	Fator de conversão do CH ₄ em CO _{2eq}	21	IPCC, 2006
$V_{\%cam.}$	Volume de vinhaça transportado em caminhão	lagoa: 0%; canal: 29%	Tabela 5
Resultados			
m_{CH_4/V_4^oBx}	Metano emitido por m ³ vinhaça	lagoa: 0,86 kg/m ³ canal: 0,11 kg/m ³	<i>Equação 46</i>
CO_{2eqano}	Emissão anual por m ³ de vinhaça	lagoa 17,86 kg/m ³ ano; canal 1,58 kg/m ³ ano Total: 19,44 kg/m ³ ano	<i>Equação 47</i>

Com estes resultados, observa-se a significativa emissão de CO_{2eq} que pode ser produzida por ano pela vinhaça em forma de CH₄. Estendendo este resultado a uma usina média das características descritas na Tabela 2, a emissão seria de 18.700 tCO_{2eq}/ano, e para todo o setor sucroalcooleiro no Estado de São Paulo, seria de quase 3 milhões de tCO_{2eq}/ano, se os dados da literatura aqui utilizados puderem ser generalizados.

Emissão de CO₂ por consumo de combustíveis fósseis no Cenário 0:

Como foi calculado anteriormente no balanço energético, na fertirrigação são consumidos 30 L de diesel /ha ou 0,228 L/m³ de vinhaça. Tomando a emissão total no ciclo de vida do diesel, dada por Macedo *et al.* (2004), e a densidade do diesel, obtém-se a emissão causada pelos motores diesel (*Equação 48*).

$$\text{CO}_2\text{eq}_{\text{diesel/ano}} = C_{\text{diesel/V4}^\circ\text{Bx}} \times \rho_{\text{diesel}} \times \text{CO}_2\text{eq}_{\text{diesel}}$$

Equação 48

Onde:

Dados de entrada			
Símbolo	Significado	Valor	Fonte
$C_{\text{diesel/V4}^\circ\text{Bx}}$	Consumo de diesel por m ³ de vinhaça 4 ^º Bx por ano	0,228 L/m ³ ano	<i>Equação 3</i>
ρ_{diesel}	Densidade do diesel	840 kg/m ³	BEN, 2006
$\text{CO}_2\text{eq}_{\text{diesel}}$	Emissão de CO ₂ eq por kg de diesel	3,49 kgCO ₂ eq/kg _{diesel}	Macedo <i>et al.</i> , 2004
Resultados			
$\text{CO}_2\text{eq}_{\text{diesel/m}^3}$	Emissão de CO ₂ eq por m ³ de vinhaça proveniente do diesel	0,668 kgCO ₂ eq/m ³	<i>Equação 48</i>

Com o resultado obtido, calcula-se que uma usina média com consumo anual de 219 m³ de diesel para realizar a fertirrigação, emitiria 642 tCO₂eq, valor insignificante quando comparado à emissão obtida para as lagoas.

4.2.2. *Cenário 1: Concentração evaporativa*

Emissões de CH₄ em lagoas e canais no Cenário 1:

Neste cenário, o volume de vinhaça que chega até à lagoa é diminuído, já que parte do mesmo é encaminhado na usina para ser submetido a sua concentração e seu transporte por caminhão. Considera-se que a vinhaça concentrada e transportada em caminhão não sofre decomposição e, dessa forma, a redução de emissões de CH₄ é proporcional à porcentagem do volume que recebe tratamento. No modelo proposto, 71% do volume continuaria indo para a lagoa, assim esperar-se uma redução de 29% nas emissões produzidas por esta fonte. As emissões do canal permanecem idênticas que no Cenário de referência, pois o volume de vinhaça transportado por eles continua sendo o mesmo. Isto significa que, no Cenário 1, são emitidas 13,80 kgCO₂eq/m³ em lagoas e canais, ou 13.250 tCO₂eq/m³ano em uma usina média.

Emissão de CO₂ por consumo de combustíveis fósseis no Cenário 1:

No Cenário 1 ocorre uma redução do uso de diesel empregado no transporte da vinhaça, visto que com a concentração o volume a transportar é menor. Como foi calculado no balanço energético, para uma usina média no Cenário 0 são consumidos por ano 219 m³ de diesel, enquanto no Cenário 1 o consumo anual é de 126 m³ de diesel. Esta diferença de 93 m³ de

diesel/ano significa uma redução de 43%, passando de 0,668 kgCO₂eq/m³ para 0,386 kgCO₂eq/m³ de vinhaça.

Emissão de GEEs por consumo de eletricidade no Cenário 1:

Segundo os cálculos realizados no Capítulo 5 de balanço energético, é necessário reduzir 0,625 kWh_e/m³ a exportação para o SIN, sendo esta a energia produzida no sistema de cogeração da usina e consumida pelo concentrador. Considerando uma Intensidade de Carbono na Geração Elétrica Brasileira (ICGEB) de 82 kgCO₂eq/MWh³⁶, as emissões por conta desta eletricidade que deixaria de ser exportada - passando a ser suprida pelo SIN - são de 0,051 kgCO₂eq/m³ de vinhaça.

4.2.3. Cenário 2: Biodigestão anaeróbia com geração de eletricidade

Emissões de CH₄ em lagoas e canais no Cenário 2:

Neste cenário são considerados os dados levantados por Cortez *et al.* (1998), na Usina São Martinho, onde a vinhaça entra com 29 g/l de DQO e o efluente de saída possui 9 g/l, o que significa uma redução de 65% da matéria orgânica. Admite-se que, após a digestão anaeróbia no reator, a vinhaça biodigerida praticamente cessa de emitir CH₄, a não ser aquele que se encontra dissolvido na mesma, uma vez que o carbono orgânico passível de transformação é consumido durante a biodigestão.

A quantidade de CH₄ dissolvido e que está presente nas amostras de vinhaça tomadas por Paredes (2011) foi em média de 2,55 g CH₄/m³ de vinhaça ou 0,054 kgCO₂eq/m³. Estes valores são pouco significativos, a pesar da consideração de que todo o CH₄ dissolvido fosse emitido. Por outro lado, o vazamento do biodigestor possui pode possuir relevância, aplicando um fator de 5% da produção total de CH₄. Segundo foi determinado no balanço energético, a produção no biodigestor é de 3 Nm³ de CH₄ por cada m³ de vinhaça, e consequentemente a perda por vazamento é de 0,15 Nm³ de CH₄ ou 2,268 kgCO₂eq/m³ de vinhaça.

Emissão de CO₂ por consumo de combustíveis fósseis no Cenário 2:

Como foi visto no balanço energético, o consumo de diesel na distribuição da vinhaça no Cenário 2 seria idêntico ao produzido no cenário de referência, portanto, 0,668 kgCO₂eq/m³ de vinhaça.

³⁶ Dado referente a 2012 (BEN, 2013).

Emissão de GEEs evitada por produção de energia elétrica:

Utilizando o valor de produção de eletricidade calculada no balanço energético e a ICGEB de 82 kgCO₂eq/MWh (BEN, 2013), tem-se uma redução de emissões de 0,564 kgCO₂eq/m³ de vinhaça.

4.2.4. Cenário 3: Incineração com geração de eletricidade

Emissões de CH₄ em lagoas e canais no Cenário 3:

Neste cenário, as emissões em lagoas e canais são evitadas por ser eliminado completamente o volume da vinhaça. Assume-se que todo seu conteúdo em matéria orgânica é transformado em CO₂ através da combustão, desta forma seria eliminada praticamente a emissão de CH₄ quando comparada à do Cenário de referência. O CO₂ emitido na combustão da vinhaça não é contabilizado, já que, ao ser incinerada matéria orgânica fixada previamente pela cana de açúcar, o ciclo do carbono é fechado.

Emissão de CO₂ por consumo de combustíveis fósseis no Cenário 3:

Da mesma forma, a distribuição por caminhão seria desnecessária, evitando-se também a emissão proveniente do diesel. Conforme indicado anteriormente, a distribuição das cinzas resultantes da incineração é realizada junto à sulcação e à adubação, sendo esta uma operação agrícola independente do tratamento da vinhaça. Por outro lado, ao ser utilizado o gás natural como combustível suporte para a queima da vinhaça, devem ser contabilizadas suas emissões. Adotando o valor das emissões do IPCC (2006) de 64,2 tCO₂eq/TJ e aplicando o valor obtido no balanço energético para o consumo de gás natural, tem-se uma emissão de 2,85 kgCO₂eq/m³ de vinhaça.

Emissão de GEEs evitada por produção de energia elétrica no Cenário 3:

Utilizando o mesmo método do Cenário 2, pode-se calcular que, com a energia elétrica produzida no sistema de cogeração e exportada para o SIN, seria evitada a emissão de 0,923 kgCO₂eq/m³ de vinhaça.

4.2.5. Cenário 4: Biodigestão com concentração e uso veicular

Este cenário agrega a redução de emissões obtidas nos Cenários 1 e 2, incluindo também a substituição do diesel por CH₄ proveniente do biogás na frota da usina.

Emissões de CH₄ no Cenário 4:

Neste Cenário 4 tem-se as mesmas perdas fugitivas de CH₄ no biodigestor que no Cenário 2, de 2,268 kgCO₂eq/m³ de vinhaça.

Emissão de CO₂ evitado por produção de metano para uso veicular no Cenário 4:

A emissão proveniente do consumo de diesel é eliminada, consequência tanto da diminuição do volume distribuído, obtido pela concentração, quanto da substituição do diesel por biometano procedente do biogás. Se este biometano for utilizado como combustível veicular nas atividades de cultivo e de transporte da cana, obtém-se uma redução de 4,535 kgCO₂eq/m³ de vinhaça.

4.3. Emissões de NO_x e SO_x

Os óxidos de nitrogênio e enxofre (NO_x e SO_x) liberados nos processos de combustão nas caldeiras industriais, nas usinas termelétricas e nos motores de veículos, são considerados agentes da chuva ácida. Pela sua importância no rol das emissões antropogênicas no mundo, decidiu-se incorporar neste estudo as estimativas de NO_x e SO_x produzidas pelos equipamentos de combustão, tais como os motores a diesel e a biogás e como o incinerador de vinhaça, utilizadas nos respectivos cenários, complementando o cálculo das emissões de GEEs.

4.3.1. Cenário 0 de referência: Fertirrigação com vinhaça in natura

Para o cálculo da emissão de NO_x, aplicam-se os fatores para veículos com motor de ciclo diesel em 2009 (CETESB, 2013) e os valores definidos na Tabela 5, que descreve os sistemas de aplicação de vinhaça nas lavouras de cana-de-açúcar do Estado de São Paulo. No cenário de referência são utilizados caminhões semipesados, pesados e motores estacionários para bombear a vinhaça, sendo calculadas suas emissões de NO_x na Tabela 25.

A concentração de óxidos de enxofre no gás de escape é diretamente proporcional ao teor de enxofre presente no óleo diesel. A concentração de SO₂ pode ser calculada, com uma boa exatidão, pelo consumo de combustível e seu teor de enxofre. Durante a combustão, todo o enxofre contido no óleo diesel é oxidado. Quase tudo é emitido como SO₂, mas uma pequena fração (2 a 3%) é convertida em trióxido de enxofre (SO₃) no escapamento, o qual reage facilmente com a água para formar o ácido sulfúrico (H₂SO₄) (CAPANA, 2008).

Tabela 25. Cálculo das emissões de NO_x no Cenário 0 de referência.

Sistema de transporte e aplicação	Maquinaria	% de Volumen de vinhaça	Volumen de vinhaça	Distância média ou tempo de funcionamento	Distância total ou energia consumida	Fator de emissão de NO _x (g/km ou g/kWh)	Emissão de NO _x (t/ano)
Caminhão Semipesado aplicando diretamente	MB2318 com tanque de 15 m ³ ^a	5% ^a	48.000 ^c	7 km ^a	44.800 km ^c	5,23 g/km ^b	0,23 ^c
Caminhão Pesado com aspersão combinado com motobomba	Volvo rodotrem com dois tanques de 30 m ³ /cada ^a	24% ^a	230.400 ^c	12 km ^a	184.320 km ^c	5,14 g/km ^b	0,95 ^c
	Motobomba 120 kW			1.646 h ^c	197.486 kWh ^c	4,72 g/kWh ^b	0,93 ^c
Sistema de aspersão aplicando	Motobomba 120 kW em canal com montagem direta ou com rolão ^a	71% ^a	681.600 ^c	4.869 h ^c	584.229 kWh ^c	4,72 g/kWh ^b	2,76 ^c
TOTAL		100%	960.000 ^d		-		4,87 ^c

Fonte: a) Tabela 5; b) CETESB (2013); c) Calculado pelo autor; d) Tabela 2.

Atualmente, os tipos de óleo diesel comercializados no território nacional são diferenciados basicamente pelos teores máximos de enxofre: S50 (50 ppm de enxofre) e S500 (500 ppm de enxofre). Nas áreas rurais, onde se encontram as usinas, é comercializado o S500. Deste modo, para o cálculo das emissões de SO_x, considera-se que 500 mg de enxofre são emitidos como consequência do consumo de um kg de diesel.

$$SO_{2\text{diesel}/m^3} = C_{\text{diesel}/V4^{\circ}Bx} \times \rho_{\text{diesel}} \times S_{\text{diesel}} \times \frac{M_S}{M_{SO_2}} \quad \text{Equação 49}$$

Onde:

Dados de entrada			
Símbolo	Significado	Valor	Fonte
$C_{\text{diesel}/V4^{\circ}Bx}$	Consumo de diesel por m ³ de vinhaça 4 ^o Bx por ano	0,228 L/m ³ ano	Equação 3
ρ_{diesel}	Densidade do diesel	840 kg/m ³	BEN, 2006
S_{diesel}	Quantidade de enxofre por kg de diesel	500 mg/kg _{diesel}	
M_S	Massa molecular do enxofre	32 g/M	
M_{SO_2}	Massa molecular do SO ₂	64 g/M	
Resultados			
$SO_{2\text{diesel}/m^3}$	Emissão de SO ₂ por m ³ de vinhaça proveniente do diesel	191,52 mgSO ₂ /m ³	Equação 49

Na Tabela 26, aparecem resumidas as emissões do Cenário 0 por cada m³ de vinhaça tratada e as produzidas anualmente pela usina de referência, diferenciando a fonte de emissão e, posteriormente, agregando-as para ser calculado o balanço resultante.

Tabela 26. Emissões gasosas no Cenário 0

Fonte	CO ₂ eq		NO _x		SO _x	
	Por m ³ de vinhaça (kg)	Anual (t)	Por m ³ de vinhaça (g)	Anual (t)	Por m ³ de vinhaça (g)	Anual (t)
Lagoas e canais	19,44	18.700,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Motores diesel	0,67	642,00	5,10	4,87	0,19	0,18
TOTAL	20,11	19.342,00	5,10	4,87	0,19	0,18

Fonte: Autor.

4.3.2. Cenário 1: Concentração evaporativa

De forma similar ao cálculo da emissão de NO_x que foi realizado no cenário de referência, aplicam-se os fatores para veículos com motor de ciclo diesel em 2009 (CETESB, 2013b) e os valores definidos na Tabela 17 que descrevem a aplicação de vinhaça no Cenário 1. Neste cenário são utilizados caminhões semipesados que aplicam a vinhaça concentrada 20°Bx e motores estacionários para bombear a vinhaça in natura. O cálculo das emissões de NO_x destes equipamentos é mostrado na Tabela 27.

Tabela 27. Cálculo das emissões de NO_x no Cenário 1.

Sistema de transporte e aplicação	Maquinaria	% de Volume de vinhaça	Volume de vinhaça	Distância média ou tempo de funcionamento	Distância total ou energia consumida	Fator de emissão de NO _x (g/km ou g/kWh)	Emissão de NO _x (t/ano)
Caminhão Semipesado aplicando diretamente	MB2318 com tanque de 15 m ³	29%	52.400 (V _{20°Bx})	11,19 km	78.181 km	5,23 g/km	0,41
Sistema de aspersão	Motobomba 120 kW em canal com montagem direta ou com rolão	71%	681.600 (V _{4°Bx})	4.869 h	584.229 kWh	4,72 g/kWh	2,76
TOTAL		100%	-	-	-		3,17

Fonte: Autor.

Com respeito às emissões de SO_x, utilizando a *Equação 49* e o consumo de diesel deste cenário, tem-se uma emissão de 105,8 kgSO₂/ano ou 110,26 mgSO₂/m³ de vinhaça.

