

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

FACULDADE DE ECONOMIA, ADMINISTRAÇÃO E CONTABILIDADE DE
RIBEIRÃO PRETO

DEPARTAMENTO DE ADMINISTRAÇÃO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ADMINISTRAÇÃO DE
ORGANIZAÇÕES

GERALDO JOSE FERRARESI DE ARAUJO

Análise energética, ambiental e econômica de biodigestores de circulação interna e concentradores de vinhaça para geração de eletricidade, fertilizantes e créditos de carbono em diferentes cenários econômicos

Orientadora: Profa. Dra. Sonia Valle Walter Borges de Oliveira

Ribeirão Preto
2017

Prof. Dr. Marco Antônio Zago

Reitor da Universidade de São Paulo

Prof. Dr. Dante Pinheiro Martinelli

Diretor da Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto

Prof. Dr. Marcio Mattos Borges de Oliveira

Chefe do Departamento de Administração

GERALDO JOSE FERRARESI DE ARAUJO

Análise energética, ambiental e econômica de biodigestores de circulação interna e concentradores de vinhaça para geração de eletricidade, fertilizantes e créditos de carbono em diferentes cenários econômicos

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Administração de Organizações da Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Orientadora: Profa. Dra. Sonia Valle Walter Borges de Oliveira

Versão Corrigida. A original encontra-se disponível na FEA-RP/USP

Ribeirão Preto
2017

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

Araujo, Geraldo Jose Ferraresi

Análise energética, ambiental, e econômica de biodigestores de circulação interna e concentradores de vinhaça para geração de eletricidade, fertilizantes e créditos de carbono em diferentes cenários econômicos. Ribeirão Preto, 2017.

316 p.

Dissertação de mestrado apresentada à Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto da Universidade de São Paulo.

Orientadora: Profa. Dra. Sonia Valle Walter Borges de Oliveira.

1. Vinhaça, 2. Biodigestor IC, 3. Concentrador de vinhaça, 4. Análise Energética, Ambiental e Econômica.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: ARAUJO, Geraldo Jose Ferraresi

Título: Análise energética, ambiental, e econômica de biodigestores de circulação interna e concentradores de vinhaça para geração de eletricidade, fertilizantes e créditos de carbono em diferentes cenários econômicos.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Administração de Organizações da Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Aprovado em: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. _____

Instituição: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____ Assinatura: _____

AGRADECIMENTOS

Palavras não traduzem sentimentos. Tentarei aqui, portanto, mesmo que em vão, esprestar meus sinceros agradecimentos.

A Deus pela vida e oportunidade de poder chegar até aqui, e poder humildemente, contribuir com essa dissertação de mestrado para o campo das ciências da administração, meio ambiente e energia.

Como também aos senhores meus pais e aos meus irmãos, a Dona Marlene, Senhor Geraldo, Márcio e a Márcia que ao longo dessa jornada, me ofereceram a estrutura e o apoio necessários para chegar até o fim dessa pós graduação.

A Sra. Professora Doutora Sonia Valle Walter Borges de Oliveira, pela confiança e honra de sua preciosa orientação, que transpassaram muito além as páginas desta humilde dissertação, como também as contribuições superlativas do Professor Doutor Marcelo Zaiat do SHS da EESC/USP, o Prof. Dr. Marcos Fava Neves da FEA-RP/USP, o Prof. Dr. Jorge de Lucas Junior da FCAV/UNESP e o Prof. Dr. Marcio Mattos Borges de Oliveira da FEA-RP/USP para a confecção deste trabalho, foi uma honra contar com cientistas de altíssimo gabarito, de referência mundial em suas respectivas áreas. Não enxergo longo, mas com certeza estou sobre ombros de gigantes.

Ao grande amigo Humberto Alves Gonçalves, que foi minhas mãos e braços quando a tendinite atacou os dois braços, prejudicando a confecção desta dissertação, sem sua ajuda parte deste humilde trabalho não estaria escrito.

Aos Professores de Inglês Alexandre Magalhães, Marcelo Mendes, Iremar Dias e Wilson Silva, pela extraordinária ajuda no exame do TOEFL iBT, sem essa ajuda, o mestrado não seria possível.

Aos amigos de sala de aula Adhemar Filho, Fred Filho, Jose Augusto Moraes, Maria Angélica, Maxwell de Oliveira, Ricardo Gomes e Alex Barbi pelas parcerias e trabalhos em conjunto.

Aos amigos do Serviço de Pós-Graduação da FEA-RP, o Silvio, a Erika, o Tiago e o Matheus, obrigado pela paciência e ajuda ao longo desta pós-graduação.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, processo nº 134.193/20.156 pela bolsa de mestrado.

Por fim todas as palavras supracitadas não conseguem traduzir seus sentimentos de alegria e satisfação, muito obrigado a todos.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA: Agência Nacional de Águas

ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica

ANP: Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

BEM: Balanço Energético Nacional

BNDES: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social

CETESB: Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental

CONAB: Companhia Nacional de Abastecimento

CONAMA: Conselho Nacional do Meio Ambiente e Recursos Naturais

DBO: Demanda Bioquímica de Oxigênio

DQO: Demanda Química de Oxigênio

EGSB: *Expanded Granular Sludge Blanket* (Reator Anaeróbio de Leito Expandido)

EPE: Empresas de Pesquisas Energéticas

IC: *Internal Circulation Biodigester* (Biodigestor de Circulação Interna)

GEE: Gases de Efeito Estufa

O&M: Operação e manutenção

PCI: Poder Calorífico Inferior

pH: ponte Hidrogeniônica

TDH: Tempo de Detenção Hidráulica

TIR: Taxa Interna de Retorno

UASB: *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* (Reator Anaeróbico de Manta de Lodo)

UNICA: União da Indústria da Cana-de-açúcar

VPL: Valor Presente Líquido

RESUMO

ARAÚJO, G. J. F. **Análise energética, ambiental, e econômica de biodigestores de circulação interna e concentradores de vinhaça para geração de eletricidade, fertilizantes e créditos de carbono em diferentes cenários econômicos.** 2017. 316f. Dissertação (Mestrado em Administração de Organizações) - Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2017.

A vinhaça é um dos resíduos da produção de etanol, considerada de elevada capacidade poluidora. Estima-se que para cada litro de etanol produzido, produz-se entre 10 até 15 litros de vinhaça. Porém, este mesmo subproduto pode ser utilizado para geração de eletricidade, fertilizantes, biogás e obtenção de créditos de carbono a partir de biodigestores e concentradores. Logo, a vinhaça pode vir a contribuir para um incremento na geração de energia elétrica e de outros produtos para fomento de renda para o setor sucroenergético e resolver o problema ambiental no que se refere ao descarte *in natura*. Ante o exposto, justifica-se um estudo sobre a utilização da vinhaça, norteadas pela problemática: qual a viabilidade econômica, ambiental e energética da utilização do biodigestor IC, concentrador de vinhaça e o conjugado de ambos? O objetivo geral foi analisar a viabilidade energética, ambiental e econômica da utilização de vinhaça em concentradores, biodigestores IC e em ambos para geração de eletricidade, fertilizantes e créditos de carbono. Para responder à pergunta, a metodologia utilizada na pesquisa foi a análise de viabilidade econômica, aonde foi calculado o VPL, TIR, *payback* e o *payback* descontado. Sendo qual foi calculado o consumo anual de Diesel no transporte de vinhaça biodigerida e concentrada, balanço de energia no consumo de Diesel e gerada pelo biogás por ano, balanço de geração e consumo de eletricidade e equivalente populacional de geração de eletricidade de vinhaça e, por fim, a análise ambiental, aonde foi calculado o equivalente populacional de vinhaça biodigerida e concentrada, balanço de emissão e mitigação de NO_x, SO_x e CO₂ eq. pelo concentrador, transporte de vinhaça concentrada, ambas as três análises para uma faixa de produção de etanol de 500 até 4.000 m³/dia, como também para estados brasileiros produtores desse combustível. Como resultado pode-se constatar que os fertilizantes têm importância na viabilidade econômica dos biodigestores IC e concentradores de vinhaça, em cenários sem isenções tributárias e taxa mínima de atratividade 15% a.a. A eletricidade por si só terá viabilidade em cenário com baixa taxa mínima de atratividade de 11% e isenções fiscais. No que se refere a análise energética, destacam-se os resultados do biodigestor IC nas dimensões equivalente populacional e balanço de geração e consumo de eletricidade e na análise ambiental destaca-se o conjugado biodigestor IC e concentrador para as dimensões equivalente populacional e dióxido de carbono equivalentes emitidos e mitigados. Pode-se constatar a partir dos resultados alcançados e da revisão bibliográfica realizada os seguintes cenários desfavoráveis em potencial para reutilização de vinhaça: baixo preço do MWh tanto no ACR quanto no ACL, incipiência no mercado de eletricidade, elevado investimento em transmissão, ausência de políticas públicas de incentivo a utilização de matéria orgânica proveniente da agropecuárias, ausência de políticas públicas de incentivo a utilização de energias renováveis, experiências não exitosas pelas usinas de utilização de vinhaça para produção de biogás, biodigestores em processo de consolidação tecnológica, incapacidade de financiamento do setor sucroenergético, preço dos concentradores de vinhaça, omissão legislativa referente ao descarte de vinhaça e descapitalização das usinas sucroenergéticas.

Palavras-chave: Vinhaça. Biodigestor IC. Concentrador de vinhaça. Análise Energética, Ambiental e Econômica.

ABSTRACT

ARAÚJO, G. J. F. **Energy analysis, environmental, and economic issues of internal circulation bio-digesters and vinasse concentrators for electricity generation, fertilizer and carbon credit in different economic scenarios.** 2017. 316f. Master Science Dissertation – School of Economics, Business Administration and Accounting at Ribeirão Preto, University of São Paulo, Ribeirão Preto, 2017.

Vinasse is one of the residues from the production of ethanol, considered polluting high capacity. It is estimated that for every liter of ethanol produced, produces between 10 to 15 liters of vinasse. However, this same byproduct can be used for generating electricity, fertilisers, biogas and obtaining carbon credits from bio-digesters and concentrators. Soon, vinasse might contribute to an increase in the generation of electricity and other products to promote income for the sugar-energy sector and solve the environmental problem as regards disposal in natura. Against the above, if a study on the use of vinasse, guided by the problem: what is the economic viability, environmental and energy use of the biodigester, vinasse concentrator and the conjunction of both? The overall objective was to analyze the energy, environmental and economic feasibility of the use of vinasse in hubs, biodigestors IC and in both for electricity generation, fertilizer and carbon credits. To answer, the methodology used in the research was the economic feasibility analysis, where it was calculated the NPV, IRR, payback and discounted payback. Being what was calculated the annual Diesel consumption of biodigerida and concentrated vinasse, energy balance in the consumption of Diesel and biogas generated per year, generation and balance electricity consumption and electricity generation population equivalent of vinasse and, finally, the environmental analysis, where it was calculated the population equivalent of biodigerida and concentrated vinasse emission and mitigation balance of NO_x, SO_x and CO₂ eq. by concentrator, concentrated vinasse transport, both three analysis for a range of ethanol production from 500 to 4,000 m³/day, as well as to the Brazilian States that fuel producers. As a result one can note that fertilizers have importance in the economic viability of bio-digesters IC and vinasse concentrators, in scenarios without tax exemptions and minimum rate of 15% p.a. attractiveness The electricity itself will have viability in scenario with lower minimum rate of 11% attractiveness and tax exemptions. With regard to energy analysis, include the results of the biodigester IC equivalent dimensions of population and balance of generation and electricity consumption and environmental analysis is the conjugate biodigester IC and concentrator for the dimensions and equivalent carbon dioxide equivalent emitted and mitigated. You can see from the results achieved and the literature review carried out the following unfavourable scenarios on potential for reuse of vinasse: low price of MWh in both the ACR and the ACL, the effects on the market of electricity, high investment in transmission, absence of public policies to encourage the use of organic matter from the cattle-breeding, absence of public policies to encourage the use of renewable energy , not successful experiences through the use of vinasse plants for production of biogas, biodigesters consolidation technology, inability to finance the sugar ethanol sector, price of vinasse concentrators, legislative omission concerning the discharge of vinasse and decapitalization of sucroenergeticas plants.