Além destas emissões, deve ser incrementado o valor de 600 MWh_e correspondente ao consumo de energia elétrica proveniente da rede. Utilizando os dados da Tabela 28, chega-se à emissão de 54 kgNO_x/ano e de 230 kgSO_x/ano por conta do consumo elétrico no concentrador.

Tabela 28. Emissão de NO_x e SO_x da geração elétrica do Brasil.

Poluente	Emissão total (t)	Emissão específica (g/MWh)*
NO _x	17.823	89,29
SO _x	76.481	383,17

Fonte de dados: Eletrobrás (2012), ano base 2011.

*Cálculo utilizando a geração líquida no Brasil de 2011 (199.601.937 MWh, Eletrobrás, 2012)

Na Tabela 29, aparecem resumidas as emissões do Cenário 1, da mesma forma como foi feito no Cenário 0.

Tabela 29. Emissões gasosas no Cenário 1

Fonte	CO ₂ eq		NO _x		SO _x	
	Por m ³ de vinhaça (kg)	Anual (t)	Por m ³ de vinhaça (kg)	Anual (t)	Por m ³ de vinhaça (kg)	Anual (t)
Lagoas e canais	13,80	13.250	0,00	0,00	0,00	0,00
Motores diesel	0,39	370,56	3,30	3,17	0,11	0,11
Eletricidade	0,05	48,96	0,06	0,05	0,02	0,23
TOTAL	14,24	13.669,52	3,36	3,18	0,13	0,34

Fonte: Autor.

4.3.3. Cenário 2: Biodigestão anaeróbia com geração de eletricidade

Devido ao sistema de distribuição da vinhaça ser o mesmo do cenário de referência, tem-se a mesma emissão de NO_x e SO_x nos motores diesel. Esta emissão precisa ser incrementada com a emissão do motogerador a biogás, que é calculada a seguir. Utilizando um fator de emissão de NO_x para motogeradores a biogás, pode ser calculada a emissão anual deste poluente (*Equação 50*).

$$NO_{x/ano} = Q_{biogás/ano} \times F_{NOx} \quad \text{Equação 50}$$

Onde:

Dados de entrada			
Símbolo	Significado	Valor	Fonte
Q _{biogás/ano}	Energia térmica produzida com biogás por ano	97 TJ/ano	Equação 20
F _{NOx}	Fator de emissão de NOx do motogerador a biogás	232,16 kgNOx/TJ	CEC, 2009
Resultados			
NO _{x/ano}	Emissão de NO ₂ por ano no motogerador a biogás	22,52 tNO _x /ano	Equação 50

Portanto, a emissão do motogerador é mais significativa que a produzida na frota de 4,87 tNO_x/ano.

No que diz respeito ao SO_x, supõe-se que todo o enxofre presente no biogás se oxida no motor³⁷, pois esta reação se produz em taxas elevadas com este tipo de equipamento. Sabendo que o biogás contém 75 ppm de H₂S³⁸ na entrada (saída do dessulfurificador), pode-se calcular a emissão de SO_x.

$$SO_{x/ano} = V_{biogás/ano} \times (1 - V_{\%vaz}) \times [H_2S] \times \frac{M_{SO_2}}{M_{H_2S}} \quad \text{Equação 51}$$

Onde:

Dados de entrada			
Símbolo	Significado	Valor	Fonte
V _{biogás/ano}	Volume de biogás produzido por ano	5.745.000 Nm ³ /ano	<i>Equação 19</i>
V _{%vaz}	Porcentagem de volume de biogás vazado	5%	PAQUES, 2014
[H ₂ S]	Concentração de H ₂ S no biogás	113 mg/m ³ ³⁹	
M _{H2S}	Massa molecular do H ₂ S	34,08 g/M	
M _{SO2}	Massa molecular do SO ₂	64,06 g/M	
Resultados			
SO _{2/ano}	Emissão de SO ₂ por ano no motogerador a biogás	1,6 tSO ₂ /ano	<i>Equação 51</i>

Emissão de NO_x e SO_x evitada por produção de energia elétrica no Cenário 2:

Utilizando os dados da Tabela 28 e o valor da produção de eletricidade com o motogerador a biogás, podem ser calculadas as emissões evitadas de NO_x e SO_x. A Tabela 30 resume os resultados para o Cenário 2.

Tabela 30. Emissões gasosas no Cenário 2

Fonte	CO ₂ eq		NO _x		SO _x	
	Por m ³ de vinhaça (kg)	Anual (t)	Por m ³ de vinhaça (g)	Anual (t)	Por m ³ de vinhaça (g)	Anual (t)
Biodigestor	2,27	2.177,28	0,00	0,00	0,00	0,00
Motores diesel	0,67	642,00	5,10	4,87	0,11	0,12
Motogerador	0,00	0,00	23,46	22,52	1,67	1,60
Eletricidade	-0,56	-541,44	-0,61	-0,59	-2,63	-2,53
TOTAL	2,43	2.277,84	27,95	26,80	-0,85	-0,81

Fonte: Autor.

4.3.4. Cenário 3: Incineração com geração de eletricidade

No referente às emissões de NO_x, o fabricante de queimadores garante que o nível das emissões de NO_x pode ser reduzido até 200 mg/Nm³ nos gases de exaustão, com uma adequada operação da caldeira (SAACKE, 2014). Assim, deve ser estimada a vazão total de

³⁷ No motor pode se dar a seguinte reação de oxidação: 2H₂S + 3O₂ = 2SO₂ + 2H₂O

³⁸ Valor da saída de H₂S do dessulfurizador (PAQUES, 2014).

³⁹ 75 ppm de H₂S é equivalente a 113 mgH₂S/m³ de biogás.

gases produzidos pela queima da vinhaça concentrada na caldeira. Este cálculo, detalhado no Anexo A, é baseado na composição da vinhaça concentrada e do gás natural.

Considerando o volume total de gases de exaustão e a proporção de NO_x dada pelo fabricante, pode-se estimar a emissão deste poluente. Os resultados dos cálculos do Anexo A aparecem na Tabela 31. Para o cálculo da emissão do SO_x, considera-se que todo o enxofre presente na vinhaça é oxidado durante a combustão.

Tabela 31. Emissão de NO_x e SO_x do incinerador de vinhaça.

Poluente	Emissão sem tratamento por m ³ vinhaça (g)	Emissão com tratamento por m ³ vinhaça (g)	Emissão específica sem tratamento (g/MWh)*	Emissão específica com tratamento (g/MWh)*	Emissão específica termoeletrica no Brasil (g/MWh)*
NO _x	42,94	2,15	3.816,67	190,83	89,29
SO ₂	1.035,84	51,75	92.075	4.603,75	383,17

Fonte de dados: Autor. *Cálculo utilizando 960.000 m³ de vinhaça/ano

A Tabela 31 mostra os valores de emissão com e sem tratamento dos gases da combustão da vinhaça. Sistemas como a dessulfurização por via úmida, que neutralizam o SO_x por meio da injeção de reagentes básicos como magnésio, amônia ou calcários, e sistemas DeNO_x tipo SCR-*Selective Catalyst Reduction*, são altamente eficientes abatendo mais do 95% das emissões. Neste trabalho, contempla-se a implementação de um sistema de dessulfurização do gás de exaustão. Apesar da instalação da limpeza de gases, as emissões continuam sendo elevadas devido, fundamentalmente, à vinhaça possuir grande quantidade de enxofre e nitrogênio. Ainda assim, existem condições técnicas para o cumprimento da Resolução CONAMA 382/06 onde foram estabelecidos limites de emissão para fontes fixas (CONAMA, 2006).

Emissão de NO_x e SO_x evitada por produção de energia elétrica no Cenário 3:

Para calcular as emissões evitadas de NO_x e SO_x pela geração de eletricidade, são utilizados os dados da Tabela 28 os da produção de eletricidade com o sistema de cogeração alimentado com vinhaça concentrada e com gás natural. O resumo dos resultados aparece na Tabela 32.

Tabela 32. Emissões gasosas no Cenário 3.

Fonte	CO ₂ eq		NO _x		SO _x	
	Por m ³ de vinhaça (kg)	Anual (t)	Por m ³ de vinhaça (g)	Anual (t)	Por m ³ de vinhaça (g)	Anual (t)
Incinerador	2,85	2.736,00	42,94	41,22	51,75	49,68
Eletricidade	-0,92	-883,20	-1,00	-0,96	-4,31	-4,14
TOTAL	1,93	1852,80	41,94	40,26	47,44	45,54

Fonte: Autor.

4.3.5. Cenário 4: Biodigestão com concentração e uso veicular

Igualmente ao que foi feito anteriormente para o CO₂, para o cálculo das emissões de NO_x e SO_x, considerado que uma parte da frota da usina com motores diesel será transformada para uso de gás. Portanto, as emissões do diesel serão em parte evitadas, mas deverão ser contabilizadas as emissões dos motores que funcionam com biometano.

Quando se considera o ciclo de vida completo dos combustíveis, a redução de emissão de NO_x chega a 40% com a introdução de motores GNV, segundo um estudo da *Argonne National Labs* (2000). Este último estudo citado comparava diesel com gás natural, em consequência o benefício utilizando biogás pode ser ainda maior por ser um combustível produzido na própria usina, evitando a necessidade de seu transporte. Baseado nesta porcentagem de redução e utilizando a produção de diesel equivalente obtida com biometano, calcula-se a emissão de NO_x do Cenário 4.

Para estimar a emissão de SO_x, considera-se que, por um lado, se evita a queima do enxofre do diesel. Por outro lado, será emitido o enxofre remanescente na forma de H₂S contido no biogás depois da dessulfurização. Com os valores da quantidade de enxofre, presente no diesel e no biogás, e supondo que todo o enxofre destes combustíveis se oxida no motor, pode ser calculada a emissão de SO_x do Cenário 4. Os resultados deste cálculo se encontram resumidos na Tabela 33.

Tabela 33. Emissões gasosas no Cenário 4.

Fonte	CO ₂ eq		NO _x		SO _x	
	Por m ³ de vinhaça (kg)	Anual (t)	Por m ³ de vinhaça (g)	Anual (t)	Por m ³ de vinhaça (g)	Anual (t)
Biodigestor	2,27	2.177,28	0,00	0,00	0,00	0,00
Motores diesel	-4,54	-4.353,60	-38,92	-37,36	1,30	1,25
Motores biogás	0,00	0,00	23,35	22,42	1,67	1,60
Total	-2,267	-2176,32	-15,57	-14,94	2,97	2,85

Fonte: Autor.

4.4. Resultados da avaliação de impacto ambiental dos cenários considerados

4.4.1. Solo e água

A seguir, são resumidos os principais impactos sobre o solo e sobre a água encontrados em cada cenário realizando uma comparação com o Cenário 0 de referência.

Tabela 34. Potenciais impactos dos Cenários sobre o solo e a água.

Impacto	1. Concentração	2. Biodigestão + Eletricidade	3. Incineração + Eletricidade	Biodigestão + Concentração + Uso Veicular
Salinização do solo e água (nitratos e potássio)	Facilita a dispersão dos sais.	Permanece o problema do transporte dos sais a longas distâncias.	Elimina totalmente o problema da dispersão dos sais.	Facilita a dispersão dos sais.
Aumento da matéria orgânica no solo	Semelhante aumento da matéria orgânica no solo.	Menor quantidade de matéria orgânica incorporada ao solo.	Elimina totalmente o aumento, por incinerar a matéria orgânica.	Menor quantidade de matéria orgânica incorporada ao solo.
Alteração do pH do solo.	Igual à fertirrigação <i>in natura</i> , existe uma redução inicial do pH e posterior elevação.	Não existe uma redução inicial do pH.	Não existe nenhuma alteração no pH.	Não existe uma redução inicial do pH.
Redução de uso de fertilizantes de origem mineral.	Melhora da eficiência da fertirrigação por evitar vazamentos em lagoas e canais.	Melhora das características fertilizantes, pelo nitrogênio (NH^{+4}) estar mais disponível à planta.	Melhora da eficiência da fertirrigação por evitar vazamentos em lagoas e canais.	Melhora da eficiência da fertirrigação e das características do fertilizante. (Soma de vantagens Cenário 1 e 2)
Alteração da população microbiana.	Semelhante à fertirrigação <i>in natura</i> , favorecendo o desenvolvimento.	Evita a dispersão de antibióticos ativos no meio, por ser incompatível com a biodigestão.	Evita a dispersão de antibióticos no meio.	Evita a dispersão de antibióticos ativos no meio por ser incompatível com a biodigestão.
Compactação do solo	Possível aumento da compactação do solo nas áreas com aplicação direta.	Igual ao cenário de referência.	Evita totalmente o trânsito para fertirrigação dentro do canal.	Possível aumento da compactação do solo nas áreas com aplicação direta.
Movimento de terras	Menor ao cenário de referência.	Igual ao cenário de referência.	Evita a construção de lagoas e canais.	Menor ao cenário de referência.
Aproveitamento da água.	Possibilita parcialmente o uso da água da vinhaça.	Não possibilita uso da água da vinhaça.	Possibilita utilizar quase a totalidade da água da vinhaça.	Possibilita parcialmente o uso da água da vinhaça.

Fonte: Autor a partir dos resultados obtidos durante a revisão bibliográfica.

Como pode ser observado na Tabela 34, a incineração é o sistema que mais reduz os impactos negativos sobre o solo e a água, por eliminar totalmente o volume de vinhaça e os impactos atrelados à sua distribuição. Também, este sistema permite uma maior quantidade de uso da água na usina proveniente da vinhaça. Este sistema permite, também, maior quantidade de água proveniente da vinhaça para reúso na usina. Por outro lado, esta água pode ser fundamental em circunstâncias de seca como irrigação de salvamento.

Um cenário interessante é o que combina a biodigestão com a concentração, por reunir as vantagens do tratamento biológico do efluente e com a redução do volume e a recuperação parcial da água a partir do processo de concentração.

4.4.2. Emissões de GEEs, NO_x e SO_x

Os resultados obtidos nos balanços das emissões atmosféricas nos diferentes cenários estão resumidos na Tabela 35.

Tabela 35. Emissões atmosféricas associadas aos Cenários.

Cenário	CO ₂ eq		NO _x		SO _x	
	Por m ³ de vinhaça (kg)	Anual (t)	Por m ³ de vinhaça (g)	Anual (t)	Por m ³ de vinhaça (g)	Anual (t)
0	20,11	19.342,00	5,10	4,87	0,19	0,18
1	14,24	13.669,52	3,30	3,18	0,13	0,34
2	2,43	2.277,84	27,95	26,80	-0,85	-0,81
3	1,93	1852,80	41,94	40,26	47,44	45,54
4	-2,267	-2176,32	-15,57	-14,94	2,97	2,85

Fonte: Autor.

A emissão de GEEs mostrada na Tabela 35 é representada na Figura 34.

Figura 34. Balanço de emissões de GEEs dos cenários.

Fonte: autor.

Observa-se que o Cenário 4 é o mais vantajoso em termos de emissões calculadas de GEEs, pois este chega a ter um balanço negativo de emissões com respeito ao cenário de referência. Nos cenários com produção de eletricidade, a biodigestão e incineração tem um desempenho semelhante na redução de emissões de GEEs, sendo esta muito significativa. No Cenário 2, a redução de emissões é proporcional à porcentagem de volume de vinhaça concentrado.

A Figura 35 mostra as emissões produzidas e evitadas em cada cenário diferenciando sua fonte.

Figura 35. Emissões por fonte nos diferentes cenários.
Fonte: Autor.

No Cenário 1 destacam as emissões produzidas em lagoas de armazenamento e canais. Este resultado pode apresentar ampla variação, pois as emissões de CH₄ em lagoas e canais dependem em grande parte das dimensões, da geometria e do revestimento destas estruturas (Paredes, 2011), assim como do teor de matéria orgânica da vinhaça que varia ao longo da safra. Também, este resultado pode ser influenciado pela porcentagem de vinhaça que é transportada em caminhão.

A implantação de concentradores no Cenário 1 não produz uma redução importante do GEEs, visto que é concentrado somente o volume transportado em caminhões. A redução no consumo de diesel é significativa, porém, com relação às emissões, continua ocorrendo a produção de CH₄ em lagoas e canais.

No Cenário 3, a remoção da fração da matéria orgânica que pode ser degradada biologicamente, reduz expressivamente as emissões de CH₄, mostrando a importância da implementação da biodigestão como método para a redução de GEEs no setor

sucroalcooleiro. Por outro lado, a eletricidade produzida a partir do biogás capturado não tem um impacto importante na mitigação, devido à magnitude de seu potencial de geração e ao fato de que o 76,9% da matriz no Brasil é hidroelétrica (BEN, 2013), fazendo com que a ICGEB seja de apenas 82 kgCO₂eq/MWh (BEN, 2013).

O Cenário 3 obteve, também, uma importante mitigação de emissões com a incineração, uma vez que todo o carbono orgânico presente na vinhaça é convertido em CO₂ mediante combustão, fechando o ciclo do carbono fixado previamente pela cana. A energia elétrica produzida pode chegar a ser o dobro da produzida no Cenário 2, entretanto, o Cenário 3 é o que apresenta mais consumo de combustíveis de origem fóssil, devido ao uso de gás natural na combustão, afetando o balanço energético do etanol.

O Cenário 4 é o de menor emissão e uso de combustíveis fósseis, o que melhora o balanço energético do etanol. A biodigestão retira a matéria orgânica, evitando as emissões do efluente destinado a fertirrigação. A concentração diminui o consumo de combustível e evita parcialmente a distribuição por canais. Contabilizando as emissões de GEEs, o uso do biogás como substituto do diesel é muito mais conveniente que seu emprego em geração de eletricidade, devido ao caráter pouco intensivo em carbono da matriz elétrica brasileira. A emissão de NO_x e SO_x da Tabela 35 é representada na Figura 36.

Figura 36. Balanço de emissões de NO_x e SO_x dos Cenários.
Fonte: autor.

As emissões de óxidos de nitrogênio e de enxofre são mais elevadas na incineração que nos demais cenários, existindo um significativo incremento delas com respeito ao cenário de referência. Estas emissões representadas na Figura 36, incluem um lavador de gases para o SO_x mas não um sistema DeNO_x . Com a instalação do Cenário 2, de geração de eletricidade por meio de motor a biogás, o incremento de emissões também é considerável. O cenário com maior redução de emissões de NO_x é o Cenário 4, onde se produz um balanço negativo dessas emissões.

Estes resultados são discutidos com maior detalhe no Capítulo 6. Ainda, no Capítulo 5, são utilizados os valores de redução de emissões de GEEs para avaliar o impacto que a valorização econômica dos serviços ambientais poderia ter sobre a viabilização econômica dos distintos tratamentos.

CAPÍTULO 5. AVALIAÇÃO ECONÔMICA

Neste capítulo será avaliada a viabilidade econômica dos distintos cenários, tendo em vista o custo da fertirrigação, os custos de instalação, de operação e manutenção das diferentes tecnologias alternativas, o preço de venda da energia elétrica, assim como do diesel e do gás natural. Desta forma, pretende-se responder se o processamento da vinhaça com aproveitamento energético é um investimento atrativo nas condições atuais. No caso de resposta negativa, será feita uma análise incluindo a mitigação de impactos ambientais tais como o consumo de água e as emissões de GEEs, com o intuito de observar como afetaria a bonificação desta redução na viabilidade econômica dos cenários. Finalmente, em cada caso será determinado o preço que deveria ter a energia e qual seria o pagamento pela redução de impactos que fariam os investimentos serem interessantes para o setor.

Os indicadores calculados para a avaliação econômica de cada cenário são o Valor Presente Líquido (VPL), o *PayBack* descontado e a Taxa Interna de Retorno (TIR). Para o cálculo destes indicadores é necessária a elaboração do fluxo de caixa⁴⁰ das tecnologias propostas no estudo. O objetivo principal dos indicadores econômicos, resumidos a seguir, é auxiliar na decisão de alocação de recursos financeiros a uma determinada tecnologia.

a) **Valor Presente Líquido (VPL):** O valor presente líquido relaciona o custo inicial de investimento (FC_0) de um projeto com seus fluxos de caixa futuros (FC_j), sendo esses últimos descontados por uma taxa (taxa de juros). Quando o $VPL > 0$ é um indicativo de que o investimento no projeto poderá dar rentabilidade ao investidor, sendo a quantia do lucro o próprio VPL em valores absolutos.

$$VPL = \sum_{j=1}^n \frac{FC_j}{(1-i)^j} - FC_0 \quad \text{Equação 52}$$

Onde:

Dados de entrada		
Símbolo	Significado	Valor
FC_0	Custo inicial de investimento	R\$
FC_j	Entradas (receitas) e saídas (custos) previsto para cada período futuro	R\$
i	Taxa de juros ou taxa de desconto	%
j	Período de tempo	anos
n	Vida útil do projeto	anos
Resultado		
VPL	Valor Presente Líquido	R\$

⁴⁰ O fluxo de caixa resume as entradas (receitas) e saídas (custos) de capital ao longo da vida útil de um projeto.

b) **Payback descontado**: É o período de tempo necessário para recuperar o investimento inicial de um projeto, a partir do fluxo de caixa descontado por uma taxa.

c) **Taxa Interna de Retorno (TIR)**: Taxa de desconto (juros) que torna o Valor Presente Líquido do investimento igual a zero.

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

Para o cálculo dos indicadores foi utilizada uma taxa de desconto de 15%, considerando que a Taxa SELIC⁴¹ em 12/2014 tinha um valor de 11,65% ao ano⁴², possibilitando, assim, uma margem de mais de 3% para as flutuações futuras desta taxa, para a porcentagem de lucro do banco prestamista e para a inflação contra a rentabilidade do projeto.

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

O levantamento do preço dos equipamentos, assim como seus custos de operação e manutenção, foi realizado mediante uma revisão bibliográfica e junto os seguintes fabricantes e fornecedores: Citrotec®⁴³, Dedini S/A Indústrias de Base⁴⁴, L&M Engenharia⁴⁵, Sotreq-Caterpillar⁴⁶, Paques Environmental Technology Shanghai Co. Ltd⁴⁷, DMT⁴⁸, Saacke⁴⁹ e Brasmetano Ind. Com. Ltda.⁵⁰.

5.1. Cenário 0 de referência: Fertirrigação com vinhaça *in natura*

Neste cenário de referência, não são considerados os custos de instalação dado que a fertirrigação já se encontra amplamente implantada atualmente nas usinas. No caso da construção de uma nova usina, este custo de instalação deveria ser incluído para poder

⁴¹ A Taxa referencial do Sistema Especial de Liquidação e de Custódia (SELIC) é também conhecida como a taxa básica de juros da economia brasileira. É a menor taxa de juros do país e serve de referência nos empréstimos feitos entre os bancos e também nas aplicações realizadas por estas instituições bancárias em títulos públicos federais.

⁴² Banco Central do Brasil. Histórico das taxas de juros. Disponível em <http://www.bcb.gov.br/Pec/Copom/Port/taxaSelic.asp>; acessado em 06/12/2014.

⁴³ citrotec.com.br/

⁴⁴ codistil.com.br/

⁴⁵ lmengenharia.com.br/

⁴⁶ sotreq.com.br/

⁴⁷ br.paques.nl/

⁴⁸ dirkse-milieutechniek.com

⁴⁹ saacke.com.br/

⁵⁰ brasmetano.com.br/

comparar com os demais cenários. Portanto, neste caso, são contabilizados exclusivamente os custos de operação e manutenção.

Os custos da fertirrigação são enormemente variáveis, dependendo da localização da usina e lavoura, do volume de produção, assim como de fatores como o relevo e as técnicas utilizadas no transporte e na aplicação. No presente estudo é utilizado um custo para a fertirrigação de R\$4/m³ de vinhaça (JORNALCANA, 2007), sendo este considerado um valor médio no setor. Multiplicando este custo médio pela produção anual de vinhaça, obtém-se o custo da fertirrigação para a usina modelo (*Equação 53*):

$$\text{Cost}_{\text{fertirrigação/ano}} = V_{4^{\circ}\text{Bx/ano}} \times P_{\text{fertirrigação}} \quad \text{Equação 53}$$

Onde:

Dados de entrada			
Símbolo	Significado	Valor	Fonte
$V_{4^{\circ}\text{Bx/ano}}$	Volume de vinhaça 4°Bx produzido por ano	960.000 m ³ /ano	Tabela 2
$P_{\text{fertirrigação}}$	Custo unitário de fertirrigação	R\$4/m ³	(JORNALCANA, 2007)
Resultados			
$\text{Cost}_{\text{fertirrigação}}$	Custo anual da fertirrigação	R\$3.840.000/ano	<i>Equação 53</i>

Observa-se que, para uma usina de porte médio, o uso da vinhaça na fertirrigação pode custar aproximadamente R\$4.000.000/ano, podendo este valor ser superior em condições adversas de relevo, quando há necessidade da diminuição na dose por hectare em função da saturação por potássio ou se as lavouras se encontram fora do raio econômico da dispersão. Por esta razão, é necessário dar alternativas para o setor no tratamento da vinhaça.

5.2. Cenário 1: Concentração evaporativa

Foram levantados, a partir de consulta aos fabricantes os custos relativos à instalação, à operação e à manutenção dos concentradores evaporativos encontrados no mercado brasileiro. Com estas informações, são calculados os custos de um concentrador de 40 t/h de capacidade de evaporação (Tabela 36). Na operação, não é contabilizado o uso de vapor, uma vez que o calor residual da destilação é aproveitado, sendo isto determinante para a viabilidade econômica do empreendimento. Na operação destes condensadores é recomendada a limpeza semanal circulando 35 m³ de dissolução de soda cáustica de 0,5%, incluindo o custo do consumo deste reagente na operação. Também, é recomendada a limpeza com hidrojateamento na entressafra.

Tabela 36. Custos no Cenário 1.

	Preço unitário	Unidades	Total
Instalação			
Concentrador	R\$80.000/ (t/h)	40 t/h	R\$3.200.000
Operação			
Energia elétrica	R\$202/MWh	600 MWhe/ano	R\$ 121.470/ano
Energia térmica	R\$ 0	0	R\$ 0/ano
Soda Caustica	R\$ 800/t	2 t/semana	R\$ 55.000/ano
Manutenção			
Hidrojateamento	R\$ 50.000	1/ano	R\$ 50.000/ano
Custo anual O&M			R\$ 226.470/ano

Fonte: Autor baseado em dados dos fabricantes de equipamentos.

Para suprir o consumo de energia elétrica do concentrador, considera-se o fornecimento pelo sistema de cogeração da usina, deixando de ser exportada esta energia para a rede. Como preço da eletricidade vendida pela usina é tomado o valor de R\$202,45/MWh, preço médio para as térmicas de bagaço de cana no 20º Leilão de Energia Nova⁵¹.

Considera-se que a diminuição do custo em fertirrigação é proporcional à redução de volume conseguida com a concentração. Dessa forma, no Cenário 1 o volume evaporado é de 226.000 m³ e visto que o custo médio da fertirrigação é aproximadamente de R\$4/m³, obtém-se uma economia de R\$904.000/ano. Introduzindo esta diminuição do volume de vinhaça como ganho na operação e a correspondente redução no custo de referência para seu tratamento, o investimento neste Cenário 1 apresenta os valores e indicadores financeiros apresentados na Tabela 37.

Tabela 37. Indicadores financeiros do investimento no Cenário 1

Investimento inicial	R\$3.200.000 ^a
Custo anual O&M	R\$226.470/ano ^a
Diminuição do custo em fertirrigação	R\$904.000/ano ^b
Vida útil	18 anos ^c
Taxa de desconto	15% ^c
VPL	R\$951.880 ^b
Payback Descontado	9 anos ^b
TIR	21% ^b

Fonte: a) Tabela 36; b) Calculado pelo autor; c) Valores preestabelecidos no estudo.

⁵¹ Realizado no 28/11/2014 (INSTITUTO ACENDE BRASIL, 2014)

Nas condições atuais, observa-se a atratividade deste investimento, o que explica a expansão na implantação desta tecnologia acontecida no setor a partir de 2009. Ressalta-se a condição de que a energia térmica para a evaporação deve ser fornecida sem consumo adicional de vapor, aproveitando o calor residual das colunas de destilação, tal e como foi comprovado no estudo realizado por Silva (2012).

5.3. Cenário 2: Biodigestão anaeróbia com geração de eletricidade

Para estudar a viabilidade econômica da instalação do Cenário 2, foram levantados os custos relativos a um sistema de reatores IC, por ser esta a mais eficiente tecnologia disponível no mercado, com respeito à remoção de matéria orgânica e à produção de biogás, tal como foi visto no Capítulo 2. Também foram levantados os custos associados a um lavador biológico de gás, sendo este tipo de sistema de limpeza recomendado para a quantidade de H₂S presente no biogás, para a escala de produção manejada e para o tipo de uso final (FNR, 2010). Quanto à geração elétrica, esta é realizada através de motogeradores de combustão interna, devido a sua economia frente a outras tecnologias tais como as microturbinas (COELHO *et al*, 2006, e SALOMON, 2007). Assim, para um sistema de biodigestão com capacidade de tratar 4.000 m³/dia de vinhaça com 29 kg DQO/m³ e que possua uma produção de biogás de 1.000 m³/h, os custos de biodigestão, de limpeza do biogás e de geração elétrica a partir do mesmo são os apresentados na Tabela 38.

Tabela 38. Custos no Cenário 2.

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

Fonte: Autor baseado em dados dos fabricantes de equipamentos.

Utilizando os valores da Tabela 38 e a quantidade de produção de energia elétrica calculada anteriormente, é aproximado o custo de geração do MWh_e neste cenário. Este custo de produção é determinado procurando o valor que faça nulo o VPL do investimento.

Tabela 39. Indicadores financeiros do investimento no Cenário 2

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

Fonte: a) Tabela 38; b) Calculado pelo autor; c) Valores preestabelecidos no estudo; d) Equação 21.

Observa-se um alto custo de produção de energia elétrica no Cenário 2. Isto se deve aos valores conservadores de produção de biogás baseados na experiência do biodigestor da usina São Martinho. Na Tabela 40, calcula-se este preço de produção assumindo valores mais otimistas dados pelos fabricantes de equipamentos, aumentando a proporção de metano no biogás, o rendimento do gerador e a produção de biogás por cada m³ de vinhaça.

Tabela 40. Custo de produção da eletricidade gerada com biogás de vinhaça.

	Conservador	Otimista
% metano no biogás	50 ^a	65 ^c
Rendimento do motogerador	0,29 ^b	0,35 ^b
m³ biogás /m³ vinhaça	6 ^a	9 ^c
Eletricidade produzida/m³ vinhaça	6,9 kWh _e /m ³ ^d	20,3 kWh _e /m ³ ^d
Potência instalada	1,3 MW ^e	3,36 MW ^d
Eletricidade vendida	6,6 GWh _e /ano ^f	19,5 GWh _e /ano ^d
Investimento inicial*	R\$16.690.000 ^g	R\$ 20.833.802 ^g
Custo anual O&M*	R\$803.136/ano ^g	R\$1.284.480/ano ^g
Custo de produção do MWh	R\$540/MWh _e ^d	R\$240/MWh _e ^d

* No caso do cenário otimista, o investimento inicial e o custo de O&M são incrementados devido à maior potência instalada.

Fonte: a) Tabela 19; b) Valores preestabelecidos no estudo; c) Tabela 18; d) Calculado pelo autor; e) Equação 22; f) Equação 21; g) Tabela 38;

Com este exercício, pode-se ver a importância da melhoria da eficiência do processo de biodigestão na produção de biogás. Ainda assim, em um cenário otimista o preço da energia elétrica gerada com biogás de vinhaça é pouco competitivo se comparado com o preço indicado anteriormente de R\$202,45/MWh para as térmicas de bagaço.

Até este ponto da análise, não foi contabilizada economicamente a redução de emissões de GEEs que a implantação da biodigestão produz, uma vez que atualmente o preço do *Certificate Emission Reduction* (CER) é praticamente nulo⁵². A seguir, realiza-se o exercício de calcular os preços que deveriam ter o MWh_e e o CER, para que a implantação desta tecnologia fosse economicamente atrativa, com um valor mínimo da TIR = 21%, pois foi esta a taxa encontrada no Cenário 1.

Na Figura 37 pode ser observada a relação que existe entre o preço do MWh_e e da tCO₂eq evitada, para obter um investimento com uma TIR = 21%. Esta função indica os valores que devem adquirir as duas variáveis para manter atrativa a geração de eletricidade com biogás de vinhaça, desde o ponto de vista econômico.

Figura 37. Relação entre o preço da eletricidade e do CER para que o Cenário 2 tenha uma TIR = 21%. Fonte: Autor.