Keywords: Vinasse. Biodigester IC. Vinasse concentrator. Energy, environmental and economic analysis.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 1 – As três dimensões do desenvolvimento sustentável (DS) | 35 |
| Figura 2 – Cadeia produtiva da cana-de-açúcar no Brasil | 61 |
| Figura 3 – Etapas do processo da biodigestão anaeróbia..... | 91 |
| Figura 4 – Concentrador de vinhaça Citrotec | 116 |
| Figura 5 - Concentrador de vinhaça Thermally Accelerated Short Time Evaporator Dedini | 117 |
| Figura 6 – Balanço de geração e consumo de eletricidade (MWh/ano) | 179 |
| Figura 7 – Equivalente populacional (habitantes)..... | 180 |
| Figura 8 – Consumo de Diesel anual com o transporte de vinhaça concentrada e biodigerida (m ³ /ano)..... | 185 |
| Figura 9 – Balanço de energia por ano (TJ/ano)..... | 187 |
| Figura 10 – Equivalente populacional (habitantes)..... | 189 |
| Figura 11 – Balanço de emissão e mitigação de CO ₂ eq (t/ano)..... | 191 |
| Figura 12 – Balanço de emissão e mitigação de NO _x (t/ano) | 193 |
| Figura 13 – Balanço de emissão e mitigação de SO _x (t/ano)..... | 194 |
| Figura 14 – Valor presente líquido do cenário I | 198 |
| Figura 15 – Taxa interna de retorno do cenário I..... | 200 |
| Figura 16 – <i>Payback</i> do cenário I | 201 |
| Figura 17 – <i>Payback</i> descontado do cenário I | 202 |
| Figura 18 – Valor presente líquido do cenário II..... | 203 |
| Figura 19 – Taxa interna de retorno do cenário II | 204 |
| Figura 20- <i>Payback</i> do cenário II..... | 205 |
| Figura 21– Valor presente líquido do cenário III..... | 207 |
| Figura 22 – Taxa interna de retorno do cenário III..... | 208 |
| Figura 23 – <i>Payback</i> do cenário III..... | 209 |
| Figura 24 – <i>Payback</i> descontado do cenário III..... | 210 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Quadro 1 – Modificação na sustentabilidade em decorrência do aumento na utilização de energias renováveis..... | 39 |
| Quadro 2 – Principais diferenças entre o ACR e o ACL..... | 47 |
| Quadro 3 – Estratégia ambiental especializada | 69 |
| Quadro 4 – Uso potencial da vinhaça: vantagens e desvantagens..... | 88 |
| Quadro 5 – Aspectos políticos, legais, econômicos, sociais e tecnológicos de vinhaça | 89 |
| Quadro 6 – Gerações de reatores anaeróbios..... | 93 |
| Quadro 7 – Características dos ciclos de combustão Otto e Diesel..... | 109 |
| Quadro 8 – Variáveis independentes, dependentes e moderadoras da pesquisa | 121 |
| Quadro 9 – Resumo de objetivos de trabalho, proposições, embasamento teórico, métodos de coleta e análises a serem realizadas | 177 |
| Quadro 10 – Desempenho energético do concentrador, biodigestor IC e conjugado biodigestor e concentrador..... | 187 |
| Quadro 11 – Desempenho ambiental do concentrador, biodigestor IC e conjugado biodigestor e concentrador..... | 196 |
| Quadro 12 - Comparação de viabilidade energética, ambiental e econômica entre Nogueira et al. (2015), Moraes et al. (2014) e Poveda (2014) e o autor da presente dissertação | 222 |
| Quadro 13 – Políticas públicas para vinhaça ante a viabilidade ou inviabilidade econômica e ambiental | 224 |
| Quadro 14 – Viabilidade econômica do concentrador de vinhaça, biodigestor IC e do conjugado de biodigestor IC e concentrador para diferentes cenários econômicos | 227 |
| Quadro 15 – Análise energética do concentrador de vinhaça, biodigestor IC e do conjugado de biodigestor IC | 228 |
| Quadro 16 – Análise ambiental do concentrador de vinhaça, biodigestor IC e do conjugado de biodigestor IC | 228 |
| Quadro 17 – BNDES - Finem Geração de Energia..... | 299 |
| Quadro 18 – BNDES -Finem Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos..... | 300 |
| Quadro 19 - BNDES Finem - Aquisição de Bens de Capital..... | 301 |
| Quadro 20 - BNDES Finame - BK Aquisição e Comercialização | 302 |
| Quadro 21 – Desenvolve SP - Linha FIP Simplificado..... | 303 |
| Quadro 22 - Desenvolve SP - Linha Economia Verde Máquinas | 304 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Quadro 23 - Desenvolve SP - Linha Economia Verde | 305 |
| Quadro 24 - Banco de Desenvolvimento do Espírito Santo e BNDES - Linha BNDES Automático/ABC Integração..... | 306 |
| Quadro 25 - BNDES e Banco de Desenvolvimento do Espírito Santo - Linha BNDES Automático/ABC Florestas 2016/2017 | 307 |
| Quadro 26 - BNDES/ Banco de Desenvolvimento do Espírito Santo - Linha BNDES Automático/ABC Recuperação 2016/2017..... | 308 |
| Quadro 27 - Banco de Desenvolvimento do Extremo Sul - Linha MPME..... | 309 |
| Quadro 28 - Banco de Desenvolvimento do Extremo Sul - Linha Média Grande e Grande Empresa..... | 310 |
| Quadro 29 - Banco de Desenvolvimento do Nordeste - Linha Programa de Apoio ao Desenvolvimento da Agroindústria do Nordeste | 311 |
| Quadro 30 - Banco de Desenvolvimento do Nordeste - Linha Proinf | 312 |
| Quadro 31 - Banco de Desenvolvimento do Nordeste - Linha Pro infra..... | 313 |
| Quadro 32 - Banco de Desenvolvimento do Nordeste - Linha Programa de Apoio ao Setor Industrial do Nordeste..... | 314 |
| Quadro 33 - Banco de Desenvolvimento do Nordeste - Linha Programa de Apoio ao Desenvolvimento Rural do Nordeste | 315 |
| Quadro 34 - Banco de Desenvolvimento do Nordeste - Linha Programa de Aplicação de Recursos Obrigatórios..... | 316 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 1 – Matriz consolidada das oportunidades de projetos de MDL – Energia, subprodutos sólidos, eficiência energética e florestas | 55 |
| Tabela 2 – Características físico-químicas de vinhaça de diferentes matérias primas..... | 80 |
| Tabela 3 – Eficiência do reator EGSB para tratamento de determinadas águas residuárias..... | 96 |
| Tabela 4 – Eficiência do reator de leito fixo para tratamento de determinadas águas residuárias..... | 99 |
| Tabela 5 – Composição média do biogás de diferentes subprodutos orgânicos | 103 |
| Tabela 6 – Equivalência entre um m ³ de biometano e outros energéticos | 103 |
| Tabela 7 – Comparação entre grupos geradores a ciclos Otto e Diesel | 109 |
| Tabela 8 – Comparação entre as diferentes tecnologias compatíveis com o biogás | 114 |
| Tabela 9 – Usinas com concentradores de vinhaça | 118 |
| Tabela 10 – Dados de safra e insumos agroindustriais..... | 128 |
| Tabela 11 – Dados referentes aos modais de transporte de vinhaça <i>in natura</i> | 131 |
| Tabela 12 – Dados referentes aos modais de transporte de vinhaça concentrada | 136 |
| Tabela 13 – Balanço de geração e consumo de eletricidade (MWh/ano) | 179 |
| Tabela 14 – Equivalente populacional (habitantes)..... | 180 |
| Tabela 15 – Potencial incremento de eletricidade e equivalente populacional por estado a partir de vinhaça | 181 |
| Tabela 16 – Potencialidade de substituição do bagaço e produção de etanol celulósico | 182 |
| Tabela 17 – Potencialidade de substituição do bagaço e produção de etanol celulósico por estado brasileiro..... | 182 |
| Tabela 18 – Potencial incremento de substituição do Diesel, gasolina e etanol por estado a partir de vinhaça | 183 |
| Tabela 19 – Consumo de Diesel anual com o transporte de vinhaça concentrada e biodigerida (m ³ /ano)..... | 185 |
| Tabela 20 – Geração de eletricidade no biodigestor IC com completa substituição de Diesel no transporte de vinhaça biodigerida..... | 186 |
| Tabela 21 – Balanço de energia gerada e consumida (TJ/ano) | 186 |
| Tabela 22 – Equivalente populacional (habitantes)..... | 189 |
| Tabela 23 – Balanço de emissão e mitigação de CO ₂ eq (t/ano)..... | 190 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 24 – Mitigação de emissão de CO ₂ eq. (t/ano) pelo biodigestor e concentrador para cada estado da com potencial ganho no mercado de créditos de carbono | 192 |
| Tabela 25 – Balanço de emissão e mitigação de NO _x (t/ano)..... | 193 |
| Tabela 26 – Balanço de emissão e mitigação de SO _x (t/ano)..... | 194 |
| Tabela 27 – Mitigação de emissão de SO _x pelo biodigestor IC por estado da união (t/ano) . | 195 |
| Tabela 28 – Valor presente líquido do cenário I..... | 198 |
| Tabela 29 – Taxa interna de retorno do cenário I | 199 |
| Tabela 30 – <i>Payback</i> do cenário I..... | 201 |
| Tabela 31 - <i>Payback</i> descontado do cenário I..... | 202 |
| Tabela 32 – Valor presente líquido do cenário II..... | 203 |
| Tabela 33 – Taxa interna de retorno do cenário II..... | 204 |
| Tabela 34 – <i>Payback</i> do cenário II..... | 205 |
| Tabela 35 – Valor presente líquido do cenário III | 206 |
| Tabela 36 – Taxa interna de retorno do cenário III..... | 207 |
| Tabela 37 – <i>Payback</i> no cenário III | 208 |
| Tabela 38 – <i>Payback</i> descontado do cenário III | 209 |
| Tabela 39 – Resultados de avaliação energética, ambiental e econômica realizada por Nogueira et al. (2015), Moraes et al. (2014), Poveda (2014) e autor da presente dissertação | 216 |
| Tabela 40 - Dados de safra e insumos agroindustriais..... | 271 |
| Tabela 41 - Investimento e manutenção em concentrador de vinhaça | 271 |
| Tabela 42 – Operação em concentrador de vinhaça | 271 |
| Tabela 43 - Capacidade e número de concentradores..... | 271 |
| Tabela 44 - Custo com transporte e mão de obra de vinhaça in natura | 272 |
| Tabela 45 - Dados com logística de vinhaça antes do concentrador | 273 |
| Tabela 46 - Custos com logística de vinhaça antes do concentrador..... | 273 |
| Tabela 47 - Volume de vinhaça concentrada por dia..... | 273 |
| Tabela 48 - Custo com transporte e mão de obra de vinhaça concentrada | 274 |
| Tabela 49 - Custos com logística de vinhaça depois do concentrador..... | 274 |
| Tabela 50 – Economia por safra | 275 |
| Tabela 51 - Dados e custo de fertilizantes e vinhaça concentrada..... | 275 |
| Tabela 52 - Volume de água permeada recuperada m ³ | 275 |
| Tabela 53- Valor final de vinhaça concentrada e águas residuárias | 275 |
| Tabela 54 - Dados financeiros | 275 |
| Tabela 55 - Fluxo de caixa do concentrador de vinhaça..... | 276 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 56 - Fluxo de caixa e saldo simples e descontado | 277 |
| Tabela 57 - Resultados financeiros..... | 277 |
| Tabela 58 - Consumo de Diesel anual com transporte de vinhaça concentrada (m ³ /ano)..... | 277 |
| Tabela 59 - Energia proveniente consumida do Diesel por ano (TJ/ano) | 278 |
| Tabela 60 - Consumo de eletricidade do concentrador (MWh/ano) | 278 |
| Tabela 61 - Equivalente populacional após a concentração de vinhaça (habitantes)..... | 278 |
| Tabela 62 - Emissão de NO _x pelo concentrador (t/ano) | 278 |
| Tabela 63 - Emissão de SO _x pelo concentrador (t/ano)..... | 278 |
| Tabela 64 - Emissão de CO _{2 eq} pelo concentrador (t/ano) | 278 |
| Tabela 65 - Emissão de NO _x no transporte de vinhaça concentrada com Diesel S500 (t/ano) | 279 |
| Tabela 66 - Emissão de SO _x no transporte de vinhaça concentrada com Diesel S500 (t/ano) | 279 |
| Tabela 67 - Emissão de CO _{2 eq} no transporte de vinhaça concentrada com Diesel S500 (t/ano) | 279 |
| Tabela 68 – Resumo dos resultados energéticos para o concentrador de vinhaça | 279 |
| Tabela 69 - Resumo dos resultados ambientais para o concentrador de vinhaça..... | 279 |
| Tabela 70 - Valor de investimento no biodigestor e motogerador | 280 |
| Tabela 71 - Valor de operação e manutenção anual de biodigestor e motogerador | 280 |
| Tabela 72 - Economia por ausência de multa..... | 280 |
| Tabela 73 - Dados e custo de fertilizantes e vinhaça biodigerida | 280 |
| Tabela 74 - Resumo dos dados financeiros | 280 |
| Tabela 75 - Fluxo de caixa do biodigestor de vinhaça | 281 |
| Tabela 76 - Fluxo e saldo simples e descontado | 282 |
| Tabela 77 - Resultados financeiros..... | 282 |
| Tabela 78 - Consumo de Diesel anual com transporte de vinhaça bio digerida..... | 282 |
| Tabela 79 - Energia proveniente consumida do Diesel por ano | 282 |
| Tabela 80 - Consumo anual de eletricidade na biodigestão (MWh) | 283 |
| Tabela 81 - Volume de biogás produzido (m ³ /ano)..... | 283 |
| Tabela 82 - Energia térmica produzida pelo biogás (TJ/ano)..... | 283 |
| Tabela 83 - Energia elétrica exportada (MWh/ano) | 283 |
| Tabela 84 - Potência elétrica de geração instalada (MW)..... | 283 |
| Tabela 85 - Equivalente populacional de geração de eletricidade de vinhaça biodigerida (habitante)..... | 283 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 86 - Equivalente populacional de vinhaça biodigerida (habitantes) | 284 |
| Tabela 87 - Emissão de NO _x por ano no motogerador de biogás (t/ano)..... | 284 |
| Tabela 88 - Emissão de SO _x por ano no motogerador de biogás (t/ano) | 284 |
| Tabela 89 - Emissão de NO _x no transporte de vinhaça biodigerida com Diesel S500 | 284 |
| Tabela 90 - Emissão de SO _x no transporte de vinhaça biodigerida para Diesel S500..... | 285 |
| Tabela 91 - Emissão de CO ₂ eq no transporte de vinhaça biodigerida com Diesel S500..... | 285 |
| Tabela 92 - Emissão de NO _x evitada a partir do uso de vinhaça para geração de eletricidade (t/ano)..... | 285 |
| Tabela 93 - Emissão de SO _x evitada a partir do uso de vinhaça para geração de eletricidade (t/ano)..... | 285 |
| Tabela 94 - Emissão de CO _{2eq} evitada a partir do uso de vinhaça para geração de eletricidade (t/ano)..... | 286 |
| Tabela 95 – Resumo dos resultados energéticos para o biodigestor..... | 286 |
| Tabela 96 – Resumo dos resultados ambientais para o biodigestor..... | 286 |
| Tabela 97 - Valor de investimento no biodigestor e motogerador..... | 286 |
| Tabela 98 - Valor de operação e manutenção anual de biodigestor e motogerador..... | 287 |
| Tabela 99 - Investimento e manutenção em concentrador de vinhaça | 287 |
| Tabela 100 – Operação em concentrador de vinhaça | 287 |
| Tabela 101 - Capacidade e número de concentradores..... | 287 |
| Tabela 102 - Custo com transporte e mão de obra de vinhaça in natura | 288 |
| Tabela 103 - Dados com logística de vinhaça antes do concentrador | 289 |
| Tabela 104 - Custos com logística de vinhaça antes do concentrador..... | 289 |
| Tabela 105 - Volume de vinhaça concentrada por dia..... | 289 |
| Tabela 106 - Custo com transporte e mão de obra de vinhaça concentrada | 290 |
| Tabela 107 - Custos com logística de vinhaça depois do concentrador..... | 290 |
| Tabela 108 – Economia por safra | 291 |
| Tabela 109 - Dados e custo de fertilizantes e vinhaça concentrada..... | 291 |
| Tabela 110 - Volume de água permeada recuperada m ³ | 291 |
| Tabela 111 - Valor final de vinhaça concentrada e águas residuárias | 291 |
| Tabela 112 - Resumo dos dados financeiros..... | 291 |
| Tabela 113 – Fluxo de caixa do conjugado biodigestor mais concentrador | 292 |
| Tabela 114 - Fluxo de caixa e saldo simples e descontado..... | 293 |
| Tabela 115 - Resultados financeiros | 293 |
| Tabela 116 - Consumo anual de eletricidade na biodigestão (MWh)..... | 293 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 117 - Consumo de eletricidade do concentrador (MWh) | 294 |
| Tabela 118 - Volume de biogás produzido (m ³ /ano)..... | 294 |
| Tabela 119 - Energia térmica produzida pelo biogás (TJ/ano)..... | 294 |
| Tabela 120 - Energia elétrica exportada (MWh/ano) | 294 |
| Tabela 121 - Energia elétrica exportada por ano | 294 |
| Tabela 122- Potência elétrica de geração instalada | 294 |
| Tabela 123 - Consumo de Diesel anual com transporte de vinhaça concentrada (m ³ /ano).... | 294 |
| Tabela 124 - Energia proveniente consumida do Diesel por ano | 295 |
| Tabela 125 - Equivalente populacional de geração de eletricidade de vinhaça biodigerida e concentrada..... | 295 |
| Tabela 126 - Equivalente populacional de vinhaça biodigerida concentrada (habitantes).... | 295 |
| Tabela 127 - Emissão de NO _x pelo concentrador (t/ano) | 295 |
| Tabela 128 - Emissão de NO _x no transporte de vinhaça concentrada com Diesel S500 (t/ano) | 295 |
| Tabela 129 - Emissão de NO _x por ano no motogerador de biogás (t/ano) | 295 |
| Tabela 130 - Emissão de SO _x pelo concentrador (t/ano)..... | 296 |
| Tabela 131 - Emissão de SO _x no transporte de vinhaça concentrada com Diesel S500 (t/ano) | 296 |
| Tabela 132 - Emissão de SO _x por ano no motogerador de biogás (t/ano)..... | 296 |
| Tabela 133 - Emissão de CO _{2 eq} pelo concentrador (t/ano) | 296 |
| Tabela 134 - Emissão de CO _{2 eq} no transporte de vinhaça concentrada com Diesel S500 (t/ano) | 296 |
| Tabela 135 - Emissão de NO _x evitada a partir do uso de vinhaça para geração de eletricidade (t/ano) | 297 |
| Tabela 136 - Emissão de SO _x evitada a partir do uso de vinhaça para geração de eletricidade (t/ano) | 297 |
| Tabela 137 - Emissão de CO _{2eq} evitada a partir do uso de vinhaça para geração de eletricidade (t/ano) | 297 |
| Tabela 138 - Resumo dos resultados energéticos | 297 |
| Tabela 139 – Resumo dos resultados ambientais para o conjugado biodigestor concentrador | 298 |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 21 |
| 1.1 | Justificativa | 24 |
| 1.2 | Objetivos | 26 |
| 2 | SUSTENTABILIDADE E O SETOR SUCROENERGÉTICO | 29 |
| 2.1 | Edificação histórica da sustentabilidade | 29 |
| 2.2 | Sustentabilidade no setor de energia e sua situação no Brasil: Importância e desafios | 36 |
| 2.2.1 | <i>Geração distribuída</i> | 43 |
| 2.2.2 | <i>Comercialização de energia elétrica</i> | 44 |
| 2.2.3 | <i>Barreiras a geração distribuída</i> | 47 |
| 2.2.4 | <i>Atual situação da biomassa nos leilões de eletricidade</i> | 50 |
| 2.3 | Mecanismo de desenvolvimento limpo: conceito, desafios e oportunidades | 51 |
| 2.3.1 | <i>Convenção Quadro das Nações Unidas para a Mudança Climática e a Conferência das Partes de Kyoto</i> | 51 |
| 2.3.2 | <i>O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo – MDL</i> | 53 |
| 2.4 | Setor sucroenergético no Brasil: importância, oportunidades e desafios | 58 |
| 2.5 | Gestão ambiental, Produção mais Limpa e subprodutos do setor sucroenergético | 63 |
| 2.6 | Bagaço da cana-de-açúcar para produção de energia elétrica: vantagens e desafios | 72 |
| 2.7 | O etanol de segunda geração: oportunidades e desafios | 75 |
| 3 | VINHAÇA, BIODIGESTORES, BIOGÁS, MÁQUINAS TÉRMICAS E CONCENTRADORES | 79 |
| 3.1 | Vinhaça: conceito, desafio e oportunidades | 79 |
| 3.1.1 | <i>Definição, aspectos químicos de vinhaça e potencial poluidor</i> | 79 |
| 3.1.2 | <i>Revisão normativa sobre o descarte de vinhaça no Brasil</i> | 82 |
| 3.1.3 | <i>Revisão normativa sobre o descarte de vinhaça nos estados brasileiros</i> | 83 |
| 3.1.4 | <i>Potencial utilização de vinhaça</i> | 85 |
| 3.2 | Biodigestores | 89 |
| 3.2.1 | <i>Definição de biodigestão</i> | 89 |
| 3.2.2 | <i>Reatores anaeróbios</i> | 92 |
| 3.3 | Biogás | 102 |
| 3.4 | Máquinas térmicas | 107 |

| | | |
|----------|--------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.4.1 | <i>Motor Otto</i> | 107 |
| 3.4.2 | <i>Motor Diesel</i> | 108 |
| 3.4.3 | <i>Motor Stirling</i> | 109 |
| 3.4.4 | <i>Turbinas a gás</i> | 110 |
| 3.4.5 | <i>Turbina a vapor</i> | 112 |
| 3.4.6 | <i>Microturbinas</i> | 113 |
| 3.4.7 | <i>Comparação entre as tecnologias.</i> | 114 |
| 3.5 | Concentrador de vinhaça | 114 |
| 4 | METODOLOGIA | 119 |
| 4.1 | Classificação da pesquisa | 119 |
| 4.2 | Métodos de coleta | 119 |
| 4.3 | Variáveis | 121 |
| 4.4 | Proposições | 127 |
| 4.5 | Análises realizadas | 128 |
| 4.6 | Concentrador de vinhaça | 129 |
| 4.6.1 | <i>Análise de viabilidade econômica do concentrador de vinhaça</i> | 129 |
| 4.6.2 | <i>Análise energética concentrador de vinhaça</i> | 145 |
| 4.6.3 | <i>Análise ambiental do concentrador de vinhaça</i> | 146 |
| 4.7 | Biodigestor anaeróbio de circulação interna | 150 |
| 4.7.1 | <i>Análise de viabilidade econômica do biodigestor de vinhaça</i> | 150 |
| 4.7.2 | <i>Análise energética do biodigestor de vinhaça</i> | 153 |
| 4.7.3 | <i>Análise Ambiental do biodigestor de vinhaça</i> | 160 |
| 4.8 | Conjugado biodigestor IC mais concentrador de vinhaça | 166 |
| 4.8.1 | <i>Análise de viabilidade econômica do biodigestor mais concentrador</i> | 166 |
| 4.8.2 | <i>Análise energética do biodigestor de vinhaça mais concentrador</i> | 167 |
| 4.8.3 | <i>Análise ambiental do biodigestor de vinhaça mais concentrador</i> | 170 |
| 5 | ANÁLISE ENERGÉTICA | 179 |
| 6 | ANÁLISE AMBIENTAL | 189 |
| 6.1 | Equivalente populacional | 189 |
| 6.2 | Análise do dióxido de carbono equivalentes emitidos e mitigados | 190 |
| 6.3 | Análise dos óxidos de nitrogênio emitidos e mitigados | 192 |
| 6.4 | Análise dos óxidos de enxofre emitidos e mitigados | 194 |
| 6.5 | Análise dos resultados | 195 |
| 7 | ANÁLISE ECONÔMICA | 197 |

| | | |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 7.1 | Análise econômica do cenário I: produção de fertilizantes, eletricidade, créditos de carbono e economia com transporte de vinhaça concentrada | 197 |
| 7.2 | Análise econômica do cenário II: geração de eletricidade, créditos de carbono e economia com transporte de vinhaça concentrada | 202 |
| 7.3 | Análise econômica do cenário III: geração de eletricidade, créditos de carbono e economia com transporte de vinhaça concentrada com taxa mínima de atratividade de 11% e isenção fiscal | 206 |
| 8 | DISCUSSÃO | 211 |
| 9 | CONCLUSÃO | 223 |
| 9.1 | Objetivos, proposições e respostas as mesmas | 223 |
| 9.2 | Limitações | 231 |
| 9.3 | Sugestões de pesquisas futuras | 232 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 235 |
| | APÊNDICE A | 271 |
| | Memória de cálculo para produção de etanol de 500 metros cúbicos por dia. | 271 |
| | <i>Concentrador de vinhaça.</i> | 271 |
| | <i>Biodigestor</i> | 280 |
| | <i>Biodigestor e concentrador</i> | 286 |
| | Linhas de crédito dos principais bancos de desenvolvimento do país | 298 |

1 INTRODUÇÃO

Ante o agravamento das questões sociais, ambientais e econômicas após trinta anos de crescimento econômico do pós segunda guerra mundial, iniciou-se uma série de debates internacionais sobre a necessidade de reforma do sistema capitalista, que tem sua origem na revolução industrial, na metade do século XVIII, baseada no crescimento econômico sem contemplar a preservação ambiental e a promoção social.

A partir dos debates da Primeira Conferência Mundial sobre o Homem e o Meio Ambiente, realizada em Estocolmo, em 1972, entre o desenvolvimento zero e o eco desenvolvimento e as pesquisas realizadas pela Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento das Nações Unidas, liderada pela primeira-ministra da Noruega Gro Harlem Brundtland, resultaram na publicação do relatório “Nosso Futuro Comum”, também chamado de “Relatório Brundtland”, que define o conceito de desenvolvimento sustentável: “como aquele que atende às necessidades do presente sem comprometer a possibilidade das gerações futuras atenderem as suas próprias necessidades” (BRUNDTLAND, 1991, p. 46).

Em outras palavras, o Relatório Brundtland alerta para a necessidade da adequação dos meios de produção ante ao esgotamento dos recursos naturais, propondo a utilização racional dos mesmos, por meio de modelos de gestão governamentais e corporativos, que contemplem o desenvolvimento econômico, promoção social e a preservação ambiental, e utilização de tecnologias que contemplem a redução do consumo de matérias primas e a reutilização dos subproduto de produção.

Nesse sentido, a gestão de subproduto tem importância fundamental, na medida em que suas externalidades contemplam uma série de subprodutos e serviços, com efeitos econômicos e ambientais positivos para a sociedade. Em particular, no setor sucroenergético, essas externalidades contemplam: produção de fertilizantes, ausência de multas por descarte inadequado de subproduto, economia com captação de água, economia no transporte de vinhaça, crédito de carbono e geração de eletricidade.

A indústria de açúcar e etanol no Brasil, para Nogueira et al. (2015), tem forte influência sobre o cenário energético, social, econômico e ambiental, de acordo com Garcez (2013), o Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, o maior produtor e exportador de açúcar e o segundo maior produtor de etanol do mundo. O setor sucroenergetico foi responsável por aproximadamente 2% do PIB nacional e por 31% do PIB da agricultura no Brasil em 2012, tendo empregado cerca de 4,5 milhões de pessoas.

Porém, a crise do setor, entre 2008 a 2014, de acordo com a Organização dos Plantadores de Cana da Região Centro Sul do Brasil (2014), desde 2009, 58 usinas fecharam

na região Centro-Sul do país, somente em 2014, 12 usinas encerraram as atividades. No estado de São Paulo, durante a crise, 26 empresas ligadas à cadeia produtiva do setor sucroenergético faliram, devido ao contexto de crise e problemas de produtividade.

Mesmo com a crise supracitada, o setor começa a dar os primeiros sinais de recuperação em 2016, dado o fim do controle artificial do preço da gasolina e o aumento da mistura de etanol à esse combustível. Para Nogueira et al. (2015), o crescimento do setor de açúcar e etanol no Brasil tem também significado um aumento na produção de subproduto dessa indústria, sendo ao mesmo tempo um problema e uma oportunidade para o setor se modernizar e capitalizar a partir da administração ambiental, que contemple a gestão de subproduto, transformando esses em recursos financeiros e vantagem competitiva para as usinas.

Dentre os principais subprodutos da produção de etanol se encontra a vinhaça, considerada de maior carga poluidora e em volume de produção, sua geração pode chegar de 10 a 15 litros por litro de etanol produzido, mostrando a importância de ações que utilizem esse recurso de maneira ecoeficiente. Para tanto, há disponível no mercado uma série de tecnologias com o objetivo de fazer frente a esse problema ambiental, dentre eles são os concentradores de vinhaça, que conseguem reduzir em até dez vezes o volume desse subproduto e tem como principais externalidades econômicas e ambientais: redução de custo com transporte de vinhaça *in natura*, produção de fertilizante concentrado equivalente em uréia, cloreto de potássio e superfosfato triplo, ausência de multas por descarte inadequado do subproduto e a não captação de água.

Outras tecnologias importantes para o tratamento de vinhaça estão os biodigestores, esse processo propicia produção de fertilizante equivalentes em ureia, cloreto de potássio e superfosfato triplo, ausência de multas por descarte inadequado do subproduto, créditos de carbono no mercado futuro, biogás e eletricidade.

Para Moraes, Zaiat e Bonomi (2015), a biodigestão anaeróbia para produção de biogás é reconhecida como uma tecnologia limpa que alia a sustentabilidade com geração de energia e esta alternativa é especialmente interessante para a vinhaça, principal subproduto do processo de produção de etanol. De acordo com Nogueira et al. (2015), essa alternativa apresenta um relevante fator econômico, a venda de energia elétrica produzida.

A eletricidade tem importância fundamental para a construção do desenvolvimento sustentável, na medida em que esse setor tem importância estratégica para o desenvolvimento econômico e social, não somente no Brasil, mas também para o mundo, aonde seus principais

recursos energéticos são oriundos de fontes não renováveis, sendo responsáveis pelo aquecimento global e suas potências consequências.

Para Menkes (2004), o setor energético pode contribuir para o desenvolvimento de sociedades sustentáveis. De todas as opções, o desenvolvimento de fontes de energia renováveis e a adoção da eficiência energética são os instrumentos mais adequados aos critérios do desenvolvimento sustentável.