Na Figura 37, foram tomados como exemplo dois pontos que fazem com que a TIR do investimento seja igual a 21%. No ponto número 1, a eletricidade teria um preço de R\$240/MWh, sendo necessário que o CER atinja os R\$60/tCO₂eq. No ponto número 2, o

⁵² O preço médio do CER em dezembro de 2014 foi de 0,08 € no mercado *Spot* (sendeco2.com)

preço da eletricidade seria de R\$260/MWh, correspondendo a um preço do CER de aproximadamente R\$40/tCO₂eq para que o projeto tenha atratividade.

Em definitivo, a regulação do preço da eletricidade e das emissões no entorno destes valores criaria um cenário no qual o investimento na biodigestão com geração de eletricidade seria atrativo, como mostra a Tabela 41.

Tabela 41. Variação dos indicadores financeiros no Cenário 2 em função do preço da eletricidade e das CERs.

Investimento inicial	R\$ 20.833.802 ^a	
Custo anual O&M	R\$ 1.284.480/ano ^a	
Vida útil	18 anos ^b	
Taxa de desconto	15% ^b	
TIR	21% ^c	
Ponto da Figura 37	1	2
Preço da eletricidade	R\$240/MW _e ^c	R\$/260MW _e ^c
Preço da CER	R\$60/tCO ₂ eq ^c	R\$40/tCO ₂ eq ^c
VPL	R\$6.872.708 ^c	R\$6.872.708 ^c
Payback descontado	9 anos ^c	9 anos ^c

Fonte: a) Tabela 40; b) Valores preestabelecidos no estudo; c) Calculado pelo autor.

Esta tecnologia não está muito longe da viabilidade econômica, mas para fazer o investimento atrativo ainda seriam necessários a intervenção no preço pago pela eletricidade e um mercado de carbono registrando um valor próximo a €20/tCO₂eq⁵³, valores unicamente atingidos durante o ano 2008 (Figura 38).

Figura 38. Histórico do preço das CER.

Fonte: Thomson Reuters Point Carbon, 2014⁵⁴.

⁵³ Taxa de cambio no 08/12/14: € 1 = R\$ 3,18 (BANCO CENTRAL DO BRASIL, 2014).

⁵⁴ <http://financial.thomsonreuters.com/>

5.4. Cenário 3: Incineração com geração de eletricidade

Para este cenário foram considerados, por um lado, os custos correspondentes a uma planta de concentração de vinhaça e, por outro, uma central de cogeração termoeletrica de ciclo Rankine com queimadores torsionais de vinhaça atomizada e de gás natural. O concentrador evaporativo deve ser capaz de tratar toda a vinhaça produzida pela destilaria, atingindo uma concentração de 65 °Bx. Por isso a capacidade desta instalação é 4 vezes superior à do Cenário 1. É esperado um aumento na necessidade de limpeza e manutenção devido às altas concentrações da vinhaça que favorecem incrustações, encarecendo, assim a operação.

O custo específico por kW instalado de uma central termoeletrica a biomassa depende da sua potencia nominal, como mostra a Tabela 42.

Tabela 42. Custo de instalação de pequenas centrais de biomassa.

Potência instalada (kW)	Custos de referência (\$US/kW)
1.000	2.588
1.600	2.004
3.000	1.568
5.000	1.383

Fonte: Eletrobrás (1985).

Utilizando os custos de referência da Tabela 42, para uma potência elétrica de geração instalada 2,3 MW_e (*Equação 38*) foi assumido o valor R\$ 4.000/kW. Este valor pode ser ainda superior considerando as características especiais da instalação, tais como a necessidade de um elevado numero de sopradores de cinzas, de um tratamento de gases de exaustão para abater a significativa formação de NO_x e SO_x, e de os queimadores especiais referidos anteriormente. Os custos estimados para o Cenário 3 são apresentados na Tabela 43.

Tabela 43. Custos no Cenário 3.

	Preço unitário	Unidades	Total
Instalação			
Concentrador	R\$ 80.000/ (t/h)	160 t/h	R\$ 12.800.000
Termoeletrica a vapor	R\$ 4.000/kW	2.300 kW	R\$ 9.200.000
Custo total de instalação			R\$ 22.000.000

Operação			
Soda Cáustica	R\$ 800/t	8 t/semana	R\$ 221.000 /ano
Gás natural	R\$1,4 /m ³	1.200.000 m ³	R\$ 1.680.000/ano
Mão de obra	R\$ 35.000/ operário	3 operários	R\$ 105.000/ano
Insumos + administração			R\$ 60.000/ano
Manutenção			
Hidrojateamento	R\$ 300.000	1/ano	R\$ 300.000/ano
Mão de Obra e Materiais			R\$ 350.000/ano
Custo anual O&M			R\$ 2.716.000/ano

Fonte: Autor baseado em dados dos fabricantes de equipamentos.

Somando os custos de ambas as instalações e tomando os valores mostrados na Tabela 44, calcula-se o custo de produção da eletricidade da mesma forma que foi feito para o cenário anterior.

Tabela 44. Indicadores financeiros do investimento no Cenário 3

Investimento inicial	R\$ 22.000.000 ^a
Custo anual O&M	R\$ 2.716.000/ano ^a
Eletricidade vendida	10,8 GWh _e /ano ^b
Economia operacional na fertirrigação	R\$3.840.000/ano ^c
Economia de água	R\$913.536/ano ^c
Vida útil	18 anos ^d
Taxa de desconto	15% ^d
	R\$580/MWh ^c
Custo de produção da eletricidade	R\$230/MWh (com economia na fertirrigação) ^c
	R\$145/MWh (com economia de água) ^c

Fonte: a) Tabela 43; b) Equação 37 c) Calculado pelo autor; d) Valores preestabelecidos no estudo.

Observa-se um alto custo de produção da eletricidade de R\$580/MWh, mas neste valor não foi contabilizando a anulação do custo em fertirrigação devido à eliminação total do volume de vinhaça, o qual representa uma economia operacional para a usina de R\$3.840.000/ano. Portanto, incluindo este valor como um ganho na produção de eletricidade, atinge-se um valor de R\$230/MWh. Os custos com fertilização química não são incrementados, pois se considera a recuperação completa do potássio da vinhaça por meio das cinzas resultantes da sua combustão.

Tampouco foi contabilizado o custo da água economizada com a implantação da incineração, porque não existe hoje um pagamento por parte das usinas no uso deste recurso. Caso fosse exigido este pagamento, e estabelecendo como referência o preço de R\$1/m³ de

água, a economia seria de R\$913.536/ano. Incluindo isto como um ganho, o preço de produção cairia até R\$145/MWh, observando-se o grande impacto que pode ter o custo da captação de água na viabilização desta tecnologia.

Por outro lado, foi contabilizado neste cálculo o custo do volume de gás natural consumido para a incineração, mas não o de seu transporte por meio de gasoduto ou caminhão. Sem dúvida, este pode ser um fator limitante para a instalação deste tipo de sistema naquelas localizações longe da rede de abastecimento.

A seguir, é feita a mesma análise que no cenário anterior, contabilizando economicamente a redução de emissões de GEEs que produz a implantação da incineração, e determinando os preços que deveriam ter a eletricidade e o CER para obter um valor mínimo da TIR = 21%. Esta taxa foi encontrada no Cenário 1 e, por isto, também foi usada como referência nos cenários 2 e 3.

Figura 39. Relação entre o preço da eletricidade e do CER para que o Cenário 3 tenha uma TIR = 21%.
Fonte: Autor.

Na Figura 39 pode ser observada a relação do preço do MWh_e e da tCO₂eq evitada, para obter um investimento com uma TIR = 21%. Esta função indica os valores que devem adquirir as duas variáveis para manter atrativa a geração de eletricidade incinerando a vinhaça, a partir do ponto de vista econômico. Como exemplo, no ponto número 1, a eletricidade tem um preço de R\$190/MWh, sendo necessário que o CER tenha um preço de R\$40/tCO₂eq. No ponto número 2, a eletricidade tem um preço de R\$220/MWh, correspondendo a um preço do CER de R\$20/tCO₂eq.

Neste Cenário 3, a regulação do preço da eletricidade e das emissões em valores próximos aos indicados criaria um cenário onde seria atrativo o investimento na incineração conjunta de vinhaça e gás natural com geração de eletricidade, como mostra a Tabela 45. Ainda assim, no Brasil, não existem instalações de porte industrial funcionando com vinhaça de etanol de cana de açúcar e, portanto, os custos operacionais e de manutenção são unicamente aproximações. A magnitude destes custos é de vital importância, pois a produção de vinhaça de 65°Bx acarretará problemas de incrustações nos últimos efeitos do evaporador, e seu elevado teor de cinzas pode ocasionar problemas na caldeira. Por isso, seria necessária sua implantação em escala piloto.

Tabela 45. Variação dos indicadores financeiros no Cenário 3 em função do preço da eletricidade e do CER.

Investimento inicial	R\$22.000.000 ^a	
Custo anual O&M	R\$2.716.000/ano ^a	
Economia operacional na fertirrigação	R\$3.840.000/ano ^b	
Economia de água	R\$913.536/ano ^b	
Vida útil	18 anos ^c	
Taxa de desconto	15% ^c	
TIR	21% ^c	
Ponto da Figura 39	1	2
Preço da eletricidade	R\$190/MW _e ^b	R\$220/MW _e ^b
Preço do CER	R\$40/tCO _{2eq} ^b	R\$20/tCO _{2eq} ^b
VPL	R\$7.258.165 ^b	R\$7.258.165 ^b
Payback descontado	9 ^b	9 ^b

Fonte: a) Tabela 43; b) Calculado pelo autor; c) Valores preestabelecidos no estudo.

Comparado com o cenário da biodigestão, observa-se que os preços da eletricidade e da CER devem ser inferiores para dar viabilidade ao investimento. Esta situação favorável é devida à eliminação total das despesas em fertirrigação e a hipotética cobrança da captação de água, sendo estas vantagens que não possui a biodigestão.

5.5. Cenário 4: Biodigestão com concentração e uso veicular

Neste último cenário considerado, pretende-se avaliar tanto o uso veicular do biometano extraído do biogás de vinhaça, como a inclusão do uso da concentração pode influenciar no desempenho econômico do sistema de processamento. Para este fim, o Cenário 4 é desdobrado em duas possibilidades: uma sem a instalação do concentrador e a outra incluindo esta tecnologia. No primeiro caso, são contabilizados os custos do sistema de biodigestão tipo

IC, do dessulfurificador, de uma planta para a separação do CO₂ tipo *water scrubber* utilizada na purificação do biogás até um 98% metano (*upgrading*) e de uma estação de Gás Natural Veicular (GNV) com compressão até 220 bar. Também é adicionada a compra de um motogerador a biogás dimensionado para suprir, a partir do biogás, as cargas internas de todos estes sistemas. O valor destes equipamentos, dimensionados para o caso estudado, aparece na Tabela 46.

Tabela 46. Custos no Cenário 4 sem concentração.

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

Fonte: Autor baseado em dados dos fabricantes de equipamentos.

A seguir é calculado o custo da segunda possibilidade, integrando a concentração no sistema (Tabela 47). É considerado que os custos de instalação do concentrador se reduziriam um 20% ao antepor o sistema de biodigestão. Esta consideração se baseia no fato de que o pH da vinhaça passaria a ser neutro, o que permitiria empregar tipos de aço mais econômicos na construção dos concentradores⁵⁵. Igualmente, entende-se que os custos de operação e manutenção do concentrador também cairiam devido à diminuição da corrosão e da presença de sólidos que promovem incrustações e obrigam a limpezas frequentes. Por isto, é assumido 30% de redução nestas despesas. Estas afirmações precisam ser testadas porque ainda não existem sistemas integrados de biodigestão e concentração instalados.

⁵⁵ Atualmente é utilizado aço austenítico tipo 304L para suportar a corrosão.

Tabela 47. Custos no Cenário 4 com concentração.

	Preço unitário	Unidades	Total
Instalação			
Concentrador	R\$ 64.000/ (t/h)	40 t/h	R\$ 2.560.000
Biodigestor	R\$ 110/ (kg DQO/dia)	116.000 kg DQO/dia	R\$ 12.760.000
Dessulfurificador	R\$ 1.330.000	1.000 Nm³/h	R\$ 1.330.000
<i>Upgrading</i>	R\$ 5.100.000	1.000 Nm³/h	R\$ 5.100.000
Compressor	R\$ 500.000	300 Nm³/h	R\$ 500.000
Motogerador	R\$ 2.000/ kW	600 kW	R\$ 1.200.000
Custo total de instalação			R\$ 23.500.000
Operação			
Concentrador			R\$ 73.500/ano
Biodigestor + dessulfurificador	R\$ 0,018 kg de DQO	27.840.000 kg DQO/ano	R\$ 501.120/ano
<i>Upgrading</i>	R\$ 5.100.000	1.000 Nm³/h	R\$ 150.000/ano
Compressor		300 Nm³/h	R\$ 50.000/ano
Motogerador	R\$ 40,00/ MWh.	3.500 MWh/ano	R\$ 140.000 /ano
Custo anual O&M			R\$ 915.000/ano

Fonte: Autor baseado em dados dos fabricantes de equipamentos.

Uma vez conhecidos os custos destas instalações, avalia-se qual seria o custo do biometano comprimido com especificações para seu uso veicular. O custo do biometano é expressado em R\$ por “litro de diesel equivalente”, sendo esta medida definida como o custo de produzir uma quantidade de metano capaz de proporcionar a mesma energia térmica que um litro de diesel fóssil⁵⁶. Utilizando os valores da Tabela 48, é calculado um custo de produção do “litro de diesel equivalente” de R\$2,79/l no caso de não incorporar concentração, e de R\$2,59/l se este for instalado.

Tabela 48. Custo de produção do litro diesel equivalente no cenário 3

	Biodigestão + Uso veicular	Biodigestão + Concentração + Uso veicular
Investimento inicial	R\$20.690.000 ^a	R\$23.500.000 ^b
Custo anual O&M	R\$817.000/ano ^a	R\$914.020/ano ^b
Diminuição do custo em fertirrigação	R\$0/ano ^c	R\$904.000/ano ^c
Diminuição do custo na captação de água	R\$0/ano ^c	R\$226.000/ano ^c
Produção de volume de diesel equivalente	1.545 m³/ano ^d	1.485 m³/ano ^d
Vida útil	18 anos ^e	18 anos ^e
Taxa de desconto	15% ^e	15% ^e
Custo de produção do “litro de diesel equivalente”	R\$ 2,79/ l ^c	R\$ 2,43/ l ^c

Fonte: a) Tabela 46; b) Tabela 47; c) Calculado pelo autor; d) *Equação 41*; e) Valores preestabelecidos no estudo.

⁵⁶ Utilizando os valores correspondentes do PCI do diesel e do metano, pode ser calculado que 1,014 Nm³ de CH₄ produz a mesma energia térmica que um litro de diesel.

Contabilizado o custo da água economizada com a implantação do concentrado a um preço de R\$1/m³ de água, o ganho seria de R\$226.000/ano, o que diminuiria o custo do “litro de diesel equivalente” até R\$2,43/l. Justamente, este último valor de produção coincide com o preço médio do diesel na bomba no Estado de São Paulo⁵⁷, fazendo com que o investimento não seja interessante economicamente.

Em nenhum dos dois casos foram contabilizados os custos de transformação dos veículos para uso de GNV. Este custo de transformação se encontra entre R\$2.000 e R\$3.000 para veículos leves, sendo superior para veículos médios. Para veículos pesados como os treminhões, onde se encontra o grosso do consumo de combustível da usina, não é possível a conversão, necessitando uma renovação da frota em bicomcombustível para poder utilizar GNV. Se a usina não estiver planejando renovar sua frota se requereria incluir este custo no investimento inicial, agravando a inviabilidade econômica do projeto.

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

Na Figura 40. Figura 40, mostra-se a relação que existe entre o preço do litro de diesel e da tCO₂eq evitada, para obter um investimento com uma TIR = 21%.

Figura 40. Relação entre o preço da eletricidade e do CER para que o Cenário 4 tenha uma TIR = 21%.
Fonte: Autor

⁵⁷ Síntese dos Preços Praticados - SÃO PAULO Resumo I - Diesel R\$/l Período : De 19/10/2014 a 25/10/2014

Esta função indica os valores que devem adquirir as duas variáveis para manter atrativo desde o ponto de vista econômico o uso veicular do biogás de vinhaça substituindo o diesel. Neste Cenário 4, o preço do diesel na bomba deveria atingir valores no entorno de R\$2,7/l e um mercado de carbono registrando valores de €30/t para criar um cenário no qual o investimento seria atrativo, como mostra a Tabela 49.

Tabela 49. Variação dos indicadores financeiros no Cenário 4 em função do preço do diesel e do CER.

Investimento inicial	R\$28.500.000 ^a	
Custo anual O&M	R\$914.020/ano ^a	
Economia operacional na fertirrigação	R\$904.000/ano ^b	
Economia de água	R\$226.000/ano ^b	
Vida útil	18 anos ^c	
Taxa de desconto	15% ^c	
TIR	21% ^c	
Ponto da Figura 40	1	2
Preço do diesel	R\$2,57/l ^b	R\$2,86/l ^b
Preço do CER	R\$100/tCO ₂ eq ^b	R\$80/tCO ₂ eq ^b
VPL	R\$9.402.336 ^b	R\$9.402.336 ^b
Payback descontado	9 anos ^b	9 anos ^b

Fonte: a) Tabela 47; b) Calculado pelo autor; c) Valores preestabelecidos no estudo.

Como pode ser observado, o fator fundamental para a viabilização econômica do uso veicular do biogás é o preço do diesel. Na situação atual, os incentivos para a diminuição de emissões de GEEs e para a melhora do balanço energético do etanol seriam fundamentais para conseguir implantar esta tecnologia. É importante, também, a questão da mudança da frota para bicomustível, pois existem *kits* no mercado para a conversão de veículos leves e médios relativamente econômicos, mas não para os pesados, o que força a esperar a renovação da frota.

5.6. Resultados da avaliação econômica

Na Tabela 50 são resumidos os resultados da avaliação econômica com respeito ao cenário de referência. Nesta tabela pode ser observado que o único cenário viável economicamente, nas condições atuais, é o cenário da concentração. Para serem atrativos os demais casos, seriam necessárias bonificações pela diminuição de emissões de GEEs e da captação de água, como também seriam indispensáveis preços regulados da eletricidade e do diesel. Como já foi comentado anteriormente, esta pode ser a explicação de que a tecnologia

da concentração é a que vem sendo instalada nas usinas do país, enquanto as outras opções permanecem inviáveis.

O investimento inicial varia muito entre as alternativas, com destaque para o cenário da biodigestão com concentração e uso veicular do biogás, pois, além de ser uma combinação que requer numerosos equipamentos, inclui também uma conversão e uma renovação parcial da frota para bicomustível. Com relação aos custos de operação e manutenção, os custos anuais da incineração são importantes, por incluir um concentrador de alta capacidade e uma caldeira com queimadores especiais adaptados para a operação com um combustível de baixo poder calorífico e de alto teor de cinzas.

A incineração elimina totalmente as despesas com a fertirrigação, mas os custos da operação são elevados. A alternativa seria a concentração com posterior uso fertilizante da vinhaça, dado que este sistema oferece os benefícios da redução de volume sem elevados custos operacionais, sempre e quando o calor necessário para a evaporação não dependa do consumo adicional de vapor em grandes quantidades. A biodigestão por si só não oferece nenhuma vantagem na diminuição dos custos da fertirrigação, diante disso a despesa continuaria sendo a mesma que no cenário de referência.

Tabela 50. Resultados da avaliação econômica.

	1. Concentração	2. Biodigestão + Eletricidade	3. Incineração + Eletricidade	4. Biodigestão + Concentração + Uso veicular
Investimento inicial	R\$3.200.000	R\$16.690.000	R\$22.000.000	R\$28.500.000
Custo anual de O&M	R\$207.000/ano	R\$803.136/ano	R\$2.716.000/ano	R\$914.020/ano
Diminuição do custo em fertirrigação	R\$904.000/ano	R\$0/ano	R\$3.840.000/ano	R\$904.000/ano
Diminuição da captação de água	R\$0/ano	R\$0/ano	R\$913.536/ano	R\$226.000/ano
Taxa de desconto	15%	15%	15%	15%
TIR	21%	21%	21%	21%
Preço do diesel ou da eletricidade	0	R\$240/MW _e	R\$190/MW _e	R\$2,86/l
Preço da CER	R\$0/tCO ₂ eq	R\$60/tCO ₂ eq	R\$40/tCO ₂ eq	R\$80/tCO ₂ eq
VPL	R\$1.071.192	R\$6.872.708	R\$7.258.165	R\$9.402.336
Payback descontado	9 anos	9 anos	9 anos	9 anos

Fonte: Resumo dos indicadores financeiros contidos na Tabela 37, Tabela 41, Tabela 45 e Tabela 49.

Os valores de Investimento inicial, Custo anual de O&M e VPL, mostrados na Tabela 50, são representados na Figura 41.

Figura 41. Investimento inicial, Custo anual O&M e VPL (TIR = 21%) nos diferentes cenários.
Fonte Autor.

Em termos de produção e venda de energia elétrica, a biodigestão se mostrou pouco viável quando não são incorporadas medidas de eficiência na produção de biogás a partir da vinhaça. Em um cenário otimista, utilizando dados dos fabricantes de equipamentos, chegou-se ao custo de produção de R\$240/MWh_e, pouco competitivo para entrar no mercado. Para obter um investimento com uma TIR = 21%, seria necessário que o preço da eletricidade atingisse R\$240/MWh_e e que o valor do CER estivesse em torno de R\$60/tCO₂eq. A incineração só apresenta vantagens frente à biodigestão quando contabilizada a redução de despesas na fertirrigação e na captação de água. Embutindo estes ganhos, a incineração seria viável com preços da eletricidade de R\$190/MWh_e e com o CER vendido a R\$40/tCO₂eq, valores bem inferiores aos requeridos pela biodigestão.

Na situação atual, a opção da produção de combustível veicular para abastecimento da própria frota aparece longe da viabilidade. Foi calculado um custo de produção do “litro de diesel equivalente” de R\$2,79/l, superior ao encontrado atualmente na bomba para o diesel derivado do petróleo. Somente incorporando os benefícios econômicos da concentração e o pagamento pela redução de emissões de GEEs, que esta tecnologia poderia ser atrativa para o setor.

Como conclusões deste capítulo são colocadas as seguintes afirmações:

- A concentração é viável e atrativa economicamente na situação atual, sempre e quando se aproveite o calor residual do processo da usina e não dependa de consumo de vapor adicional.
- A viabilização dos demais processos para o tratamento da vinhaça com aproveitamento energético está subordinada à valorização dos benefícios ambientais que estas tecnologias trazem. Sem o incentivo para a redução da captação de água e de emissões de GEEs, ou para a substituição de combustíveis fósseis por fontes renováveis, estas tecnologias não serão a preferência da iniciativa privada nas condições atuais.

CAPÍTULO 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nos capítulos anteriores foi discutido o estado da arte das tecnologias para o processamento da vinhaça, o balanço energético de cada alternativa, bem como os fatores ambientais e econômicos. A seguir, os resultados dos anteriores capítulos são analisados, resumidos e discutidos, para atingir os objetivos gerais e específicos deste estudo, como passo prévio à apresentação das conclusões e considerações finais.

6.1. Cenário 0 de referência: Fertirrigação com *vinhaça in natura*

A prática da fertirrigação está amplamente estendida, pois contribui para reduzir o problema da disposição da vinhaça e para diminuir o consumo de fertilizantes. A dificuldade desta técnica se encontra nos custos do transporte, que estimulam a excessiva dosagem nos cultivos próximos à destilaria. Souza (2005) relata que a aplicação média era de 131,5 m³/ha, sendo esta dose quase o dobro da estritamente necessária para o cultivo⁵⁸. Com a entrada da Norma P4.231 no ano 2006, esta dosagem praticada deve ser diminuída (CETESB, 2006), incrementando os custos na logística da fertirrigação que são atualmente da ordem de R\$4/m³ de vinhaça (JORNALCANA, 2007). Desse modo, apesar do valor do raio econômico de fertirrigação se encontrar próximo aos 30 km (ELIA NETO *et al.*, 2008), atualmente uma parte do volume de vinhaça tem que ser transportado a distâncias superiores a 60 km em alguns casos (USINA VISTA ALEGRE, 2014)⁵⁹. Um fator a considerar na avaliação de impacto ambiental é a grande escala de aplicação da fertirrigação, que dificulta a fiscalização do cumprimento da Norma P4.231.

O consumo de diesel no cenário atual já é importante, com 30 l/ha fertirrigada (Tabela 14), e a diminuição da dosagem indicada anteriormente tende a incrementá-lo. Todas as alternativas de tratamento oferecem uma redução na demanda deste combustível com exceção da biodigestão, que mantém o mesmo nível de despesa.

Com relação às emissões, as que são provenientes do diesel podem ser insignificantes quando comparadas às acentuadas emissões das lagoas de armazenamento e canais. Segundo Pires (informação verbal)⁶⁰, estes depósitos funcionam em muitos casos como lagoas de estabilização com tempo de detenção hidráulica de alguns dias e com quedas importantes na DQO da vinhaça. Como foi levantado nos trabalhos de Oliveira (2009) e Paredes (2011), as

⁵⁸ A cultura de cana extrai 185 kgK₂O/ha ano (CETESB, 2006) e a concentração média de potássio na vinhaça é de 2,6 kg/m³, portanto a dosagem deveria ser aproximar a 72 m³/ha, podendo variar com cada tipo de solo.

⁵⁹ Visita à Usina Vista Alegre, Itapetininga /SP, novembro de 2014.

⁶⁰ Informação dada pelo Prof. Dr. Eduardo Cleto Pires, durante o exame de qualificação da presente dissertação, São Paulo, agosto de 2014.

principais emissões de GEEs se produzem em forma de CH₄. Nos resultados obtidos no presente estudo, observa-se que aproximadamente 7% do carbono contido na vinhaça é emitido em forma de CH₄, sendo significativamente superior ao valor de 0,2% utilizado por Soares *et al.* (2009) no cálculo do balanço de emissões de GEEs do uso de etanol da cana-de-açúcar. Ainda assim, este valor é conservador se comparado com o valor de 33% observado por Paredes, 2011. Observe-se que Macedo *et al.* (2008) consideram que a vinhaça não permanece em lagoas e assumem que as emissões de metano não são significativas.

O assunto, como visto aqui, não tem unanimidade nos diferentes estudos consultados e gera controvérsias. No relatório da CETESB sobre emissões do setor de resíduos sólidos e efluentes líquidos no Estado de São Paulo (CETESB, 2013), considera-se que as emissões de CH₄ pelo manejo de efluentes industriais no setor sucroalcooleiro são nulas. Neste mesmo relatório, indica-se que, em 2008, o manejo de efluentes em todo o setor industrial foi responsável pela emissão de aproximadamente 1,5 milhões de tCO₂eq. Portanto, se fosse incluída a emissão de lagoas e canais de vinhaça estimada no presente trabalho a partir dos estudos citados⁶¹, a emissão de GEEs dos efluentes industriais no Estado de São Paulo seria multiplicada por 3, sendo que o setor sucroalcooleiro seria responsável por 2/3 das emissões. Em 2010, foram emitidas 12,6 milhões de tCO₂eq pelo tratamento de resíduos no Estado de São Paulo, incluindo a disposição de resíduos sólidos urbanos em aterros, a incineração de resíduos, o tratamento de efluentes domésticos e industriais (CETESB, 2013). Se fosse confirmada a ordem de magnitude das emissões de vinhaça, este número seria incrementado em aproximadamente 24%. Pretende-se, portanto, continuar esta análise em estudos posteriores de forma a se obter resultados mais confiáveis para o Estado de São Paulo.

As emissões de CH₄ em lagoas e canais dependem, em grande parte, das dimensões, da geometria e do revestimento destas estruturas (PAREDES, 2011), assim como do teor de matéria orgânica contido na vinhaça, que varia em amplos intervalos ao longo da safra. A metodologia *ACM0014 "Treatment of wastewater"* utilizada para estimar as emissões da lagoa neste estudo, tem como condição para sua aplicação a existência de períodos de retenção na escala de meses. Atualmente, a tendência é construir lagoas de armazenamento menores, para controlar o risco de acidentes ambientais como a quebra de barragens destes reservatórios. Por isto, o tempo de retenção nas lagoas são da ordem de dias. O tempo de retenção da vinhaça nas lagoas é um dado importante para conhecer sua emissão de CH₄, o

⁶¹ BODDEY, 2009; OLIVEIRA, 2010; PAREDES, 2011.

que indica a necessidade de que aprofundem a realidade dimensional e de gestão destes reservatórios.

Considerando o exposto anteriormente, medidas como a obrigatoriedade no revestimento de lagoas e canais mestres, a diminuição do tempo de retenção nas lagoas evitando o “envelhecimento” da vinhaça nas mesmas, assim como a limpeza do lodo formado no fundo de lagoas e canais, permitiriam mitigar as emissões de CH₄ deste cenário. Outra possibilidade seria cobrir as lagoas com lonas e aproveitar o biogás ou, simplesmente, queimar em *flare*.

Cabe mencionar que, na maioria dos casos, a cana-de-açúcar é usada para produção de açúcar e álcool em proporção variável. Portanto, os impactos que produz a fertirrigação não devem ser exclusivamente alocados no etanol.

6.2. Cenário 1: Concentração evaporativa

A implantação de concentradores implica em uma redução no consumo de diesel de 25% com relação ao Cenário 0, sendo importante para o balanço energético e econômico do etanol. Devido à economia produzida na logística da fertirrigação, a implantação de concentradores tem um retorno financeiro interessante (*Payback* Descontado de 9 anos e TIR 21%). A facilidade na dispersão do potássio e, portanto, no cumprimento da Norma P4.231 sem elevar as despesas em fertirrigação, explica em alguns casos a instalação desta tecnologia.

Outro fator importante pelo qual várias usinas adotaram a concentração é a queda na necessidade do uso de vapor com a introdução do aproveitamento do calor residual do processo. O uso da energia do vapor do álcool proveniente das colunas de destilação é um fator fundamental para a viabilidade econômica da concentração. Com a finalidade de incrementar as possibilidades de aplicação desta tecnologia, estão sendo desenvolvidas novas fontes de energia, como, por exemplo, o uso do calor dos gases de exaustão das caldeiras.

O consumo de energia elétrica no concentrador não parece ser um fator determinante, devido ao fato de que estes equipamentos precisam, fundamentalmente, de uma grande quantidade de energia térmica.

O uso de concentradores com condensador possibilita a reutilização da água na produção do álcool, diminuindo o consumo da usina. Porém, esta técnica pode implicar uma maior circulação de caminhões-tanque no interior dos cultivos, com potenciais consequências sobre a compactação do solo.

Neste cenário existe uma redução significativa das emissões de GEEs, considerando que a vinhaça concentrada e transportada em caminhão não tem emissão de CH₄. Desta forma, a mitigação é praticamente equivalente à porcentagem de volume destinada à concentração. Porém, se os estudos citados⁶² se confirmarem, isso indicará que grande parte da emissão de CH₄ em lagoas e canais permaneceria inalterada com respeito ao Cenário 0, pois continuaria a ser transportado por eles a maior fração do volume de vinhaça. Com a redução do consumo de diesel também são mitigadas emissões de GEEs, mas esta diminuição não é relevante quando comparada com a estimada nas lagoas.

Observa-se que não foi possível acessar dados empíricos sobre as emissões produzidas no solo da lavoura quando é aplicada vinhaça concentrada.

6.3. Cenário 2: Biodigestão anaeróbia com geração de eletricidade

Um dos problemas da biodigestão é que ela não diminui o volume de vinhaça, o que significa que os custos operacionais e o consumo de combustível na fertirrigação continuam sendo os mesmos do Cenário 0.

Durante a biodigestão, o conteúdo de potássio, fósforo e nitrogênio são mantidos, conservando as propriedades fertilizantes da vinhaça. Isto também significa que, para se adequar à Norma P4.231, os custos de dispersão do potássio permanecem. Por outro lado, em determinados tipos de solos, pode ser considerado que a eliminação da matéria orgânica produzida com a biodigestão é uma perda de seu potencial de fertilização.

A produção de eletricidade é fortemente influenciada pela eficiência no processo de conversão da matéria orgânica em biogás, que se produz durante a biodigestão. Foram utilizados, em um primeiro cálculo, valores conservadores baseados na experiência do biodigestor da Usina São Marinho, instalação com maior tempo de funcionamento no país. Neste caso, a baixa eficiência da biodigestão na produção de biogás permite a instalação de apenas 1 MW_e. Contando com a melhoria na eficiência (que podem trazer os reatores IC) e com um melhor controle da operação, a potência instalada poderia ser triplicada (Tabela 40).