Para Moraes, Zaiat e Bonomi (2015), a substituição dos combustíveis fósseis por biocombustíveis tem sido de extrema importância no mundo todo para estimular o crescimento da economia, baseada na sustentabilidade a partir do uso de recursos renováveis.

Porém, especificamente no que refere ao Brasil e ao setor elétrico, desde o início de 2015, o país enfrenta uma crise no setor, ocasionada devido: políticas estratégicas equivocadas, falta de investimentos, falta de interligações nos sistemas de distribuição e alteração nos anos de 2014 e 2015 no regime pluvial da região sudeste, com conseqüente baixo nível dos reservatórios das usinas hidrelétricas. Nesse sentido, de acordo com a Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica (2015), novos investimentos no setor, com destaque para geração e distribuição, são imperativos para que o país não comprometa ainda mais seu crescimento econômico e volte a crescer de maneira sustentável nos próximos anos.

As constatações supracitadas ratificam que o sistema elétrico brasileiro carece de planejamento de médio e longo prazo e sua estrutura é deficitária, impactando negativamente no crescimento econômico do país e na qualidade de vida dos cidadãos.

Para Rego e Hernandez (2006), o uso de energias renováveis, como a proveniente de vinhaça emerge como oportunidade. Trata-se de produção descentralizada e próxima a alguns centros de oferta e demanda de eletricidade, com grande potencial de reaproveitamento desse subproduto.

Dado a importância do setor elétrico e sucroenergético na economia e na sociedade brasileira, como também a capacidade poluidora e o volume de produção de vinhaça e tecnologias disponíveis para seu tratamento, como os biodigestores e concentradores, o problema da presente pesquisa é: qual a viabilidade econômica, ambiental e energética da utilização do biodigestor de circulação interna, concentrador de vinhaça e o conjugado de ambos?

1.1 Justificativa

No Brasil, de acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (2016a), em 2015 a biomassa da cana-de-açúcar representou 16,9% da oferta interna de energia elétrica. A maior parte da eletricidade proveniente de biomassa é utilizada na produção do etanol. De acordo com a União da Indústria de Cana-de-açúcar, UNICA (2016a), a biomassa da cana gerou para a rede 20.169 GWh (89% do total de geração da biomassa), consequentemente, reduzindo a emissão de 8,6 milhões de toneladas CO₂ e poupou 14% do volume de água nos reservatórios das hidrelétricas no sub mercado sudeste e centro oeste.

No que se refere ao etanol, ainda de acordo com a UNICA (2016a), a safra 2015/2016 incrementou 1,996 milhões de litros na produção de etanol, com o total de 28,225 milhões de litros contra 26,232 milhões de litros na safra 2015/2014.

Fernandes et al. (2010), estimam que a substituição da gasolina pelo etanol mais a substituição do óleo Diesel pelo bagaço na indústria da cana-de-açúcar evitaram a emissão de 33,2 milhões de toneladas de CO₂ na atmosfera. Enquanto um veículo de porte médio, movido exclusivamente com gasolina, chega a emitir aproximadamente 2,2 kg CO₂/litro, um veículo equivalente movido exclusivamente com etanol emite cerca de 1,3 kg CO₂/litro, ou seja, 59% da emissão do veículo a gasolina.

Porém, dentre os subprodutos mais importantes da produção de etanol se encontram o bagaço da cana-de-açúcar e vinhaça.

Especificamente no que se refere à vinhaça, a mesma é utilizada como fertilizante nos canaviais a um determinado raio das usinas sucroenergéticas. Esse procedimento permite a essas organizações ganhos financeiros a partir da economia com a compra de fertilizantes em larga escala como também com a irrigação dos canaviais. Além disso, de acordo com Bermann (2008), a vinhaça concentrada adquire estabilidade biológica podendo ser armazenada por um longo período e aplicada ao solo quando necessário.

A adoção da prática da fertirrigação no cultivo da cana-de-açúcar proporciona melhorias na produtividade agrícola (CARR; KNOX, 2011), consequentemente com o aumentos na produção de açúcar (DALRI; CRUZ, 2008).

Porém, esse mesmo subproduto é caracterizado como efluente de destilarias com poder poluente cem vezes maior que o do esgoto doméstico, decorrente da sua riqueza em matéria orgânica, baixo pH, elevada corrosividade e altos índices de demanda química (DQO) e bioquímica de oxigênio (DBO), além de elevada temperatura na saída dos destiladores.

Outrossim, a vinhaça é considerada altamente nociva à fauna e à flora (FREIRE; CORTEZ, 2000).

Além disso, de acordo com Moraes et al. (2014), a aplicação de vinhaça *in natura* em solos para fertirrigação da cana-de-açúcar, aumenta cumulativamente as emissões de N₂O anualmente, cerca de dois a três vezes, respectivamente para cana-de-açúcar e soqueira, em comparação com a aplicação de fertilizantes inorgânicos.

A produção de vinhaça varia em função dos diferentes processos empregados na produção de etanol. Ainda, segundo Freire e Cortez (2000), para cada litro de etanol são produzidos entre 10 a 15 litros de vinhaça. De acordo Theodoro¹ (2005, apud SZYMANSKI; BALBINOT; NAGEL, 2010, p. 902), “para cada 1.000 t de cana-de-açúcar processada para produção de etanol, são gerados em média 360 m³ de vinhaça”. Considerando a produção de etanol no Brasil, na safra 2013/2014, em cerca de 25,04 bilhões de litros, a produção de vinhaça foi de, no mínimo, 250 bilhões de litros.

Porém, a produção experimental de vinhaça concentrada nas usinas de Cerradinho em Potirendaba e a Usina em Guarani em Olímpia, no interior de São Paulo, como também a geração de eletricidade por meio de biodigestores anaeróbios a partir de vinhaça, na Usina São Martinho em Pradópolis, no interior de São Paulo nos anos setenta e oitenta, em ambo os casos, dado as limitações tecnológicas e a inviabilidade econômica dos projetos nesse período, os mesmos foram sendo paulatinamente abandonados.

Nesse sentido, sua utilização depende de critérios, sobretudo do acesso a financiamento para compra de concentradores e biodigestores, motor de combustão de metano preços do quilowatt hora determinados nos leilões de energia elétrica pela Agência Nacional de Energia Elétrica e do investimento realizado em redes de transmissão.

A bibliografia sobre a utilização da vinhaça na produção de energia elétrica, como também seu processo de concentração tem sido contemplada, sobretudo pelos seguintes pesquisadores: Almança (1994), Ferraz Junior (2013), Lazaro (2012), Moraes et al. (2014), Moraes, Zaiat e Bonomi (2015), Nogueira et al. (2015), Peixoto (2011), Poveda (2014), Ribas (2006), Salomon (2007), Santa Cruz (2011), Silva (2012), Zaratini (2013). A linha de pensamento desses autores é convergente na importância da utilização do subproduto supracitado ante sua carga de matéria orgânica, como também capacidade poluidora.

¹ THEODORO, J. M. P. **Considerações sobre os custos ambientais decorrentes do gerenciamento dos resíduos sólidos e dos efluentes industriais gerados no setor sucroalcooleiro:** um estudo de caso. 2005. 95 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente) – Centro Universitário de Araraquara, Araraquara, 2005.

Ante os desafios econômicos, sobretudo ambientais e sociais que precisam ser corrigidos no século XXI, de acordo com a gravidade da situação, o pesquisador espera contribuir, junto a outras pesquisas já realizadas, para a solução do problema da destinação de vinhaça, grande poluidor de lençóis freáticos e do solo, para seu aproveitamento econômico, gerando renda e empregos, ao mesmo tempo com respeito ao meio ambiente, pressupostos fundamentais do desenvolvimento sustentável.

Portanto, considerando a demanda urgente de novas matrizes energéticas no país, a crise no setor sucroenergético, o elevado volume de produção de vinhaça e seu grave impacto ambiental, justifica-se um estudo sobre a utilização de vinhaça nos concentradores, biodigestores e em ambos.

Os estudos realizados pelos pesquisadores nessa área têm contemplado aspectos técnicos referentes ao arranjo físico de plantas produção, máquinas e equipamentos utilizados no processo, logística de produção, reutilização e descarte na vinhaça, não contextualizando sua importância nos cenários econômicos.

Nesse sentido, com a revisão da literatura e elaboração dos cálculos de análise de viabilidade econômica, energética ambiental, espera-se contribuir com a literatura nesse campo científico.

1.2 Objetivos

O objetivo geral da presente pesquisa é analisar a viabilidade energética, ambiental e econômica da utilização em concentradores de vinhaça, biodigestores de circulação interna e de ambos para geração de eletricidade, fertilizantes e créditos de carbono em três cenários econômicos.

Os objetivos específicos da presente pesquisa são:

- Identificar o valor presente líquido, taxa interna de retorno, payback e payback descontado de biodigestores anaeróbios de circulação interna, concentrador de vinhaça e o conjugado de ambos;
- Identificar o equivalente populacional, dióxido de carbono equivalentes emitidos e mitigados, óxidos de nitrogênio e enxofre emitidos e mitigado de biodigestores anaeróbios de circulação interna, concentrador de vinhaça e o conjugado de ambos;
- Fundamentar a importância da reutilização da vinhaça com propósitos energéticos ante sua capacidade poluidora;
- Identificar motivos de não reutilização da vinhaça para produção de energia elétrica junto aos produtores.

Alcançados o objetivo geral e os objetivos específicos desta dissertação, espera-se que o mesmo possa se somar ao conhecimento já produzido na área energia renovável, reutilização de subproduto e contribuir na materialização da utilização da vinhaça para fins em consonância com a dimensão ambiental e econômica da sustentabilidade.

2 SUSTENTABILIDADE E O SETOR SUCROENERGÉTICO

Para a conceção dos objetivos gerais e específicos da presente dissertação, primeiramente, realizar-se-á uma revisão na literatura, abordando os seguintes pontos: edificação histórica da sustentabilidade; sustentabilidade no setor de energia e sua situação no Brasil: importância e desafios; Mecanismo de Desenvolvimento Limpo: conceitos, desafios e oportunidades; setor sucroenergético no Brasil: importância, oportunidades e desafios; gestão ambiental, produção mais limpa e subproduto do setor sucroalcooleiro e vinhaça: conceitos, desafios e oportunidades e etanol de segunda geração: oportunidades e desafios.

2.1 Edificação histórica da sustentabilidade

Analisar a construção e emergência do conceito de desenvolvimento sustentável é compreender os processos que culminaram na edificação da consciência do esgotamento do presente modelo de desenvolvimento, experimentado nos últimos três séculos, marcados pelas premissas da livre iniciativa, da lógica de acumulação de riqueza e pelas revoluções científicas e tecnológicas que culminaram com a emergência e no desenvolvimento de produtos, serviços e processos que ampliaram consideravelmente a capacidade de produção, proporcionado grande avanço econômico, porém, como consequência: concentração de riquezas, desigualdades sociais, desemprego estrutural e prejuízos ambientais.

Esses fatores fizeram surgir diversas correntes de pensamentos, estudos e pesquisas, com o objetivo de elaborar um modelo que permita aliar essas formas de desenvolvimento com a melhora da interação humana com o meio ambiente e a preservação do mesmo.

Para Dias e Tostes (2008), a multiplicação dos problemas ambientais e a ação dos movimentos ecológicos, sobretudo a partir da década de 1970, compõem uma força crítica ao modelo de desenvolvimento industrial e despertaram uma nova consciência, atenta à dimensão ambiental e social da realidade.

O desenvolvimento sustentável assumiu, portanto, no final do século XX, um papel chave na reflexão em torno do modelo de desenvolvimento econômico vigente e seus impactos sociais e ambientais tanto em escala regional quanto global e surgiu para enfrentar a crise ecológica que se apresentava, sobretudo no pós-guerra, caracterizado por Hobsbawn (1995), por um rápido crescimento econômico que teve como consequência considerável a degradação ambiental e a exclusão social.

Para Jacobi (2006), duas correntes de pensamento emergiram para elaboração e debate de novas propostas de desenvolvimento.

O Clube de Roma, criado em 1968, formado por cientistas, políticos e empresários cujo objetivo era discutir assuntos relacionados à política, economia, meio ambiente e ao desenvolvimento sustentável, encomendou junto ao *Massachusetts Institute of Technology* o relatório intitulado “Os Limites do Crescimento”, também conhecido como Relatório do Clube de Roma ou Relatório Meadows.

De acordo com Oliveira et al. (2011), o relatório supracitado baseia-se em uma série de modelos matemáticos para prever a relação entre o crescimento da população mundial, a industrialização, a produção de alimentos e a diminuição dos recursos naturais. Concluiu-se que, caso as formas de produção continuassem no ritmo apresentado no momento do estudo, em 1972, os limites de crescimento seriam alcançados em um prazo de 100 anos.

Alertava-se, portanto, para o fato de que a humanidade teria, obrigatoriamente, um limite de crescimento, com o modelo econômico até então praticado, baseado no consumo e concentrado em poucas nações. Como proposta, o Relatório Meadows apresenta o necessário congelamento do crescimento da população global e do capital industrial, mostrando as limitações dos recursos naturais (INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS, 2009).

Porém, a primeira iniciativa global no âmbito do desenvolvimento sustentável foi a realização da Conferência Internacional para o Meio Ambiente Humano, promovida pelas Nações Unidas em Estocolmo, também em 1972, (UN CONFERENCE ON THE HUMAN ENVIRONMENT) um marco histórico-político decisivo para o surgimento de políticas de gerenciamento ambiental, direcionando a atenção das nações para as questões ambientais (PASSOS, 2009).

A Conferência de Estocolmo refletiu a preocupação com a vulnerabilidade dos ecossistemas. A ênfase estava em aspectos técnicos da poluição provocada pela industrialização, crescimento demográfico e urbano (ZAGO, 2007).

Foi, portanto, no contexto do Relatório Meadows e da Conferência de Estocolmo, que surgiu uma proposta de um novo modelo de desenvolvimento, que deveria necessariamente contemplar a preservação ambiental e ao mesmo tempo permitir o crescimento econômico das nações.