De qualquer modo, a eletricidade produzida a partir do biogás capturado não tem um impacto importante na redução de emissões, fundamentalmente devido às características da matriz elétrica brasileira, com 76,9% de produção hidroelétrica (BEN, 2013), pois foi considerado que a eletricidade produzida é destinada ao sistema interligado. Observa-se que o

⁶² BODDEY, 2009; OLIVEIRA, 2010; PAREDES, 2011.

resultado seria mais vantajoso se esta usina estivesse em uma região onde a geração de energia fosse de outra origem (e não do SIN) como, por exemplo, termelétricas a óleo diesel.

Um possível obstáculo para a implantação da tecnologia da biodigestão é quando ocorre o uso de antibióticos termolábeis na fermentação, pois os mesmos continuam ativos na vinhaça depois do processo de destilação. Consequentemente, estes compostos ativos afetam a atividade dos microrganismos associados à metanogênese que se encontram no biodigestor. Além de ser um problema para a biodigestão, o uso de antibióticos gera uma barreira comercial para a exportação do etanol e das leveduras (vendidas como ração animal), pois na União Européia, potencial importador, não são aceitos o uso destes agentes na fabricação.

Para vencer a barreira do uso de antibióticos, existem diversas alternativas para o controle da infecção nas dornas, submetendo o caldo a tratamento com ozônio, raios gama e ultravioleta. As três opções anteriores são inviáveis atualmente pelo alto custo econômico. Outras opções mais viáveis economicamente são:

- a) Pasteurização do mosto (caldo), recuperando o calor da vinhaça;
- b) leveduras modificadas para combater a infecção, porém competitivas com as demais para o desdobramento do açúcar;
- c) antibióticos termolábeis;
- d) produtos que atuam como antibióticos e não interferem nos processos de biodigestão;
- e) uma combinação das opções anteriores.

Neste sentido, são observados avanços na procura de alternativas, como, por exemplo, os tratamentos físicos desenvolvidos por Nolasco (2010).

Embora estas tecnologias estejam disponíveis, os antibióticos termolábeis continuam sendo a opção mais econômica para os produtores de etanol. Um fator que poderia inverter este quadro seria a criação de uma legislação específica que penalizasse economicamente o uso destas substâncias, mas esta medida afetaria diretamente o setor. Outra possibilidade seria destinar parte das remessas obtidas com a venda de energia elétrica, produzida a partir do biogás da vinhaça, para cobrir a diferença do preço existente entre os antibióticos termolábeis - mais custosos -, e os tradicionais.

Com relação às emissões, a remoção da matéria orgânica presente na vinhaça, por meio da biodigestão, evita as emissões de CH₄ em lagoas e canais. Apesar disso, atualmente não existe um incentivo para a mitigação de GEEs. Um efeito colateral benéfico deste tratamento

é a eliminação do odor característico da vinhaça nos campos, que é produzido pela decomposição da matéria orgânica.

Embora tenha sido demonstrada a viabilidade técnica da digestão anaeróbia da vinhaça, os fatores econômicos continuam sendo um grande obstáculo. Até o momento tem sido evidenciado que os valores oferecidos pelo mercado do setor elétrico ou por programas de incentivo como o PROINFA⁶³ não são atrativos para os investidores. Os biodigestores necessários devem possuir dimensões de grande tamanho para tratar o elevado volume manejado e para permitir longo tempo de retenção. Devido a isto, o ganho com a venda de energia elétrica produzida utilizando biogás não compensa o substancial investimento inicial. Como foi exposto no Capítulo 5 de avaliação econômica, esta tecnologia não está muito longe da viabilidade econômica, mas, para isso, seria necessário tanto o estabelecimento do preço pago pela eletricidade no valor de R\$240/MWh como a existência de um mercado de carbono registrando valores da ordem de R\$60/tCO₂eq, tudo isso para fazer o investimento atrativo.

6.4. Cenário 3: Incineração com geração de eletricidade

Como foi calculado no Capítulo 3, existe um equilíbrio entre a energia consumida para a concentração da vinhaça e a obtida na sua incineração, de modo que o balanço energético não seria uma barreira. Por outro lado, neste cenário é exportado quase o dobro da quantidade de energia elétrica se comparado ao Cenário 2.

O Cenário 3 apresenta o maior consumo de combustível de origem fóssil, uma vez que é necessário gás natural para a combustão completa da vinhaça, o que afeta negativamente o balanço energético do etanol. Para evitar este impacto, deve ser considerada a utilização de outros combustíveis suporte de origem renovável, e que estejam disponíveis para a usina, como a palha ou o bagaço. Porém, não são encontrados no mercado equipamentos capazes de picar palha ou bagaço nas quantidades necessárias por unidade de tempo e com a granulometria requerida (menos de 1 mm) pelo queimador torsional que realiza a incineração conjunta com a vinhaça. Também existem problemas técnicos com o volume de cinzas que gera a combustão de vinhaça, exigindo caldeiras com numerosos sopradores de fuligem, encarecendo a instalação e a operação. Se fosse incinerada junto com o bagaço ou, principalmente, com a palha, o problema das cinzas aumentaria significativamente. Além disso, é de vital importância para a caldeira garantir a combustão completa da vinhaça, visto

⁶³ O Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), conforme descrito no Decreto nº 5.025, de 2004, foi instituído com o objetivo de aumentar a participação da energia elétrica produzida por empreendimentos concebidos com base em fonte eólica, biomassa e pequenas centrais hidrelétricas no SIN.

que, por sua acidez, sua queima inadequada produziria graves problemas de corrosão (SAACKE, 2013).

Como vantagens ambientais do Cenário 3, destaca-se a completa eliminação dos impactos negativos devidos à fertirrigação, já que elimina totalmente o volume de vinhaça. Outras vantagens são a recuperação quase completa da água da vinhaça e a total eliminação dos antibióticos ativos que se encontram presentes.

Com relação às emissões, neste cenário obteve-se uma redução de emissões similar ao cenário anterior, visto que todo o carbono orgânico presente na vinhaça é convertido em CO₂, fechando o ciclo do carbono fixado previamente pela cana. Entretanto, os principais impactos negativos do Cenário 3 são os inerentes a um sistema de incineração que utiliza combustível com baixo poder calorífico e elevada quantidade de nitrogênio e enxofre, produzindo possíveis emissões de NO_x, SO_x e micropartículas, além do CO₂ proveniente do gás natural. Com exceção do CO₂, estes poluentes podem ser eliminados, quase na sua totalidade, com uma boa regulação da combustão e do tratamento dos gases de exaustão, entretanto, os equipamentos necessários impactam tanto no investimento como nos custos de operação.

O investimento na planta de incineração de vinhaça é elevado, assim como os custos de operação e de manutenção, que são os maiores entre os cenários avaliados (Tabela 50). Como no caso anterior, a viabilidade econômica depende da valorização dos serviços ambientais, tais como a recuperação da água, a mitigação de GEEs e o aproveitamento da vinhaça como fonte renovável de energia elétrica.

Um problema econômico a ser analisado caso a caso é o do transporte do gás natural necessário, considerando a localização isolada da rede de distribuição da maioria das usinas.

6.5. Cenário 4: Biodigestão com concentração e uso veicular

A concentração e a biodigestão são tratamentos que, separadamente, melhoram o aproveitamento da vinhaça, mas a sua combinação agrega essas vantagens, podendo criar efeitos sinérgicos. Um sistema que primeiro realize a biodigestão para depois concentrar a vinhaça eliminaria a carga orgânica, facilitando a operação dos concentradores. Já que a vinhaça biodigerida é menos corrosiva, por ter um pH mais elevado que a *vinhaça in natura*, estima-se um aumento da durabilidade das bombas e dos equipamentos empregados na concentração e na distribuição. Com o biogás produzido, pode-se suprir o consumo elétrico das cargas internas do biodigestor e do concentrador, assim como também as da limpeza, as da purificação e as da compressão do biogás. O biometano obtido pode abastecer a frota

empregada na lavoura e, também, o transporte de cana. Ainda, contando com as infraestruturas necessárias, o biometano pode ser injetado na rede de gás natural como alternativa ao uso veicular.

O Cenário 4 é o que apresenta maior redução do uso de combustíveis fósseis, sendo a opção mais vantajosa para melhorar o balanço energético do etanol. Os dados utilizados apontam que o biometano procedente da biodigestão da vinhaça poderia reduzir em 50% o consumo de diesel da agroindústria (MORENO & COELHO, 2014).

Como mostrado no balanço energético, a substituição parcial de diesel por biometano na frota destinada à fertirrigação, só requereria 15% do biogás produzido. Dessa forma, o restante poderia ser utilizado em outras operações do cultivo da cana-de-açúcar. Foi documentada uma experiência, na Usina São João, de uso veicular do biometano procedente da vinhaça; este projeto foi desativado pela queda no preço do diesel e pelos problemas do biometano nos motores de alta potência, que são utilizados nos treminhões que transportam a cana-de-açúcar, atividade responsável pela maior parte do consumo de diesel na usina (SOARES, 2009).

Não foi encontrado disponível no mercado um kit de conversão para adaptar os motores dos treminhões em uso, o que implica na renovação da frota para passá-la a bicomcombustível. Segundo Nigro (informação verbal)⁶⁴, no Brasil encontram-se fabricantes que têm desenvolvido motores de elevadas potências para funcionamento com Gás Natural Veicular (GNV), mas a falta de procura faz com que não existam linhas de fabricação. Observa-se que a tecnologia bicomcombustível (diesel – gás natural), para o transporte de carga, tem surgido com força nos Estados Unidos nos últimos anos. Este fato se deve à diminuição dos preços do gás natural que a exploração do gás de xisto tem trazido. Por essa razão, no mercado externo, tem-se disponível para compra cavalos mecânicos bicomcombustível nas potências requeridas pelo setor sucroalcooleiro, o que não se encontra (ainda) no Brasil.

Da mesma forma que no Cenário 2, que também inclui biodigestão, é importante a eliminação dos antibióticos termooestáveis do processo de fermentação alcoólica para permitir uma eficiência adequada. Os custos com a implantação da sua alternativa podem ser compensados com a economia obtida na substituição do diesel.

Nota-se que este é o cenário com maior investimento inicial, uma vez que agrupa a implantação do biodigestor, do concentrador e da planta de acondicionamento e de compressão do biogás para uso veicular, assim como a conversão da frota para bicomcombustível.

⁶⁴ Informação dada pelo Prof. Dr. Francisco Emilio Baccaro Nigro, durante o evento “*São Paulo Advanced School on the Present and Future of BIOENERGY*”, Campinas/SP, outubro de 2014.

Todos os problemas técnicos, tanto da biodigestão como do uso veicular, são salváveis com o estado atual do conhecimento, sendo o fator econômico a principal barreira existente para que este sistema não esteja presente das usinas.

Como foi calculado no Capítulo 5, o preço atual de produção do “litro de diesel equivalente”⁶⁵, a partir de vinhaça, é muito similar ao do diesel fóssil encontrado nas bombas. Consequentemente, não existe incentivo para sua substituição. Diante da perspectiva de exploração das reservas de petróleo encontradas no pré-sal, observa-se uma expectativa de que os preços do diesel se mantenham baixos. Em virtude disso, nota-se que a vontade política de investimentos no setor da energia está voltada, atualmente, para a exploração destes recursos não renováveis.

A ausência de incentivo à mitigação de emissões, com a desvalorização do crédito de carbono, e o escasso conhecimento sobre a verdadeira magnitude das emissões de CH₄ nos sistemas de distribuição de vinhaça, bem como os preços baixos do diesel, fazem este sistema de tratamento ser de escasso interesse para os investidores.

⁶⁵ Quantidade de biometano capaz de fornecer a mesma energia térmica que um litro de diesel.

CAPÍTULO 7. CONCLUSÕES

A vinhaça é o principal subproduto da produção de etanol e, no Brasil, são gerados aproximadamente 250 milhões de m³ de vinhaça por safra. Este efluente possui grande quantidade de matéria orgânica e de sais, sendo que seu uso em fertirrigação pode ser causa de impactos ambientais no solo e na água, assim como de emissões de GEEs.

O objetivo geral deste estudo é comparar as diferentes alternativas para o aproveitamento energético da vinhaça, na procura daquelas com maior viabilidade tecnológica, com reduzido impacto ambiental e que estejam associadas a um menor custo. Para isto, foram configurados cinco cenários que representam as tecnologias mais estudadas atualmente. Como cenário de referência foi estabelecido a fertirrigação com vinhaça *in natura* e, como suas alternativas, consideraram-se a concentração, a biodigestão e a incineração com produção de energia elétrica, bem como a combinação da biodigestão com a concentração e com o uso veicular do biogás.

Verificou-se a hipótese de que existem tecnologias disponíveis que melhoram o desempenho ambiental da gestão do resíduo e, ao mesmo tempo, permitem um melhor aproveitamento da vinhaça e uma economia de energia. Entretanto, com as premissas adotadas neste estudo, a única tecnologia avaliada que se mostra viável economicamente na situação atual é o sistema de concentração.

Com os valores assumidos neste estudo, verifica-se que a biodigestão, a incineração com produção de eletricidade, e o uso veicular do biogás de vinhaça, estão atualmente próximos da viabilidade econômica, sem chegar a atingi-la. Porém, com o elevado número de variáveis e de considerações incluídas na avaliação, esta afirmação deve ser revista em cada caso particular.

Com relação à redução de emissões, os primeiros estudos (BODDEY, 2009; OLIVEIRA, 2010; PAREDES, 2011) mostram evidências de que, em lagoas e canais utilizados na fertirrigação, uma porcentagem significativa do carbono contido na vinhaça é emitida na forma de CH₄. Tanto a biodigestão como a incineração apresentam-se interessantes para reduzir essas potenciais emissões de GEEs na fertirrigação, mas a incineração requer uma quantidade significativa de gás natural, o que incrementaria a energia fóssil utilizada para produzir etanol.

A possibilidade de usar o biogás como combustível veicular é mais conveniente que seu emprego na geração de eletricidade, visto que a substituição do diesel melhora com mais intensidade o balanço energético do etanol de cana-de-açúcar.

Devido ao significativo potencial que possui a vinhaça como fonte de geração de energia, recomenda-se dar continuidade nas pesquisas visando vencer as dificuldades atuais na viabilização econômica destas técnicas. Além disso, com a introdução de medidas que premiem monetariamente os serviços ambientais -tais como a mitigação de emissões de GEEs, a redução do consumo de água e a produção de energia a partir de fontes renováveis- seria alcançada uma atratividade aceitável nos investimentos para o processamento da vinhaça.

A combinação da biodigestão com a concentração é a alternativa que reúne o maior número de vantagens com respeito ao cenário da fertirrigação com vinhaça *in natura*, sendo enumeradas a seguir as mais importantes:

- a) Diminui o volume da vinhaça, facilitando sua distribuição a longas distâncias, de forma a evitar a concentração de nutrientes no entorno das usinas e a favorecer o cumprimento da Norma P4.231;
- b) incentiva a substituição de antibióticos termoestáveis por técnicas menos perigosas para o meio ambiente, sendo fundamental que a vinhaça *in natura* não contenha antibióticos ativos que prejudiquem a produção de biogás;
- c) elimina emissões de CH₄ na atmosfera e o odor nos campos de cana produzidos pela decomposição da vinhaça;
- d) possibilita a reutilização da água na usina e, assim, diminui a captação para a produção do álcool;
- e) reduz a aplicação de adubos minerais, pois em determinadas circunstâncias, pode reduzir a lixiviação de nutrientes,
- f) reduz o risco de vazamentos em lagoas e canais, permitindo um melhor controle e aproveitamento da vinhaça como fertilizante,
- g) permite substituir combustíveis fósseis por biogás, evitando emissões de CO₂ e a depleção de recursos não renováveis na produção de etanol;
- h) produz eletricidade para suprir a própria demanda de energia do sistema de tratamento.

O presente estudo não esgota as possibilidades de tratamento e de processamento da vinhaça, pois existem tecnologias que não foram incluídas por estarem em fase incipiente de desenvolvimento. Como exemplos de técnicas que podem ser alvo de futuros estudos, encontram-se a biodigestão em duas fases com produção de hidrogênio e a concentração por microfiltração.

Por outro lado, não foram avaliados todos os usos do biogás de vinhaça, sendo necessários estudos que avaliem outras possibilidades, tais como a injeção de biometano na rede de gás natural e, em áreas fora do alcance desta rede, a substituição de GLP doméstico ou o uso como fonte energética para a indústria local.

Os resultados desta dissertação foram limitados pela carência de estudos sistemáticos que avaliem o impacto da fertirrigação com vinhaça na qualidade do solo e das águas subterrâneas. Igualmente, pela falta de referências encontradas, tampouco foi possível estimar o potencial impacto da dispersão de antibióticos no meio ambiente.