Em 1973, Maurice Strong propôs um modelo de desenvolvimento, com bases ambientais também conhecido como eco desenvolvimento. Sachs (1993), formulou os princípios dessa nova visão de desenvolvimento aonde são elencadas seis diretrizes que as políticas de desenvolvimento dos países deveriam seguir. São elas:

[...] 1º) a satisfação das necessidades básicas; 2º) a solidariedade com as futuras gerações; 3º) a participação da população envolvida; 4º) a preservação dos recursos naturais e do meio ambiente em geral; 5º) elaboração de um sistema social, e 6º) qualidade na educação (BRUSEKE, 1995, p. 31).

A ideia de Eco desenvolvimento foi a base para a emergência do conceito de desenvolvimento sustentável, pois, propõe a integração entre promoção social e meio ambiente, considerando os limites de renovação dos recursos naturais (ROMEIRO, 2012).

O termo “desenvolvimento sustentável” foi discutido pela primeira vez no documento *World's Conservation Strategy*, centrado na questão da integridade ambiental. Esse documento ressalta a importância das dimensões sociais, ecológicas e econômicas para o alcance da sustentabilidade considerando os recursos vivos e não vivos e as vantagens de curto e longo prazo de ações alternativas.

Em 1982, dez anos após a Conferência de Estocolmo, sob supervisão do PNUMA, em Nairóbi, no Quênia, foi definido a formação da Comissão Mundial de Meio Ambiente e Desenvolvimento (CMMAD) implementada em 1983 pela Assembleia Geral das Nações Unidas que teve como líder a primeira-ministra da Noruega Gro Harlem Brundtland. A comissão tinha como objetivo: reexaminar os principais problemas do meio ambiente e do desenvolvimento, em âmbito mundial, e formular propostas realistas para solucioná-los (RIBAS, 2008).

Em abril de 1987, a CMMAD apresentou o relatório *Our Common Future* também conhecido como Relatório Brundtland. O relatório, com 430 páginas, traz uma nova perspectiva de desenvolvimento. Estruturado em 3 partes: I preocupações comuns; II desafios comuns e III esforços comuns. O Relatório parte de uma visão complexa das causas dos problemas socioeconômicos e ecológicos da sociedade global que devem ser alteradas para que se possa atingir o desenvolvimento sustentável. Parte do pressuposto da possibilidade e da necessidade de conciliar crescimento econômico e conservação ambiental. Chama, também, atenção para uma nova postura ética, caracterizada pela responsabilidade tanto entre as gerações, quanto entre os membros contemporâneos da sociedade atual (MOTA et al., 2008).

A definição de desenvolvimento sustentável, de acordo com o Relatório Brundtland (1991, p. 10):

[...] O desenvolvimento que procura satisfazer as necessidades da geração atual, sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazerem as suas próprias necessidades, significa possibilitar que as pessoas, agora e no futuro, atinjam um nível satisfatório de desenvolvimento social e econômico e de realização humana e cultural, fazendo, ao mesmo tempo, um uso razoável dos recursos da terra e preservando as espécies e os habitats naturais.

O relatório Brundtland não tratou unicamente os problemas ambientais, o fez por uma perspectiva sistêmica, entre os modelos de desenvolvimento e seus respectivos impactos sobre a natureza. A sustentabilidade do desenvolvimento e da necessidade de tratá-lo de uma perspectiva multidimensional articulou os aspectos econômicos, políticos, éticos, sociais, culturais e ecológicos. Apresenta uma filosofia de desenvolvimento que combina eficiência econômica com preservação ambiental e justiça social. Barbosa (2008), ratifica que os problemas do desenvolvimento sustentável encontram-se relacionados à pobreza, que pode ser considerada como um problema ambiental e fundamental para a sustentabilidade sendo necessário, portanto, a resolução desse problema.

Para Strobel (2005), o conceito de desenvolvimento sustentável aponta para uma perspectiva multidimensional que envolva economia, ecologia e política, ao mesmo tempo é contraponto fundamental à ideia ultrapassada de modernização tardia que beneficia alguns setores da economia, mas que é incapaz de oferecer um modelo de desenvolvimento equilibrado à sociedade como um todo.

Após a publicação do Relatório *Our Common Future*, a Assembleia Geral das Nações Unidas decidiu realizar a Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, no Rio de Janeiro, em 1992, aonde o desenvolvimento sustentável passou a ser a questão principal de política ambiental. Essa Conferência, também conhecida como Cúpula da Terra, Conferência do Rio, Eco 92 ou Rio 92 reuniu 108 chefes de estado e de governo, 172 delegações de países, 10 mil jornalistas e 1.400 representantes de organizações não governamentais para buscar mecanismos que rompessem com o abismo de desenvolvimento entre países ricos e pobres e ao mesmo tempo preservar o meio ambiente (LAGO, 2006).

Para Costa (2007), dentre os acordos internacionais decorridos desse encontro foram: Declaração de Princípios sobre Florestas; Convenção sobre Diversidade Biológica; Convenção Quadro sobre Mudanças Climáticas; Convenção do Clima, Agenda 21; Convenção da Biodiversidade; Declaração do Rio; programa de ação global com 40 capítulos e um conjunto de 27 princípios por meio dos quais deveria ser conduzida a interação dos seres humanos com o planeta. Esses acordos deram origem a regulamentações e agências ambientais de vários países.

Tais documentos, de acordo com Ganem (2010), especificamente a Agenda 21 e a Declaração do Rio, definiram o contorno de políticas públicas para se alcançar o desenvolvimento sustentável que atendesse às necessidades dos mais pobres e reconhecesse os limites desse desenvolvimento em escala internacional. O termo, necessidades, não deveria

ser interpretado sob a ótica econômica, mas sob a forma da criação de um sistema que privilegiasse tanto a dimensão ambiental quanto social.

Para Mota et al. (2008), em 1997, houve o primeiro ciclo de avaliação dos resultados da Conferência Rio 92, quando a Sessão Especial da Assembleia Geral das Nações Unidas, conhecida como Rio+5, realizou três eventos naquele ano para revisar a implementação da Agenda 21. Foram os eventos:

1. O Fórum Rio+5, no mês de março, no Rio de Janeiro, aonde organizações não governamentais debateram ações efetivas sobre o desenvolvimento sustentável;
2. A 5ª sessão da Comissão sobre Desenvolvimento Sustentável (CDS) da ONU, em abril, em Nova York, negociou os documentos a serem aprovados no encontro da Assembleia Geral da ONU;
3. Sessão Especial da Assembleia Geral da ONU, em junho, em Nova York.

A partir desses três encontros, uma série de lacunas foram identificadas, especificamente no que se refere às dificuldades para se alcançar a igualdade social e reduzir os níveis de pobreza. Tratava-se de uma situação comum a muitos países em desenvolvimento, provocada pela: redução dos auxílios financeiros internacionais, posição na divisão internacional de trabalho, corrupção, pelo crescimento das dívidas externas e pelo fracasso no processo de transferência de tecnologia e coordenação institucional (SEQUINEL, 2002).

O documento final do evento Fórum Rio+5, das Nações Unidas, foi uma “Declaração de Compromisso” na qual são ratificados os acordos da Rio-92, garantindo a continuidade da implementação das determinações e eficiência no número de convenções e acordos internacionais referentes ao meio ambiente e desenvolvimento (GUIMARÃES; FOUNTORA, 2012).

A partir disso, a Comissão de Desenvolvimento Sustentável da ONU (CDS) sugeriu a realização, em 2002, de uma nova cúpula mundial, desta vez sobre Desenvolvimento Sustentável – A Cimeira da Terra, em Johannesburgo, na África do Sul.

De acordo com Vieira (2012), a Conferência das Nações Unidas sobre Ambiente e Desenvolvimento Sustentável, a Rio + 10, reuniu 100 chefes de estado e governo, 189 representantes de países e 15 mil representantes da sociedade civil, com o objetivo de rever as metas propostas pela Agenda 21 e direcionar as realizações às áreas que requerem um esforço maior para sua implementação, como também, avaliar sobre outros acordos e tratados da Rio 92.

Para Sequinel (2002), a Rio + 10 levaria a definição de um plano de ação internacional, capaz de conciliar as necessidades legítimas de desenvolvimento econômico e social da humanidade, com a obrigação de manter o planeta habitável para as gerações futuras. Porém, na realidade, o que se conseguiu como resultado foi um plano de ação ou de implementação não vinculativo de 153 parágrafos, sem monitoração de uma declaração política, sem o peso e a legitimidade da Declaração do Rio.

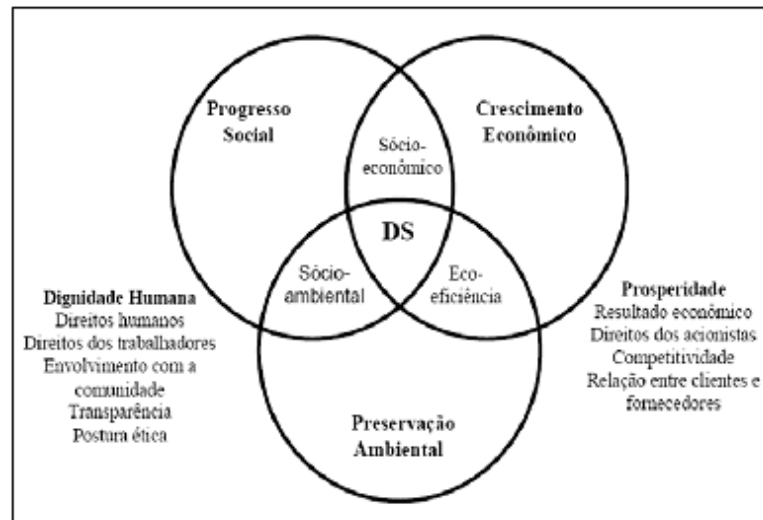
A Declaração de Johannesburgo reafirmou os compromissos firmados na Eco 92, elencou os desafios que foram e estão sendo enfrentados pelas nações participantes do encontro, reafirmou o compromisso com o desenvolvimento sustentável, a importância do multilateralismo democrático responsável e assumiu o compromisso de agir em conjunto para a concretização dos objetivos propostos (COMITÊ DE QUALIDADE DA GESTÃO PÚBLICA, 2002).

Para Mikhailova (2004), o conceito atual de desenvolvimento sustentável, que foi expresso na Cúpula Mundial em 2002, envolve a definição mais concreta do objetivo de desenvolvimento atual (a melhoria da qualidade de vida de todos os habitantes), ao mesmo tempo, distingue o fator que limita tal desenvolvimento e que pode prejudicar as gerações futuras com o uso de recursos naturais além da capacidade do planeta. É necessária a integração de ações em três áreas-chave:

- **Crescimento e Equidade Econômica:** Os sistemas econômicos globais interligados demandam uma abordagem sistêmica para promover um crescimento responsável;
- **Conservação de Recursos Naturais e do Meio Ambiente:** Soluções devem ser desenvolvidas com o objetivo de reduzir o consumo de recursos, deter a poluição e conservar os habitats naturais;
- **Desenvolvimento Social:** Deve-se assegurar que as diversidades culturais e sociais sejam respeitadas e todos os membros da sociedade estejam capacitados de participar na determinação de seus futuros.

Estas três dimensões, para Elkington (2012), estão baseadas no conceito de *Triple Bottom Line*. Analisando-os separadamente, tem-se: Econômico, cujo propósito é a realização de empreendimentos rentáveis; ambiental, cujo objetivo é analisar a interação de processos com o meio ambiente sem lhe causar danos permanentes; e o social, que se preocupa com o estabelecimento de ações justas para trabalhadores, parceiros e sociedade. Juntos, estes três pilares se relacionam de tal forma que a interseção entre dois pilares resulta em viável, justo e vivível, e dos três, resultaria no alcance da sustentabilidade, conforme mostrado na Figura 1.

Figura 1 – As três dimensões do desenvolvimento sustentável (DS)



Fonte: Kraemer (2005, p. 9).

De acordo com Martins et al. (2010, p. 459), o desenvolvimento sustentável é:

[...]passa então a ter uma conotação política que transcende a sua própria capacidade de transformação dos padrões de produção e consumo atuais, mesmo que sua discussão avance para o entendimento de sua essência como processo que melhore as condições de vida das comunidades humanas e, ao mesmo tempo, respeite os limites e a capacidade de carga dos ecossistemas. Esta visão de mundo, pós-iluminista, que amplia para além da degradação do ambiente físico e biológico, as variáveis consideradas no contexto do desenvolvimento sustentável, como a pobreza e a exclusão social, e incorpora as dimensões sociais, políticas e culturais ao processo, evoca uma nova postura de relacionamento homem/sociedade/natureza (MARTINS et al., 2010).

Na dimensão econômica do *Tripe Botton Line*, a sustentabilidade envolve o conceito de conservação de capital natural, em outras palavras, os recursos naturais, estes são finitos. Ecologistas afirmam que a preservação das condições de bem-estar das gerações futuras depende da conservação de tais recursos, aonde o uso inadequado do capital natural pode impedir o desenvolvimento sustentável (MAIA; PIREZ, 2011).

Porém, para a economia do meio ambiente, dentre as diferentes abordagens de análise econômica, apresentam divergências no que se refere à importância efetiva do capital natural para a promoção do desenvolvimento sustentável. Dois conceitos ilustram tais divergências: sustentabilidade fraca e sustentabilidade forte. A diferença entre os dois conceitos tem relação sobre o grau de substitutibilidade entre esses diferentes tipos de capitais (MUELLER, 2005).

As categorias de capitais mais relevantes para a economia do meio ambiente são o capital produzido e o capital natural. A idéia fundamental é que o crescimento econômico, que acompanha o desenvolvimento sustentável, requer ambos os tipos de capitais.

Ainda de acordo com Mueller (2005), na visão da sustentabilidade fraca, o capital tem como crescer de forma quase ilimitada, porque considera que o capital produzido e o capital natural podem ser considerados substitutos. Assim, se o capital natural se tornar escasso, ao longo do processo de crescimento econômico, o preço relativo de seus serviços aumentará, conseqüentemente, torna-se mais caro, logo, ocorre a substituição do capital natural pelo capital produzido. E a substituição, de acordo com o autor supracitado, é mais facilmente intercambiável quando há inovação tecnológica, sobretudo inovações verdes.

Já a sustentabilidade forte, considera limitada a substituição entre capital produzido e o natural. Concorde que existe a substituição, mas, considera que se o crescimento for acompanhado de escassez cada vez maior de capital natural, o desenvolvimento pode ser inviabilizado. Esta situação aconteceria porque prevaleceria a relação de complementaridade entre essas duas categorias de capital. Se houver complementaridade entre elas, para que um montante adicional de produto real seja gerado na economia, serão necessárias ambas as categorias de capital (MUELLER, 2005).

Sendo a energia elétrica um dos recursos mais fundamentais para o crescimento econômico das nações, desenvolvimento social e destruição ou conservação meio ambiente, este recurso está ligado ao conceito de sustentabilidade forte dado a sua intrínseca relação de necessidade de geração com determinadas matérias primas como petróleo, gás natural, energia solar e etc. Sua importância para a sustentabilidade e o desenvolvimento sustentável e os desafios setoriais deste capital produzido no Brasil são discorridos no capítulo a seguir.

2.2 Sustentabilidade no setor de energia e sua situação no Brasil: Importância e desafios

Mesmo após quarenta anos de discussões internacionais sobre os impactos sociais, econômicos e ambientais do presente modelo de desenvolvimento, da elaboração tanto do conceito de desenvolvimento sustentável, com destaque para o Relatório Brundtland, ainda, de acordo com a Organização das Nações Unidas, a Rio + 20 (2012):

[...] dois terços dos serviços que a natureza oferece para a humanidade estão em declínio; as emissões globais anuais de dióxido de carbono cresceram 38% entre 1990 e 2009; 20% da população internacional não têm acesso a eletricidade; a pobreza ainda mantém 57 milhões de crianças no mundo todo fora da escola e cerca de 16% dos adultos, cerca de 793 milhões de pessoas, carecem de habilidades básicas de alfabetização.

A execução das decisões tomadas nas conferências das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento Sustentável tem como maiores responsáveis tanto as nações signatárias dos acordos firmados quanto as empresas, na medida em que essas organizações e o estado têm um papel central no presente modo de produção, o capitalismo. Dentre os segmentos econômicos estratégicos tanto para os estados quanto para as empresas está a energia. Esta é um requisito fundamental para o desenvolvimento econômico e social das nações. Dispor de fontes de energia na extensão demandada e com confiabilidade adequada às necessidades do desenvolvimento é um fator crítico para o progresso. Além disso, essas devem ser economicamente competitivas e ambientalmente corretas.

Para Trigo (2004), a energia tanto no Brasil, quanto no mundo, tem importância fundamental para o desenvolvimento econômico e social. Há uma forte relação entre consumo de energia e desenvolvimento social. Logo, a energia limpa e barata é requisito fundamental para a promoção do desenvolvimento sustentável.

De acordo com Nascimento, Mendonça e Cunha (2012) e Freitas e Dathe (2015), dispor de uma matriz energética diversificada, limpa e estruturada é de fundamental importância para o desenvolvimento econômico e social de um país em respeito ao meio ambiente. A humanidade precisa encontrar meios que proporcionem o aumento dos níveis de sustentabilidade, um dos principais desafios do século XXI.

De acordo com Silva et al. (2005), a infra-estrutura energética é uma modalidade de investimento de longo prazo como: expansão da oferta, fonte de energia, emissões de gases efeito estufa, custo de produção, investimento em linhas de transmissão e distribuição e intensidade de mão de obra, diversidade e a disponibilidade de recursos e tecnologia. O papel da política e do planejamento em energia deve ser capaz de traduzir as escolhas relevantes para o desenvolvimento sustentável, oferecendo as diretrizes necessárias para direcionar os investimentos e a alocação de recursos. Deve, portanto, refletir a política estratégica de estado imune às mudanças governamentais e que garanta segurança aos investidores, empresários e consumidores.

Com isso, para Holanda e Varejão (2014), torna-se relevante estabelecer uma estratégia de expansão da matriz energética, definindo o papel das fontes tradicionais e renováveis, considerando os *tradeoffs* das diferentes opções e a complementaridade entre as fontes, tanto a curto quanto a longo prazo.

O sistema elétrico brasileiro se estabeleceu ao longo do século XX, calcado na geração centralizada em grandes usinas hidrelétricas e na construção de extensas linhas de transmissão. As incertezas ligadas diretamente à sazonalidade das chuvas apresentam um

modelo imperfeito de oferta *versus* demanda diante do caráter sazonal do regime pluvial brasileiro. As condições climáticas no Brasil favorecem a complementaridade da energia hidráulica com as demais fontes de energias renováveis, eólica, solar e a biomassa (HOLLANDA; VAREJÃO, 2014).

Além disso, na Política Nacional de Mudanças Climáticas, lei nº 12.187/09, baseada na Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas, foram previstas metas de redução de emissões de gases efeito estufa no Brasil entre 36,1% a 38,9% com base em projeções até 2020 (BRASIL, 2009). Para Freitas e Dathein (2015), a implementação dessa política vem ocorrendo em relação à ampliação da composição das energias renováveis na matriz energética, reduzindo sua intensidade em gases efeito estufa GEE e servindo de auxílio para que as metas dispostas nessa lei sejam cumpridas. Nesse sentido, a biomassa pode contribuir tanto no que se refere à materialização da presente lei, como também, para responder, de maneira efetiva, à complementaridade da energia hidráulica.

Por utilizar subproduto como o bagaço, palha e, de maneira localizada, a vinhaça como insumo energético, a bioeletricidade é uma fonte renovável de energia, neutra em carbono, segundo Goldemberg e Lucon (2007), cria 150 vezes mais empregos por unidade de energia que o petróleo. Souza e Azevedo (2006), afirmam que a geração de eletricidade por parte do setor sucroenergético encontra-se abaixo de seu potencial. Mediante a adoção de tecnologias disponíveis de co-geração a partir do bagaço, palha e vinhaça, esses subprodutos poderiam vir a contribuir para a segurança do sistema elétrico nacional.

Para Castro e Dantas (2010), a bioeletricidade trata-se de uma energia que garante incrementos à geração de energia elétrica além da complementaridade com a relação ao regime de chuvas. A safra de cana-de-açúcar ocorre entre os meses de abril e novembro, coincidindo com o período seco nas Regiões Sudeste e Centro-Oeste, o que contribui para o aumento da segurança do suprimento de energia elétrica; devido à diversificação da matriz energética. Além disso, ela é produzida em grande medida no Estado de São Paulo, o que também contribui com a eficiência econômica e elétrica ao reduzir as perdas no sistema de transmissão e na necessidade de investimentos de sua expansão.

De acordo Freitas e Dathein (2015), a produção de energia oriunda da biomassa é considerada adequada para amenizar o déficit na distribuição de energia elétrica, condição fundamental para garantir bem-estar e qualidade de vida da população, principalmente no meio rural, por meio de unidades produtoras descentralizadas, capazes de abastecer sistemas isolados e regiões do interior do país que apresentem déficit de suprimento, elevado custo e em que as redes de distribuição de energia ainda não abrangem. O quadro 1 sintetiza a

modificação na sustentabilidade em decorrência do aumento na utilização de energias renováveis.

Quadro 1 – Modificação na sustentabilidade em decorrência do aumento na utilização de energias renováveis

| Aspecto Analisado | Variação no nível de sustentabilidade | Dimensão afetada |
|-------------------------------------|---------------------------------------|------------------|
| Nível de emissão de CO ₂ | Diminui | Ambiental |
| Nível de oferta de energia | Aumenta | Econômica |
| Custo de produção | Diminui | Econômica |
| Tecnologia | Aumenta | Econômica |
| Postos de trabalho | Aumenta | Social |
| Acesso à energia | Aumenta | Social |

Fonte: Freitas e Dathein (2015).

Neste contexto, a conversão da biomassa em vetores energéticos tem se mostrado uma alternativa interessante. O potencial técnico de geração de bioeletricidade nos próximos anos é expressivo e está associado à demanda crescente de etanol e açúcar.

Porém, mesmo com os benefícios da bioeletricidade supracitados e a lei nº 12.187/09 (BRASIL, 2009), referente a Política Nacional de Mudanças Climáticas, entre 2014 e 2016, ante a crise no fornecimento de energia elétrica no Brasil, verificou-se a contratação de uma expressiva quantidade de termoeletricas movidas a óleo combustível para o fornecimento de energia elétrica para o Sistema Interligado Nacional. Para Lopez (2013), embora essas usinas possuam características técnicas e econômicas compatíveis para operarem na ponta do sistema e atuarem como *backup*, tornaram-se custosas quando passam a operar na base do sistema. Além disso, elas são intensas na emissão de gases efeito estufa, os custos de operacionalização são elevados devido à natureza da matéria prima utilizada que geralmente é importada.

Para Dantas e Parente (2010), a produção de energia elétrica a partir da cana-de-açúcar tem se mostrado de extrema relevância ambiental, econômica e social dado à venda de excedente para o sistema elétrico nacional, a geração de postos de trabalho, a mitigação de emissão de gases efeito estufa, a natureza renovável e confiabilidade no suprimento de energia, sobretudo nos meses de estiagem, e os projetos de rápida implantação e produção descentralizada. A biomassa gerada pelo setor sucroenergético pode contribuir significativamente para o fortalecimento da matriz energética brasileira.

Para Romagnoli (2005), o início da reestruturação do setor elétrico a partir das resoluções da Agência Nacional de Energia Elétrica, juntamente com leis e decretos da

Presidência da República, tem-se dado no sentido de criar um arcabouço legal que viabilize a descentralização da produção de energia. Nos anos 80, iniciou-se uma série de discussões sobre a cogeração de energia elétrica, aonde somente no final da década de 90 foram elaboradas leis, decretos e resoluções que regularizam a venda de energia elétrica dos autoprodutores para as concessionárias.

Inserida nesta política, a lei nº 9.478 de 06 de agosto de 1997, referente à política energética nacional, centra-se na preservação do interesse nacional, na promoção do desenvolvimento, ampliação do mercado de trabalho, valorização dos recursos energéticos, proteção dos interesses do consumidor quanto ao preço da energia, qualidade e oferta dos produtos ofertados e proteção do meio ambiente. Como principais diretrizes desta lei, destacam-se: estímulo à competição, elevação dos níveis de eficiência, competitividade dos sistemas energéticos, racionalização da produção de energia, diversificação da produção energética, descentralização, aproveitamento das oportunidades de integração energética entre regiões, adoção do planejamento integrado de recursos, inovação tecnológica e utilização de novas tecnologias (BRASIL, 1997).

Brighenti (2003) e Agência Nacional de Energia Elétrica (1999a, 1999b, 1999c, 2004, 2005a, 2005b, 2007a, 2007b, 2008, 2012) e Brasil (2015) elencam uma série de resoluções e decretos-lei relacionados à geração distribuída e a cogeração de energia elétrica das quais cita os mais relevantes e recentes:

- **Lei 9.074, de 20 de julho de 1995:** Instituiu a figura do produtor independente de energia (PIE), e que também garante o livre acesso aos sistemas de transmissão e distribuição mediante ressarcimento do custo de transporte envolvido (BRASIL, 1995);
- **Decreto nº 2.003, de 10 de setembro de 1996:** Regulamentou a produção de energia elétrica por autoprodutor e produtor independente de energia (BRASIL, 1996);
- **Lei nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996:** Institui a ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica (BRASIL, 1996);
- **Decreto nº 2.655 de 02 de julho de 1998:** Regulamenta o MAE – Mercado Atacadista de Energia e o ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico (BRASIL, 1998);
- **Resolução ANEEL nº 112, de 18 de maio de 1999:** Estabelece os requisitos necessários à obtenção de registro e autorização para a implantação, ampliação ou repotenciação de centrais geradoras termoeletricas, eólicas e de outras fontes de energia, tais como o bagaço de cana (ANEEL, 1999a);

- **Resoluções ANEEL nº 281 de 01 de outubro de 1999:** Estabelecem as condições gerais de contratação de acesso, compreendendo o uso e conexão aos sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica e as tarifas de uso dos sistemas de distribuição de energia elétrica (ANEEL, 1999b);
- **Resolução ANEEL nº 233, de 29 de julho de 1999:** Estabelece os valores normativos que limitam o repasse para as tarifas de fornecimento, dos preços livremente negociados na aquisição de energia elétrica, por parte dos concessionários e permissionários (ANEEL, 1999c);
- **Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002:** Cria o PROINFA – Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica e a CDE – Conta de Desenvolvimento Energético e trata da universalização do atendimento (BRASIL, 2002);
- **Lei nº 10.847 de 15 de março de 2004:** Autoriza a criação da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) e dá outras providências (BRASIL, 2004);
- **Lei nº 10.848 de 15 de março de 2004:** Dispõe sobre a comercialização de energia elétrica. É aonde, pela primeira vez, cita-se a figura do Gerador Distribuído (BRASIL, 2004);
- **Decreto nº 5.163, de 30 de julho de 2004:** Regulamenta a comercialização de energia elétrica, o processo de outorga de concessões e de autorizações de geração de energia elétrica e dá outras providências. Tal decreto foi o mais importante até o momento para a Geração Distribuída, uma vez que este delineou o mercado a ser atendido por tais geradores. Ou seja, pode se concluir desta definição que, é considerada GD na Legislação Brasileira as PCH's até o limite de 30 MW, a cogeração “qualificada” e qualquer geração que utilize biomassa e subproduto sólidos a exemplo do setor sucroenergético não importando a sua eficiência (BRASIL, 2004);
- **Decreto nº 5.175, de 09 de agosto de 2004:** Constitui o Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico – CMSE (BRASIL, 2004);
- **Decreto nº 5.177, de 12 de agosto de 2004:** Dispõe sobre a organização, as atribuições e o funcionamento da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica – CCEE (BRASIL, 2004);
- **Resolução ANEEL nº 328, de 12 de agosto de 2004:** Aprova o estatuto do Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS (BRASIL, 2004);
- **Decreto nº 5.184, de 16 de agosto de 2004:** Cria a empresa de Pesquisa Energética – EPE, e dá outras providências (BRASIL, 2004);