Por causa da ausência de monitoramento das emissões de GEEs nos sistemas de distribuição de vinhaça e da sua exclusão nos inventários de emissões publicados, no presente estudo, as estimativas realizadas foram baseadas em dados bibliográficos produzidos com medições pontuais. Por esta razão, seriam necessárias amostragens sistemáticas para produzir resultados com comprovada representatividade.

Por todo o anterior, conclui-se que são necessárias mais pesquisas sobre os impactos da fertirrigação com vinhaça *in natura* e sobre as possibilidades do aproveitamento energético deste coproduto da produção de etanol.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, RESÍDUOS SÓLIDOS – Classificação, ABNT NBR 10.004, 2004.

ALMEIDA, JR.; RANZANI, G.; VALSECCHI, O. La vinasse dans l'agriculture. **Boletim do Instituto Zimonecnico**. Piracicaba, n. 3, p. 1-9, 1950.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Manual de conservação e reúso de água na agroindústria sucroenergética. Ministério do Meio Ambiente. Brasília, 2009.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Banco de informações de geração (BIG). Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: 16 jun 2012.

AVRAM, P.; MORGENROTH, B.; SEEMAN, F., Vision paper for improving the utilization of bagasse and vinasse in the sugar & ethanol industry. In: Workshop of Co217 Products International Society of Sugar Cane Technologists, Maceió, Alagoas, 2006. Proceedings do ISSCT Co-Products Workshop. **Proceedings in CD**, Maceio, 12-16 of November, 2006.

BARBERI, M. C., **Análise do Uso e das Possibilidades do Gás Metano Fóssil e de Biodigestão nas Frotas de Veículos em São Paulo e Outras Regiões, nos Anos 90**, Dissertação Mestrado, Universidade de Campinas, Campinas, 1998.

BARROS, R. P., VIÉGAS, P. R. A., SILVA, T. L., SOUZA, R. M., BARBOSA, L., VIÉGAS, R. A., MELO, A. S. Alterações em atributos químicos de solo cultivado com cana-de-açúcar e adição de vinhaça. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, 40(3), 341–346, 2010.

BIASE, L. P. Aspectos Gerais da concentração das vinhaças. In: II WORKSHOP DE GESTÃO DE ENERGIA E RESÍDUOS NA AGROINDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA, 2007, Pirassununga. **Anais**. Pirassununga: Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, USP, 2007.

BNDES – BANCO NACIONAL DO DESENVOLVIMENTO. **Bioetanol de cana-de-açúcar : energia para o desenvolvimento sustentável**. Rio de Janeiro, 2008.

BODDEY, R. M., *Greenhouse Gas Emission in the Production Cycle of Bioethanol from sugarcane*, Embrapa Agrobiologia, Seropédica, RJ, 2009.

BEN, **Balanço Energético Nacional 2005**, Empresa de Pesquisa Energética – EPE, Ministério de Minas e Energia – MME, 2006.

BEN, **Balanço Energético Nacional 2012**, Empresa de Pesquisa Energética – EPE, Ministério de Minas e Energia – MME, 2013.

BRASIL. Portaria MINTER nº 323 de 29/11/1978. Proíbe o lançamento, direto ou indireto, do vinhoto em qualquer coleção hídrica, pelas destilarias de álcool. 29 de novembro de 1978.

BRASMETANO. Oportunidades do biogás da vinhaça. In: 3º SEMINÁRIO BIOENERGIA: DESAFIOS E OPORTUNIDADES DE NEGÓCIOS. Utilização de Resíduos Urbanos e Rurais como Fonte de Energia. São Paulo, 24 novembro de 2011

CEC - CALIFORNIA ENERGY COMMISSION. Dairy Power Production Program. Dairy Methane Digester System Program Evaluation Report. Marsh, M. L. H., Officer, C. E., Schiffler, K., & Coordinator, G. (February). 2009.

CAMPOS, M.P. Produção de Biogás por Digestão Anaeróbia do Vinhoto, 1a Parte. **Brasil Açucareiro**, vol. 98, nº1, p.47-53, jul/1981.

CAPANA, G.H. **estudo de impacto do enxofre presente no diesel na emissão de poluentes e em tecnologia de pós-tratamento de gases de escape**. Dissertação (Mestre Profissional em Engenharia Automotiva) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

CARMO, J. B. DO, FILOSO, S., ZOTELLI, L. C., DE SOUSA NETO, E. R., PITOMBO, L. M., DUARTE-NETO, P. J., MARTINELLI, L. A., Infield greenhouse gas emissions from sugarcane soils in Brazil: effects from synthetic and organic fertilizer application and crop trash accumulation, **GCB Bioenergy**, 5(3), 267–280, 2013.

CARVALHO, T. C. DE, SILVA, C. L.. REDUÇÃO DO VOLUME DE VINHAÇA ATRAVÉS DA EVAPORAÇÃO. In: IV SEMINÁRIO DA PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA (Vol. D). Bauru, 2008.

CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo, **Norma P4.231 / VINHAÇA – CRITÉRIOS E PROCEDIMENTOS**, São Paulo, dez/2006.

CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo, **Utilização de restilo como fertilizante em solos cultivados com cana de açúcar: relatório final**, 262p, Imprensa São Paulo, 1982.

CETESB. Emissões do setor de resíduos sólidos e efluentes líquidos, 1990 a 2008 : relatório de referência [recurso eletrônico]/CETESB; coordenação João Wagner Silva Alves, Josilene Ticianelli Vannuzini Ferrer; equipe Calvin Stefan Iost.[et al.]. São Paulo, 2013.b.148 p. : il. color.

CETESB. Qualidade das águas subterrâneas do estado de São Paulo 2010-2012 [recurso eletrônico]/CETESB; Equipe técnica Rosângela Pacini Modesto.[et al.]. São Paulo, 2013a.

CGEE – CENTRO DE GESTÃO DE ESTUDOS ESTRATÉGICOS. Estudo sobre as possibilidades e impactos da produção de grandes quantidades de etanol visando à substituição parcial de gasolina no mundo – Fase 1. Campinas: Nipe/Unicamp e Centro de Gestão de Estudos Estratégicos, 2005.

CHAUDHARI, P.K., MISHRA, I.M. AND CHAND, S. Effluent treatment for alcohol distillery: Catalytic thermal pretreatment (catalytic thermolysis) with energy recovery. **Chemical Engineering Journal**, 136: 14-24, 2008.

CLNSA – Compañía Licorera de Nicaragua, S.A. Project 0675: Vinasse Anaerobic Treatment Monitoring Report — Version 1.0, September 30th, 2009.

COELHO, M. B, PEIXOTO, M. J. C., **Considerações econômicas sobre aplicação da vinhaça por aspersão em cana-de-açúcar**. In: CONGRESSO NACIONAL DA STAB, 1986, Rio de Janeiro, 1986.

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

COELHO, S.T., VELAZQUEZ, S.M. S.G, SILVA, O.C. et al., Programa de uso racional de energia e fontes alternativas: PUREFA. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, **Anais**. 5., Campinas, 2004. Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022004000200039&lng=en&nrm=abn>. Acesso em: 21 Jun 2014.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Perfil do Setor do Açúcar e do Alcool no Brasil, safra 2009/2010**. Diretoria de Política Agrícola e Informações. Superintendência de Informações do Agronegócio, 2012.

CONAMA - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução CONAMA Nº 002, de 5 de junho de 1984, **Boletim de Serviço nº 921**, de 20/7/84, do Ministério do Interior, 1984.

CONAMA, - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução CONAMA Nº 382, de 26 de dezembro de 2006. Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas. **Publicação DOU nº 1**, de 02/01/2007, pág. 131.

COPAM - CONSELHO ESTADUAL DE POLÍTICA AMBIENTAL, Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável, Deliberação Normativa n.º 012/86, **Diário do Executivo**, Minas Gerais, 1986.

COPAM - CONSELHO ESTADUAL DE POLÍTICA AMBIENTAL, Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável Deliberação Normativa nº 164, de 30 de março de 2011. Estabelece normas complementares para usinas de açúcar e destilarias de álcool, referentes ao armazenamento e aplicação de vinhaça e águas residuárias no solo agrícola. **Diário do Executivo**, Minas Gerais, 12/04/2011)

CORAZZA, R.I. Impactos ambientais da vinhaça: controvérsias científicas e lock-in na fertirrigação?. In XLIV CONGRESSO DA SOBER “Questões Agrárias, Educação no Campo e Desenvolvimento” (pp. 1–16). Ceará, 2006.

CORTEZ, L.A.B. FREIRE, W.J. ROSILLO-CALLE, F., Biodigestion of Vinasse in Brazil. **International Sugar Journal**, vol.100, nº1196, 1998.

CORTEZ, L.A.B., BROSSARD PÉREZ, L.E., Experiences on vinasse disposal: part iii: combustion of vinasse -# 6 fuel oil emulsions. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, 14(1), 1997.

CRUZ, L. F. L. S. Viabilidade técnica/econômica/ambiental das atuais formas de aproveitamento da vinhaça para o Setor Sucroenergético do Estado de São Paulo. 2011.

Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

DATAGRO. **Banco de dados 2012**. Disponível em: <<http://www.datagro.com.br/>>. Acesso em: 20 jun 2013.

DUBEY, R.S. Distillery Effluents-Treatment and Disposal. **Sugar News Ann.** Number 6, pp. 9-26, 1974.

ELETROBRÁS. **Manual de Pequenas Centrais Termoeletricas**, 2 vol., Rio de Janeiro, 1985.

ELETROBRÁS. **Inventário de emissões de gases de efeito estufa, ano base 2011**. Junho de 2012.

ELIA NETO, A & NAKAHODO, T., **Caracterização físico-química da vinhaça**- projeto nº 9500278. Relatório Técnico da Seção de Tecnologia de Tratamento de Águas do Centro de Tecnologia Copersucar, 26p, Piracicaba, 1995.

ELIA NETO, A & ZOTELLI, L. C. Caracterização das águas residuárias para reúso agrícola. Piracicaba, SP: Centro de Tecnologia Canavieira (CTC), 2008. 31p.

ELIA NETO, A., Biogás a partir de Vinhaça Vinhaça, In 2ª. Conferência Biogás e Bioeletricidade 2014. São Paulo, 2014.

EU. Directiva 2009/28/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 23 de Abril de 2009 relativa à promoção da utilização de energia proveniente de fontes renováveis que altera e subsequentemente revoga as Directivas 2001/77/CE e 2003/30/CE L 140/16 PT. **Jornal Oficial da União Europeia**. Bruxelas, 05 jun 2009.

FERREIRA, E. S.; MONTEIRO, A. O. Efeitos da aplicação da vinhaça nas propriedades químicas, físicas e biológicas do solo. **Boletim Técnico Copersucar**, Piracicaba, v.37, p.3-7, 1987.

FNR - FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE. Guia Prático do Biogás. Geração e Utilização. Ministério da Nutrição, Agricultura e Defesa do Consumidor da Alemanha. 5ª edição, Gülzow, 2010.

GEA Wiegand GmbH. Evaporators for Stillage Concentration Evaporation for Stillage Concentration. Ettlingen, 2007.

GLOEDEN, E., CUNHA, R.C.A., FRACCAROLI, M.J.B., CLEARY, R.W., The Behaviour of Vinsasse Constituents in the Unsaturated and Saturated Zones in the Botucatu Aquifer Recharge Area. **Water Science Technology**. vol.24, nº11, p.147-157, 1991.

GLÓRIA, N.A.; MAGRO, J.A., Utilização agrícola de resíduos da usina de açúcar e destilaria na Usina da Pedra, In: SEMINÁRIO COPERSUCAR DA AGROINDÚSTRIA AÇUCAREIRA, 4., Águas de Lindóia, 1976, **Anais**, São Paulo, Copersucar, p. 163-180, 1977.

GLÓRIA, N.A.; ORLANDO FILHO, J., Aplicação de vinhaça como fertilizante. **Boletim Técnico do Planalsucar**, Araras, v.5, p.5-38, 1983.

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

GNC Galileio S.A, *Advantages of FEMTOBOX*, 2014.

GOLDEMBERG. J., COELHO S.T., NASTARI P.M., LUCON O. Ethanol learning curve-the Brazilian experience. **Biomass & Bioenergy**, vol.26, p 301– 304, 2004.

GUPTA, S.C.; SHULA, J.P. AND SHUKLA, N.P., Recovery of Crude Potassium Salts from Spent Wash of Molasses Distilleries by Fluidized Incineration, 1968-**Proceedings of the 36th Annual Conv. Sugar Technology Ass.**, India, XXXXIII-1 to XXXXIII-7, 1968.

HASSUDA, S., **Impactos da infiltração da vinhaça de cana no aquífero de Bauru**, Dissertação (Mestrado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) - Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo, São Paulo, 92p, 1989.

HIRATA, R. C. A., BASTOS, C. R. A., ROCHA, G. A., GOMES, D. C. AND IRITANI, M. A., Groundwater pollution risk and vulnerability map of the state of São Paulo, Brazil. **Water Science and Technology**, v.24, n.11, p.159-169, 1991.

IPCC, **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). Published: IGES, Japan, 2006.

ISENMANN, Armin Franz. **Operações unitárias na indústria química**. Timóteo/MG, 2013.

JORNALCANA. Usina Cerradinho concentra vinhaça com sucesso, Ribeirão Preto, SP, Julho/2009.

JORNALCANA. Vinhaça gera economia e melhora rendimento. Ribeirão Preto, SP, Junho/2007. p. 68.

JADOSKI, S.O.; SAITO, L.R.; Características da lixiviação de nitrato em áreas de agricultura intensiva, Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia v3 n1 Print-ISSN 1983-6325 (On line) e-ISSN 1984-7548, Jan.- Abr. 2010.

KLEIN, F. B.; FILHO, H. F.; ALMEIDA, P. **Análise sobre o uso da Norma Técnica P4 . 231 da CETESB como preventiva aos impactos ambientais causados pela vinhaça**. 1–16. 2008

LEME, E.J.A.; ROSENFELD, v.; BAPTISTELLA, J.R. Aplicação de vinhaça em cana-de-açúcar por aspersão. **Boletim Técnico Planalsucar**, Série B, v.1, n.4, p.3-42, 1979.

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

LISBOA, C. C., BUTTERBACH-BAHL, K., MAUDER, M. and KIESE, R. Bioethanol production from sugarcane and emissions of greenhouse gases – known and unknowns. **GCB Bioenergy**, 3: 277–292, 2011.

LORENCINI, Vanessa da Silva. **Estudo econômico das diferentes formas de transporte de vinhaça em fertirrigação na cana-de-açúcar**. Dissertação (Mestrando em Agronomia) -

Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias ,Universidade Estadual Paulista “Julio De Mesquita Filho.”, Jaboticabal, 2009.

LUDOVICE, M.T.F. **Estudo do efeito da vinhaça infiltrada em canal condutor de terra sobre o lençol freático**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade de Campinas, Campinas, 1997

LYRA, M. R. C. C., ROLIM, M. M., & SILVA, J. A. A., Topossequência de solos fertigados com vinhaça: contribuição para a qualidade das águas do lençol freático. **Rev. bras. eng. agríc. ambient**, vol.7, no.3, Campina Grande Sept./Dec.2003.

MACEDO, I. C., SEABRA, J. E. A., & SILVA, J. E. A. R., Greenhouse gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: The 2005/2006 averages and a prediction for 2020. **Biomass and Bioenergy**, 32(7), 582–595, 2008.

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

MATIOLI, C.S.; MENEZES, J.A. Otimização dos sistemas de aplicação de resíduos líquidos na lavoura. In: REUNIÃO TÉCNICA AGRONÔMICA, Piracicaba, 1984. **Anais**. Piracicaba: Copersucar, 1984. p.67-70.

MCTI - MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO. Secretaria de Políticas e Programas de Pesquisa e Desenvolvimento. Coordenação Geral de Mudanças Globais de Clima. Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil. Brasília, 2013.

MME – MINISTERIO DE MINAS E ENERGIA. **Balanço Energético Nacional 2012**, Empresa de Pesquisa Energética – EPE, 2013.

MONTEIRO, C.E. Brazilian experience with the disposal of waste water from the cane sugar and alcohol industry. **Process Biochemistry**, 10(9):33-41, Nov. 1975.

MORENO, M., COELHO, S.T., Biodigerir e concentrar a vinhaça, uma solução económica, energética e ambiental, **Biomais**, vol.2, p. 64 - 70, 2014.