- **Decreto nº 5.249, de 20 de outubro de 2004:** Dá nova redação ao inciso XI do § 2º do art. 1º do Decreto no 5.163, de 30 de julho de 2004, que regulamenta a comercialização de energia elétrica, o processo de outorga de concessões e de autorizações de geração de energia elétrica (BRASIL, 2004);
- **Resolução ANEEL nº109 de 26 de outubro de 2004:** Institui a Convenção de Comercialização de Energia Elétrica, estabelecendo a estrutura e a forma de funcionamento da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica – CCEE (ANEEL, 2004);
- **Resolução ANEEL nº167 de 11 de outubro de 2005:** Estabelece as condições para a comercialização da energia elétrica, proveniente de geração distribuída, por concessionária, permissionária ou autorizada de serviço público de distribuição, que atue no Sistema Interligado Nacional – SIN (ANEEL, 2005a);
- **Resolução ANEEL nº205 de 26 de dezembro de 2005:** Estabelece os procedimentos e as condições gerais, para o enquadramento de cooperativas de eletrificação rural, como permissionária de serviço público de distribuição de energia elétrica, e autorização para operação de instalações de distribuição de uso privativo, em área rural, bem como aprova o modelo de Contrato de Permissão (ANEEL, 2005b);
- **Resolução ANEEL nº 271 de 18 de julho de 2007:** Estabelece os procedimentos vinculados à redução das tarifas de uso dos sistemas elétricos de transmissão e de distribuição, para empreendimentos hidrelétricos, caracterizados como Pequena Central Hidrelétrica, e aqueles com fonte solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, com potência instalada menor ou igual a 30.000 kW (ANEEL, 2007a);
- **Resolução ANEEL nº 284 de 30 de outubro de 2007:** Altera os arts. 3º e 4º da Resolução Normativa ANEEL 228 de 25.07.2006, que estabelece os requisitos para a certificação de centrais geradoras termelétricas na modalidade de geração distribuída, para fins de comercialização de energia elétrica no Ambiente de Contratação Regulada – ACR (ANEEL, 2007b);
- **Resolução ANEEL nº 304 de 13 de março de 2008:** Altera os arts. 1º, 2º, 3º, 4º e 5º da Resolução ANEEL 371 de 29.12.1999, que regulamenta a contratação e comercialização de reserva de capacidade por autoprodutor ou produtor independente, para atendimento a unidade consumidora diretamente conectada às suas instalações de geração (ANEEL, 2008);

- **Resolução ANEEL n° 482 de 19 de abril de 2012:** Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuídas aos sistemas de distribuição de energia elétrica e o sistema de compensação de energia elétrica e o acesso ao Sistema de Distribuição, do PRODIST, de forma a contemplar a inclusão do acesso a de Micro e Minigeração Distribuída com as adequações necessárias nesse Módulo (ANEEL, 2012);
- **Portaria n° 538 de 16 de dezembro de 2015:** Cria o Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica - ProGD, e institui Grupo de Trabalho, no âmbito do ProGD (BRASIL, 2015).

2.2.1 Geração distribuída

Geração distribuída (GD) é a instalação de pequenas unidades geradoras próximas aos consumidores. Essas unidades geradoras podem ou não estar ligadas à rede de distribuição e têm como principais vantagens: a maior confiabilidade e aproveitamento da energia gerada a partir da cogeração ou trigeração (produção simultânea de eletricidade, calor e frio), redução de perdas de transmissão e o aproveitamento das diversas fontes de energia existentes no local de consumo aonde diversas matrizes energéticas podem ser usadas: fotovoltaica, eólica, biomassa e pequenas centrais hidrelétricas (BONA; RUPPERT FILHO, 2004).

Pequenas unidades de GD podem ter seu potencial melhor aproveitado quando organizadas como micro redes (micro grids). Micro redes são grupos de cargas e micro gerações que operam em conjunto como se fossem um único sistema provedor de eletricidade e de calor. As micro redes têm como principais benefícios: a confiabilidade, redução de perdas, controle de tensão, alta eficiência a partir do aproveitamento da energia térmica despendida e ininterrupção do fornecimento de energia (BONA; RUPPERT FILHO, 2004).

Além disso, as unidades de GD poderão fornecer serviços ancilares, desde que as unidades de GD estejam agrupadas em micro redes. Os serviços ancilares constituem requisitos técnicos fundamentais para que o sistema elétrico opere com qualidade e segurança (CHAVES, 2009).

Como exemplo desses serviços, pode-se citar:

- **Controle de frequência:** Controle realizado pelas unidades geradoras, de modo a limitar e, posteriormente, extinguir a variação de frequência causada pelo desequilíbrio entre carga e geração (ANEEL, 2003);

- **Reserva de potência:** Provisão de reserva de potência ativa efetuada pelas unidades geradoras para realizar o controle de frequência (ANEEL, 2003);
- **Reserva de prontidão:** Disponibilidade de unidades geradoras com o objetivo de recompor as reservas de potência (ANEEL, 2003);
- **Suporte de reativos:** Fornecimento ou absorção de energia reativa destinada ao controle de tensão da rede de operação, mantendo-a dentro dos limites de variação estabelecidos (ANEEL, 2003);
- **Auto-restabelecimento (Black start):** Capacidade que tem uma unidade geradora de sair, independentemente de fonte externa, de uma condição de parada total para uma condição de operação (ANEEL, 2003).

2.2.2 Comercialização de energia elétrica

No Brasil, os leilões são a principal forma de contratação de energia elétrica. Esse mercado, de acordo com o Ministério de Minas e Energia (2009) e a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (2015), é dividido em dois ambientes comerciais: mercado regulado e o mercado livre.

2.2.2.1 Mercado Regulado

Para a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (2016), o ambiente de contratação regulado (ACL) é o ambiente de contratação aonde o consumidor é protegido com tarifas reguladas, de forma que pequenos consumidores e consumidores que não administram contratos de compra de energia elétrica não estejam expostos a variação tarifária.

A comercialização é realizada a partir de leilões pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. Os compradores de energia são participantes do leilão e formalizam suas negociações por meio de contratos registrados. Após o leilão, realizado entre os proponentes, a venda de energia é realizada e os contratos de comercialização são registrados, aonde o fornecedor tem a obrigação legal de vender a quantidade contratada e ao preço estipulado no leilão (CCEE, 2016)

No Ambiente de Contratação Regulada (ACR), os agentes vendedores (geradores, comercializadores e autoprodutores) e as distribuidoras estabelecem contratos de Comercialização de Energia no Ambiente Regulado (CCEAR) precedidos de licitação, ressalvados os casos previstos em lei, conforme regras e procedimentos de comercialização específicos.

Os leilões realizados no ACR, de acordo com Lopez (2013), fundamentam-se nas seguintes premissas:

- Contratar energia para os consumidores cativos pela menor tarifa possível;
- Conceder ao investidor um contrato de fornecimento de longo prazo, que funcione como garantia de receita para obtenção de financiamento;
- Proporcionar incentivos corretos para a expansão da geração, combinando o planejamento e instrumentos de mercado.

Os leilões de energia do ACR são realizados com antecedência no ano de início do suprimento, conhecido nesse mercado como ano “A”. Esses leilões, de acordo com Ministério de Minas e Energia (2009) e a Câmara de Comercialização em Energia Elétrica (2015), se subdividem em:

- **LEE A1:** Os leilões de energia existente A-1 são os leilões de empreendimentos existentes que já estão em operação, cujos investimentos já foram amortizados e possuem um custo mais baixo. A maioria são constituídos por geração de fonte hidráulica realizado com 1 (um) ano de antecedência do início do suprimento;
- **LEN A-3 e A-5:** Os leilões de energia nova A-3 e A-5 são os leilões de novos empreendimentos de energia. Estes leilões podem ser de dois tipos: A -5 (usinas que entram em operação comercial em até cinco anos) e A -3 (em até três anos). Nestes tipos de leilões há projetos de diferentes portes, sendo eles privados, estatais ou mistos. Os projetos vencedores recebem garantia de fluxo de caixa, viabilizando as linhas de financiamento que têm como finalidade atender ao aumento de carga das distribuidoras;
- **LFA A-1 e A-5:** Os leilões de fonte alternativa A-1 e A-5 têm como objetivo atender ao crescimento do mercado no ambiente regulado e aumentar a participação de fontes alternativas de energia como a eólica, fotovoltaica, biomassa e de pequenas centrais hidrelétricas (PCHs) – na matriz energética brasileira. Estes leilões podem ser de dois tipos: A -1 (usinas que entram em operação comercial em até um ano) e A-5 (em até cinco anos). As grandes centrais hidrelétricas não entram nesses leilões pelo fato de necessitarem de grandes áreas alagadas;
- **LE:** Os leilões de excedentes têm como objetivo a venda dos excedentes de energia elétrica das concessionárias e autorizadas de geração decorrentes da liberação dos contratos iniciais, bem como os montantes estabelecidos nas Resoluções ANEEL nº 267, 450 e 451;

- **LER:** Os leilões de energia de reserva são os leilões que visam garantir a segurança do Sistema Interligado Nacional, seja de novos empreendimentos de geração ou, de empreendimentos existentes. Foi a partir desses leilões que grande parte da bioeletricidade foi negociada. Como o despacho proveniente dessa contratação é inflexível, a energia contratada nesses leilões é complementar e não deve ser usada para lastrear o consumo. A energia de reserva é contabilizada e liquidada no mercado de curto prazo operado pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE);
- **LPE:** Os leilões de projetos estruturantes são leilões de compra de energia proveniente de projetos de geração de caráter estratégico para o Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) e aprovados pelo presidente da República que garantem um ponto ótimo entre modicidade tarifária e confiabilidade de fornecimento com o objetivo de garantir o atendimento à demanda nacional de energia elétrica. Uma vez que esses contratos são de longo prazo, com correção baseada no Índice de Preços Consumidor Amplo, esses instrumentos permitem o estabelecimento de um fluxo de caixa estável para o empreendedor;
- **LA:** Os leilões de ajuste visam adequar a contratação de energia pelas distribuidoras, tratando eventuais desvios oriundos da diferença entre as previsões feitas pelas distribuidoras em leilões anteriores e o comportamento de seu mercado. Como resultado desse leilão, são firmados contratos de curta duração (de três meses a dois anos).

2.2.2.2 *Mercado Livre*

O ambiente de contratação livre é o mercado no qual o produtor independente de energia elétrica negocia o preço diretamente com o consumidor final, sendo esse caracterizado como consumidor livre ou consumidor livre especial. O consumidor livre, com data de conexão ao sistema, anterior a 07 de julho de 1995, é aquele cuja demanda de energia elétrica é superior a 3 MW e a tensão superior a 69 kV. Já os consumidores com data de conexão ao sistema, posterior à data supracitada, não precisam atender a esse requisito de tensão e voltagem. O consumidor livre pode comprar energia elétrica de qualquer fonte de energia, inclusive de grandes hidrelétricas (CCEE, 2016).

Já o consumidor livre especial deve atender ao requisito mínimo de potência de 0,5 MW sem requisitos para tensão. Esse consumidor pode comprar energia somente de fontes

alternativas de energia elétrica. Essas fontes recebem desconto na tarifa de uso do sistema de transmissão (CCEE, 2016).

A negociação no ambiente de contratação livre não é regulado diretamente por nenhum órgão público, mas o contrato de venda deve ser registrado nos Contratos de Compra de Energia Incentivada. Nesse ambiente, as taxas de uso dos sistemas de transmissão e distribuição serão cobradas pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e pelo agente de distribuição local. Nesse mercado, o ICMS é cobrado diariamente (CCEE, 2010).

No Ambiente de Contratação Livre (ACL), os geradores, consumidores livres, autoprodutores, comercializadores, importadores e os exportadores de energia estabelecem entre si contratos bilaterais de compra e venda de energia com preços e quantidades livremente negociados, conforme regras e procedimentos de comercialização específicos.

As diferenças na comercialização de energia elétrica entre o mercado regulado e o mercado livre é sintetizado no quadro 2.

Quadro 2 – Principais diferenças entre o ACR e o ACL

| | Ambiente de contratação regulado | Ambiente de contratação livre |
|--------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Compradores | Distribuidores (consumidores cativos) | Consumidores livres, comerciantes e exportadores de energia |
| Vendedores | Autoprodutores, importadores, geradores públicos, produtores independentes e comerciantes de energia | Autoprodutores, produtores independentes e importadores. |
| Preço | Menor preço leilado | Preços livremente negociados |
| Competição | Na expansão da geração a partir dos leilões de menor preço | Cada produtor busca seu cliente comercializando para os consumidores livres energia disponível, limitando a energia assegurada no sistema interligado. |
| Contratação | Prazo de no mínimo 15 e no máximo 30 anos | Contratos bilaterais |

Fonte: Tahan (2013).

2.2.3 Barreiras a geração distribuída

Devido ao fato da geração distribuída ser um sistema não consolidado em sistemas de energia elétrica e ter grande correlação com o uso de fontes renováveis que em sua maioria apresentam pouca maturidade tecnológica, obstáculos das mais diversas naturezas, e acrescentam riscos e incertezas, o que pode inibir investimentos nestas novas fontes.

Painuly (2000), Martinot (2004), Romagnoli (2005) e Ghering (2014), elencam uma série de barreiras de entrada no mercado para fontes renováveis de energia, dentre elas, a vinhaça. Estes obstáculos, quando não contornados, contribuem para a diminuição de

investimentos na área de geração distribuída. Dentre as barreiras pode-se citar.

2.2.3.1 Barreiras Regulatórias

- **Procedimentos de rede de distribuição:** Padrões técnicos de conexão e atendimento à rede de distribuição estão ainda pouco explicitados na legislação. O que se possui disponível no momento é a Resolução ANEEL nº 281 de 01 de outubro de 1999, com algumas alterações, o que é insuficiente em relação à divisão de responsabilidades quando o acesso se dá na rede de distribuição (BRIGHENTI, 2003);
- **Tarifas de transmissão e distribuição:** As distorções como os subsídios entre os grupos tarifários das concessionárias, as diferenças entre tarifas nos diferentes postos tarifários são o fato das tarifas de gás serem desacopladas economicamente das tarifas de eletricidade (ROMAGNOLI, 2005).

2.2.3.2 Barreiras Ambientais

- **Dificuldades na obtenção das licenças ambientais:** A lentidão na fase de permissão e obtenção de licenças ambientais pode atrasar a construção de novos empreendimentos na área de energia renovável, além de aumentar seus custos (PAINULY, 2000);
- **Mensuração dos custos evitados e das externalidades ambientais:** Os modelos de análise utilizados pelos investidores ainda não contemplam os benefícios trazidos pelos investimentos em geração distribuída e em fontes renováveis, tais como redução de custos em transmissão, distribuição pela concessionária e benefícios ambientais e sociais trazidos pelas fontes renováveis (ROMAGNOLI, 2005).