NEM. **Spent Wash Treatment with Energy Recovery by NEM**. Artigo técnico fornecido pela NEM, p.1-7, 2007

NOLASCO, J.J. Eficiência de processo térmico para mostos à base de caldo de cana e melão na produção de bioetanol. Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade de Campinas, Campinas, 2010.

OLIVEIRA, B. G.; CARVALHO, J. L. N.; CERRI, C. E. P., CERRI, C. C.; FEIGL, B. J.; Soil greenhouse gas fluxes from vinasse application in Brazilian sugarcane areas. **Geoderma**, 200-201, 77–84, 2013.

OLIVEIRA, B.G., **Vinhaça da cana-de-açúcar: fluxos de gases de efeito estufa e comunidades de archaea presente no sedimento do canal de distribuição**. Dissertação de Mestrado, ESALQ, Piracicaba, 2010.

ORLANDO FILHO, J.; SILVA, G.M.A.; LEME, E.J.A. Utilização agrícola dos resíduos da agroindústria canavieira. In: PROGRAMA NACIONAL DE MELHORAMENTO DA CANA-DE-AÇÚCAR. Vinhaça de cana-de-açúcar Nutrição e adubação da cana-de-açúcar no Brasil. Piracicaba, 1983. cap.10, p. 229-264. (Coleção Planalsucar, 2).

PAREDES, Débora da Silva. **Emissão de óxido nitroso e metano proveniente da vinhaça em lagoas e canais de distribuição e após fertirrigação.** 2011. 90f. Dissertação (Mestrado em Agronomia, Ciência do Solo) - Instituto de Agronomia, Departamento de Solos, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2011.

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

PERERA, C.J.G.H., *Concentración y combustión de vinazas, San Miguel de Tucumán*, República Argentina, 2009.

PINTO, C.P. **Tecnologia da Digestão Anaeróbia da Vinhaça e Desenvolvimento Sustentável.** Dissertação (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos) - Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas . Campinas/SP: [s.n.], 1999.

POMPERMAYER R. S., PAULA JR D.R. Estimativa do potencial brasileiro de produção de biogás através da biodigestão da vinhaça e comparação com outros energéticos. In: 3º ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, **Anais**, Setembro, 2000.

PROCKNOR, C. Energia elétrica a partir vinhaça. UNICA, 2009. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/convidados/25641156920337715081/energia-eletrica-a-partir-da-vinhaca/>>. Acesso em: 10 dez 2014.

RIGHETTO, A.M. CRUZ, R.L NOGUEIRA, M.A. Experimental Investigation of Soil and Groundwater Impacts Caused by Vinasse Disposal. Water Science Technology, vol.24, nº11, p.77-85, 1991.

ROCHA, M. H., **Uso da Análise do Ciclo de Vida para Comparação do Desempenho Ambiental de Quatro Alternativas para Tratamento da Vinhaça**, Itajubá, 234p. Dissertação (Mestrado em Conversão de Energia) – Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, 2009.

RODRIGUES, A.H. **Três patamares tecnológicos na produção de etanol: a usina do proálcool, a usina atual e a usina do futuro.** 2008. 160 p. Tese (Doutorado em Ciências Sociais em Instituições, Mercado e Regulação). Curso de Pós-Graduação em Desenvolvimento, Agricultura e Sociedade, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2008.

ROSSETTO, A. J. Utilização Agronômica Dos Subprodutos E Resíduos Da Indústria Açucareira E Alcooleira. **Paranhos, S.B. (ed.). Cana-de-açúcar: cultivo e utilização**, Campinas: Fundação Cargill, 1987. 435-504.

SALOMON, Karina Riberio. **Avaliação Técnico-Econômica e Ambiental da Utilização do Biogás Proveniente da Biodigestão da Vinhaça em Tecnologias para Geração de**

Eletricidade, 2007 Itajubá, 219 p. Tese (Doutorado em Conversão de Energia) Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2007.

SÃO PAULO (Estado), Lei nº 6.134, de 02/06/1988 Dispõe sobre a preservação dos depósitos naturais de águas subterrâneas do Estado de São Paulo e dá outras providências. Diário Oficial do Estado, São Paulo, 3 de Junho de 1988.

SCHOPF, N.; ERBINO, P. Combustion Technology for LCV Fuels like Vinasse in the Sugar Industry SAACKE Swirl Burner SSBS-LCG. In: WORKSHOP OF CO-PRODUCTS INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS, Maceió, Alagoas, 2006. Proceedings do ISSCT Co Products Workshop. Proceedings in CD, Maceio, 12-16 of November, 2006.

SEABRA, J.E.A. **Análise de opções tecnológicas para uso integral da biomassa no setor de cana-de-açúcar e suas implicações**. Tese (Doutorado em Planejamento de Sistemas Energéticos)- Programa de Pós-graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

SGC - SWEDISH GAS TECHNOLOGY CENTRE LTD. **Basic data on biogas**, 2nd ed., p. 23, Munken, 2012.

SILVA, M. A. S.; GRIEBELER, N. P.; BORGES, L. C. Uso de vinhaça e impactos nas propriedades do solo e lençol freático. **Rev. bras. eng. agríc. ambient.**, vol.11, no.1, Campina Grande, Jan./Feb., 2007.

SILVA, A. **Vinhaça concentrada de cana-de-açúcar: monitoramento das propriedades químicas do solo e mineralização líquida de nitrogênio**. 2012. 109 f. Tese (Doutorado) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

SOARES, L.H.B. *et. al.*. Mitigação das emissões de gases efeito estufa pelo uso de etanol da cana-de-açúcar produzido no Brasil. Circular Técnica, 27. Brasília: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2009.

SOUZA, M. E., FUZARO, G. & POLEGATO, A. R. Thermophilic Anaerobic Digestion of Vinasse in Pilot Plant UASB Reactor. **Water Science and Technology**, v. 25, n. 7, p. 191-200, 1992.

SOUZA, S. A. V., Disponibilidade Vinhaça: o avanço das tecnologias de uso. In: MACEDO, I. C. (org.), **A energia da cana-de-açúcar: doze estudos sobre a agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil e a sua sustentabilidade**. UNICA, São Paulo, 2005.

ONU – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. UNFCCC/CCNUCC. ACM0014 “Treatment of wastewater” Version 05.0.0, 2012.

UNICA. **Histórico de produção e moagem**. Disponível em: <<http://www.unicadata.com.br/unicadata>>. Acesso em: 02 dez 2013.

URBAN, W.; GIROD, K.; LOHMANN, H. Technologien und Kosten der Biogasaufbereitung und Einspeisung in das Erdgasnetz. Ergebnisse der Markterhebung 2007–2008. 123 s. Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik, Oberhausen, German, 2009.

USA. Public Law 110-140. **Energy Independence and Security Act**, Signed on December 19, 2007 by President Bush. City of Washington, 2007.

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

WORKSHOP TECNOLÓGICO VINHAÇA, **Termo de Referência para o Workshop Tecnológico Vinhaça**, Campus de Jaboticabal, Faculdade de Ciências Agrárias e Vetereninarias, Departamento de Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Set/2007.

APÊNDICE A - Cálculo do volume de exaustão para caldeiras queimando vinhaça concentrada e gás Natural

Para os cálculo da razão estequiométrica entre a massa de ar fornecido e massa de combustível (AF_{st}), apresenta-se os cálculos organizados na Tabela 51, mostrando as equações de combustão de cada um dos componentes da vinhaça concentrada (65°Bx) para obter combustão completa (estequiométrica).

Tabela 51. Volume estequiométrico de gases de exaustão da combustão de vinhaça 65°Bx.

Combustível	Composição mássica	Equações de combustão	Oxigênio necessário por unidade de massa de comb.(kg)	Produto por unidade de massa de comb.
C	0,2136	$C+O_2=CO_2$ $12+32=44$	$0,2136 (32/12) = 0,5696$	$0,2136 (44/12) = 0,7832 \text{ kgCO}_2$
H ₂	0,0335	$2H_2+O_2=2H_2O$ $4+32=36$	$0,0335 (32/4) = 0,268$	$0,0335 (36/4) = 0,3015 \text{ kgH}_2\text{O}$
O ₂	0,2504	-	-0,2504 (Por ser parte do combustível)	-
N ₂	0,0126	-	-	0,0126 kgN ₂
S	0,0083	$S+O_2=SO_2$ $32+32=64$	$0,0083(32/32) = 0,0083$	$0,0083 (64/32) = 0,0166 \text{ kgSO}_2$
Cinzas	0,1316	-	-	-
Água	0,3500	-	-	0,3500
1			Total O ₂ = 0,5955	

Fonte: autor.

O oxigênio estequiométrico necessário por unidade de massa de combustível: 0,5955kgO₂. Assim, o ar teórico necessário por unidade de massa de combustível:

$$\frac{0,5955}{0,233} = 2,556 \text{ kg}$$

Obs: O ar tem 23,3% de oxigênio em composição mássica.

O nitrogênio estequiométrico (teórico) associado com o ar teórico necessário.

$$2,556 \times 0,767 = 1,96 \text{ kg}$$

Obs: O ar tem 76,7% de nitrogênio em composição mássica.

O nitrogênio presente nos produtos de combustão é:

$$1,96 + 0,0126 = 4,973$$

Relação $AF_{st} = 2,556$

A seguir, calcula-se a relação entre a massa de ar real fornecido e a massa de vinhaça combustível (AF_{real}) para um excesso de 20% de ar. Para isto, determina-se a composição volumétrica em base seca e úmida dos produtos de combustão. Para o caso de fornecer 20% de ar em excesso (ε):

$$AF_{real} = \varepsilon AF_{st} + AF_{st}$$

$$AF_{real} = 0,2 \times 2,556 + 2,556 = 3,067$$

Quantidades de nitrogênio e oxigênio associados com quantidade de ar real:

$$N_2 = 0,767 \times 3,067 = 2,352 \text{ kg}$$

$$O_2 = 0,233 \times 3,067 = 0,714611 \text{ kg}$$

Nitrogênio nos produtos de combustão:

$$N_2 = 2,352 + 0,0126 = 2,365 \text{ kg}$$

Excesso de oxigênio fornecido:

$$\varepsilon O_2 = 0,715 - 0,596 = 0,119 \text{ kg}$$

A seguir, mostram-se na Tabela 52 os produtos da combustão da vinhaça, e sua composição mássica e volumétrica em base seca e úmida.

Tabela 52. Composição mássica e volumétrica em base seca e úmida dos produtos da combustão da vinhaça concentrada.

Produto	Massa/ kgComb.	%massa	Massa molecular	moles/ kgComb.	%volume
CO ₂	0,7832	$\frac{0,7832}{3,9353} = 0,20$	44	$\frac{783,2}{44} = 17,8$	$\frac{17,8}{142,43} = 0,13$
H ₂ O	0,3015 + 0,3500 = 0,6515	$\frac{0,6515}{3,9353} = 0,17$	18	$\frac{651,5}{18} = 36,19$	$\frac{36,19}{142,43} = 0,25$
SO ₂	0,0166	$\frac{0,0166}{3,9353} = 0,004$	64	$\frac{16,6}{64} = 0,26$	$\frac{0,26}{142,43} = 0,002$
O ₂	0,119	$\frac{0,119}{3,9353} = 0,03$	32	$\frac{119}{32} = 3,72$	$\frac{3,72}{142,43} = 0,03$
N ₂	2,365	$\frac{2,365}{3,9353} = 0,60$	28	$\frac{2.365}{28} = 84,46$	$\frac{84,46}{142,43} = 0,59$
TOTAL	3,9353	1		142,43	1

Fonte: autor.

Queimando 1 kg de vinhaça 65 °Bx se obtém 142,43 moles de gás de exaustão, que em condições normais corresponderia a **3,19 Nm³**

Realizam-se, a seguir, os mesmos cálculos anteriores para o gás natural:

Tabela 53. Volume estequiométrico de gases de exaustão da combustão de gás natural

Combustível	Composição mássica	Equações de combustão	Oxigênio necessário por unidade de massa de comb.	Produto por unidade de massa de comb.
C	0,75	$C+O_2=CO_2$ $12+32=44$	$0,75 (32/12) = 2 \text{ kg}$	$0,75 (44/12) = 2,75\text{kgCO}_2$
H ₂	0,25	$2H_2+O_2=2H_2O$ $4+32=36$	$0,25 (32/4) = 2\text{kg}$	$0,25 (36/4) = 2,25\text{kgH}_2O$
1			Total O ₂ = 4 kg	

Fonte: autor.

Oxigênio estequiométrico necessário por unidade de massa de combustível: 4 kgO₂

Ar teórico necessário por unidade de massa de combustível:

$$\frac{4}{0,233} = 17,17 \text{ kg}$$

Nitrogênio estequiométrico (teórico) associado com o ar teórico necessário.

$$17,17 \times 0,767 = 13,17 \text{ kg}$$

Para o caso de fornecer 10% de ar em excesso (ε):

$$AF_{real} = \varepsilon AF_{st} + AF_{st}$$

$$AF_{real} = 0,1 \times 17,17 + 17,17 = 18,887$$

Quantidades de nitrogênio e oxigênio associados com quantidade de ar real.

$$N_2 = 0,767 \times 18,88 = 14,48 \text{ kg}$$

$$O_2 = 0,233 \times 18,88 = 4,4 \text{ kg}$$

Excesso de oxigênio fornecido:

$$\varepsilon O_2 = 4,4 - 4 = 0,4 \text{ kg}$$

A seguir, mostram-se na Tabela 54 os produtos da combustão do gás natural, e sua composição mássica e volumétrica em base seca e úmida.

Tabela 54. Composição mássica e volumétrica em base seca e úmida dos produtos da combustão gás natural.

Produto	Massa/ kgComb.	%massa	Massa molecular	moles/ kgComb.	%volume
CO ₂	2,75	$\frac{2,75}{19,88} = 0,14$	44	$\frac{2.750}{44} = 62,5$	$\frac{62,5}{717,14} = 0,09$
H ₂ O	2,25	$\frac{2,25}{19,88} = 0,11$	18	$\frac{2.250}{18} = 125$	$\frac{125}{717,14} = 0,17$
O ₂	0,4	$\frac{0,4}{19,88} = 0,02$	32	$\frac{400}{32} = 12,5$	$\frac{12,5}{717,14} = 0,02$
N ₂	14,48	$\frac{14,48}{19,88} = 0,73$	28	$\frac{14.480}{28} = 517,14$	$\frac{517,14}{717,14} = 0,72$
TOTAL	19,88	1		717,14	1

Fonte: autor.

Queimando 1 kg de gás natural se obtém 717,14 moles de gás de exaustão, que em condições normais corresponderia a 16,06 Nm³.

Devido a que a massa específica do gás natural em condições normais é 0,78 kg/m³ e o volume utilizado deste combustível é de 0,02 Nm³ por cada kg de vinhaça com 65°Bx,

$$V_{Ex/V4^{\circ}Bx} = m_{65^{\circ}Bx/V4^{\circ}Bx} \times (v_{Ex/kg65^{\circ}Bx} + v_{GN/kg65^{\circ}Bx} \times \rho_{GN} \times v_{Ex/kgGN}) \quad \text{Equação 54}$$

$$V_{Ex/ano} = v_{Ex/V4^{\circ}Bx} \times V_{4^{\circ}Bx/ano} \quad \text{Equação 55}$$

Onde:

Dados de entrada			
Símbolo	Significado	Valor	Fonte
$V_{4^{\circ}Bx/ano}$	Volume de vinhaça 4°Bx produzido por ano	960.000 m ³	Tabela 2
$m_{65^{\circ}Bx/V4^{\circ}Bx}$	Massa de vinhaça com 65°Bx por m ³ de vinhaça 4°Bx	62,4 kg/m ³	Tabela 15
$V_{GN/kg65^{\circ}Bx}$	Volume de GN por cada kg de vinhaça com 65°Bx	0,02 Nm ³ /kg	SAACKE, 2013
ρ_{GN}	Massa específica do gás natural	0,78 kg/Nm ³	
$v_{Ex/kgGN}$	Volume de exaustão por kg de gás natural queimado	16,06Nm ³ /kg	
$v_{Ex/kg65^{\circ}Bx}$	Volume de exaustão por kg de vinhaça 65°Bx queimado	3,19 Nm ³ /kg	
Resultados			
$v_{Ex/V4^{\circ}Bx}$	Volume de exaustão por m ³ de vinhaça 4°Bx	214,69 Nm ³ /m ³	Equação 54
$V_{Ex/ano}$	Volume de exaustão por ano	$206,1 \times 10^6$ Nm ³	Equação 55