2.2.3.3 Barreiras Econômicas e Políticas

- **Tributação e encargos:** Tributos federais como IR, PIS, COFINS e CSLL e o imposto estadual ICMS são aplicados sobre a comercialização de energia elétrica (GEHRING, 2014);
- **Estrutura tarifária das concessionárias:** As concessionárias não possuem informativos tarifários em tempo real, de modo a sinalizar quando as mesmas variam conforme a variação dos custos em um dado momento. Com isso, as fontes renováveis deixam de aproveitar os períodos de altos preços das matrizes energéticas tradicionais para ganharem em competitividade (PAINULY, 2000);

- **Informações de custo:** A geração distribuída poderá ampliar sua capilaridade no país e possuir fundamentação econômica quando for instalada em regiões que possuam alto custo para expansão dos sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica (ROMAGNOLI, 2005);
- **Altas taxas para importação de equipamentos:** Nas fontes renováveis, principalmente as usinas eólicas e fotovoltaicas, muitas peças são importadas e sujeitas à taxas de importação e o real desvalorizado em relação ao dólar, dificulta a competitividade do empreendimento (ROMAGNOLI, 2005);
- **Subsídios para as fontes convencionais:** As grandes centrais elétricas, principalmente as termelétricas, utilizam subsídios relacionados aos seus respectivos combustíveis (MARTINOT, 2004);
- **Instabilidades políticas e econômicas:** Alterações no quadro jurídico do setor, novas políticas para o setor, incertezas quanto às taxas de juros, inflação, crescimento do mercado também podem impedir investimentos em novas unidades de produção de energia, sejam elas distribuídas ou centralizadas, renováveis ou não (ROMAGNOLI, 2005);
- **Falta de infraestrutura para implantação de fontes renováveis:** Falta de estradas até o parque gerador, falta de estrutura de comunicações, dificuldade de conexão à rede e outras necessidades logísticas podem causar encarecimento ou até a inviabilidade dos investimentos (ROMAGNOLI, 2005);
- **Carência de programas de incentivo às fontes renováveis no Brasil:** Com exceção do PROINFA, no Brasil, não há programas de incentivos às fontes renováveis que busquem novos investimentos nestas fontes (ROMAGNOLI, 2005);
- **Ausência de usinas em escala industrial:** Projetos para geração de energia elétrica a partir do biogás gerado pela biodigestão da vinhaça apresentam elevados investimentos e o retorno não é conhecido, dada a falta de plantas industriais em operação que comprovem sua viabilidade econômica (GEHRING, 2014);
- **Taxas de juros e câmbio:** As elevadas taxas de juros praticadas pelas instituições financeiras no Brasil podem tornar o projeto inviável, nesse sentido, a busca por financiamento internacional com juros mais atrativos pode ser uma alternativa, porém a depreciação do real frente ao dólar é um obstáculo para essa alternativa (GEHRING, 2014);

- **Preço da energia elétrica:** A matriz energética do Brasil é predominantemente hidráulica e com baixo custo do MW/h, o que impõe uma barreira de entrada às outras matrizes de produção de energia elétrica (GEHRING, 2014);
- **Intervenção governamental:** Interferências governamentais no preço final da energia elétrica, a partir de subsídios e congelamento de preços, podem refletir na confiança do investidor, na instabilidade do mercado. (ROMAGNOLI, 2005).

2.2.3.4 Barreiras à Operação do Sistema

- **Fontes de energia com pouca previsibilidade:** Ocorrem principalmente com as fontes renováveis, aonde a característica intermitente do insumo para produção de eletricidade como a água, radiação solar e os ventos, logo, não possuem uma larga previsibilidade de produção, o que onera o investimento (ROMAGNOLI, 2005);
- **Qualidade no fornecimento:** Ao integrar a unidade geradora na rede elétrica, deve-se manter os padrões de qualidade de energia desejáveis, aonde o controle do nível de tensão, frequência, potência reativa, frequência de interrupções são variáveis medidas e padronizadas pelas distribuidoras (ROMAGNOLI, 2005);
- **Intermitência no fornecimento:** Variação de potência pelas fontes geradoras de energia elétrica é prejudicial no fornecimento. O biogás é de difícil armazenamento, sendo necessário fornecimento constante de matéria prima (GEHRING, 2014);
- **Conexão ao sistema de distribuição:** A conexão à rede de energia elétrica é determinante para viabilidade econômica para geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis. Gastos com subestações podem elevar consideravelmente os investimentos e os custos com operacionalização e manutenções, conseqüentemente, inviabilizando o projeto (GEHRING, 2014).

2.2.4 Atual situação da biomassa nos leilões de eletricidade

Após o leilão de energia de reserva realizado em 2008, de acordo Castro e Dantas (2010), exclusivo para empreendimentos de biomassa, observou-se que esse combustível vem perdendo em competitividade nos leilões, sobretudo para a energia eólica, o que vem demonstrando que os leilões estão buscando muito mais a modicidade tarifária do que a inclusão de fontes alternativas.

A pretensa falta de competitividade é o resultado da metodologia de contratação dos leilões que não auferem corretamente os benefícios da bioeletricidade para o sistema elétrico

brasileiro, dada a sua complementaridade no fornecimento de energia elétrica com o parque hidroelétrico nacional. A bioeletricidade sucroenergética é uma fonte de energia que contribui para a segurança da oferta brasileira de energia elétrica, mas que não tem sido devidamente valorizada nos leilões. Além disso, muitas usinas produtoras de bioeletricidade estão longe das subestações capazes de escoar a energia elétrica produzida. Com isto, o acesso à rede acaba constituindo-se em uma barreira para a incorporação de novos empreendimentos de geração movidos à bioeletricidade (CATRO; DANTAS, 2010).

Para Lopez (2013), a bioeletricidade sucroenergética deve se tornar competitiva em custos para obter êxito nos leilões ACR. Porém, no ACL há potenciais oportunidades de comercialização. Os leilões do ACR se apresentavam para o setor sucroenergético como alternativa de longo prazo, que ofereceria garantias de receita de longo prazo. Essas garantias, eram oferecidas para fins de obtenção de financiamento construção de projetos termelétricos junto aos bancos de desenvolvimento.

Por sua vez, o ACL se apresenta como uma opção para comercialização dos excedentes de energia elétrica, dado que as empresas compradoras e fornecedoras estabeleçam acordos comerciais frequentemente mais vantajosos do que aqueles estabelecidos no Ambiente de Contratação Regulado (LOPEZ, 2013).

Mesmo com as distorções metodológicas nos leilões do ACR e na contratação de termelétricas na crise de fornecimento de energia elétrica entre 2014 e 2016, para Rego e Hernandez (2006), a cana-de-açúcar, principal expoente das energias renováveis, não pode se restringir à produção de etanol e queima do bagaço; todos os seus subprodutos podem ser aproveitados, tais como a palha da cana e a vinhaça para produção de energia elétrica, como também de créditos de carbono no mecanismo de desenvolvimento limpo, aonde sua importância, oportunidades e desafios são dissertados no próximo capítulo.

2.3 Mecanismo de desenvolvimento limpo: conceito, desafios e oportunidades

2.3.1 Convenção Quadro das Nações Unidas para a Mudança Climática e a Conferência das Partes de Kyoto

As ameaças ambientais, sociais e econômicas consequentes das mudanças climáticas, levaram as nações à Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente, em 1992, no Rio de Janeiro, também conhecida como a Rio 92 a assinarem Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas Globais – CQNUMC. Esta Convenção foi ratificada pelos 154 países mais a União Europeia.

O objetivo da CQNUMC:

[...] é o de alcançar, em conformidade com as disposições pertinentes desta Convenção, a estabilização das concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera num nível que impeça uma interferência antrópica perigosa no sistema climático. Esse nível deverá ser alcançado num prazo suficiente que permita aos ecossistemas adaptarem-se naturalmente à mudança do clima, que assegure que a produção de alimentos não seja ameaçada e que permita ao desenvolvimento econômico prosseguir de maneira sustentável (UNFCCC, 1992).

Para a implementação dos objetivos da CQNUMC, foi fundada a Conferência das Partes, a COP, aonde para Cermano (2004), inclui as nações que ratificaram a Convenção Quadro das Nações Unidas e mais um grupo de observadores convidados (organizações internacionais como UNEP, UNCTAD, WMO, OCDE, IEA e ONG's credenciadas). O objetivo da COP é promover a implementação dos objetivos da UNFCCC, revisar os acordos existentes periodicamente levando em conta os objetivos da convenção.

Para Brasil (2012), entre os princípios da COP, estão o de “responsabilidades comuns e diferenciadas” aonde afirma que cada país deve reduzir suas emissões de gases efeito estufa, mas, aqueles responsáveis pela maior parte das emissões no transcorrer da história devem realizar um esforço maior. Como resultado deste princípio, países desenvolvidos devem assumir a liderança no combate às mudanças climáticas e suas consequências, prestando apoio financeiro e tecnológico às nações subdesenvolvidas.

Outrossim, a Convenção estabelece que as partes devem cooperar entre si para promover um sistema econômico internacional favorável, capaz de promover desenvolvimento econômico sustentável para todas as nações, especialmente nações mais pobres, para que elas possam lidar com as mudanças climáticas.

Para a consecução da cooperação supracitada, de acordo com Pereira (2002), em 1997, foi realizada a terceira Conferência das Partes, a COP 3, na cidade de Kyoto, no Japão, contando com representantes de 159 nações e a participação de cerca de 10.000 pessoas que culminou na adoção do Protocolo de Kyoto, um dos marcos mais importantes desde a criação da CQNUMC no combate ao aquecimento global.

Para Zilber e Koga (2011), o Protocolo de Kyoto foi um acordo assinado por 84 países e definiu que os países elencados no Anexo I (Alemanha, Austrália, Áustria, Bielorrússia, Bélgica, Bulgária, Canadá, Croácia, Dinamarca, Eslováquia, Eslovênia, Espanha, EUA, Estônia, Finlândia, França, Grécia, Holanda, Hungria, Irlanda, Islândia, Itália, Japão, Letônia, Liechtenstein, Lituânia, Luxemburgo, Mônaco, Nova Zelândia, Noruega, Polônia, Portugal, Reino Unido e Irlanda do Norte, República do Norte, República Checa, Romênia, Rússia, Suíça, Turquia e Ucrânia) reduziram em pelo menos 5,2% suas emissões de gases de efeito

estufa em relação aos níveis de 1990 até 2012, estabelecendo sanções para os não cumpridores, conseqüentemente, impedindo, para Yu (2004), o avanço da interferência antrópica que causam as alterações climáticas. A União Europeia assumiu o compromisso de reduzir em 8%; os Estados Unidos assinaram em uma redução de 7%; e o Japão concordou em reduzir 6%. Alguns países como a Rússia e Ucrânia não assumiriam compromisso de redução e outros como Islândia, Austrália e Noruega ainda teriam permissão para aumentar suas emissões.

Para execução dos objetivos definidos pelo Protocolo de Kyoto para sequestro e mitigação dos GEE, originaram-se os três mecanismos de flexibilização para cumprimento das metas:

- **Implementação Conjunta (IC) ou *Joint Implementation* (JI):** os países do anexo I trabalham entre si para o cumprimento de suas metas. (BRASIL, 2002; YU, 2004);
- **Comércio Internacional de Emissões:** criação de mecanismos internos pelos países desenvolvidos, nos quais são acordadas entre o governo e as empresas, visando reduções menores que as metas estabelecidas (BRASIL, 2002; YU, 2004);
- **Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) ou o *Clean Development Mechanism* (CDM):** é o que possui aplicabilidade para o Brasil. Nesse caso, os países desenvolvidos podem comprar reduções de emissões de países em desenvolvimento cujas reduções são resultantes de iniciativas implementadas com o objetivo de diminuição de emissão de CO₂ e outros GEE desses países (BRASIL, 2002; YU, 2004).

O Protocolo de Kyoto entrou em vigor no dia 16 de fevereiro de 2005, dois meses após ter sido assinado pela Rússia (17,4% das emissões), completando o mínimo de 55 países que representam pelo menos 55% das emissões de gases de efeito estufa, conforme dispunha o documento. De acordo com Conti (2005), os Estados Unidos, não aderiram ao acordo, sob o argumento de que isso afetaria negativamente sua economia, recusa que, evidentemente, tornou frágil a eficiência do Protocolo. O Brasil aderiu em 23 de julho de 2002, data da sanção presidencial.

2.3.2 O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo – MDL

A partir do Protocolo de Kyoto, foram elaborados instrumentos de flexibilização da emissão de gases efeito estufa, entre eles o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, previsto no Artigo 12º do Protocolo de Kyoto.

A proposta do MDL consiste em que cada tonelada de CO₂ deixada de ser emitida ou retirada da atmosfera por um país em desenvolvimento, poderá ser negociada no mercado mundial, criando um novo atrativo para a redução das emissões globais. Os países do ANEXO 1 estabelecerão em seus territórios metas para redução de CO₂ junto aos principais emissores. As empresas que não conseguirem, ou não desejarem, reduzir suas emissões, poderão comprar Certificados de Emissões Reduzidas (BRASIL, 2012).

De acordo com Rocha (2003), o MDL consiste em um instrumento de mercado pelo qual o desenvolvimento sustentável promove ações atenuantes aos impactos ambientais, outrossim, promove ganhos econômicos e financeiros as organizações envolvidas a partir da comercialização dos créditos de carbono.

A grande motivação do MDL baseia-se na diferença de custos de redução de emissões de GEE. Essa diferença no custo marginal é o atrativo para o mercado de crédito de carbono, de modo a cumprir o acordo com menores preços.

Para Bem e Tonello (2007), o custo para o sequestro de uma tonelada de carbono, para o ano de 2007 nos EUA foi de US\$ 236,00, no Japão US\$ 436,00 e na União Europeia de US\$ 180,00. A participação dos países que não fazem parte do Anexo I podem cortar 55% dos custos da mitigação de gases efeito estufa, e isso abre perspectivas econômicas para o Brasil que possui custo marginal de US\$ 10,00.

Desta forma, propõe-se reduzir as emissões por meio de sistema baseado no mercado de licenças de emissões negociáveis para que as reduções se realizem nos locais que forem mais baratas. Os países desenvolvidos podem usar reduções de emissões certificadas em projetos localizados em países em desenvolvimento para cumprir as metas de redução de gases como parte de seu compromisso.

Segundo Souza (2001), o mercado verde mostra-se como uma medida que visa promover programas de desenvolvimento sustentável, nesse sentido, os projetos de MDL podem ser divididos em duas categorias: (I) projetos de redução de emissão, associado ao deslocamento de emissões oriundas da queima de combustíveis e/ou captura e queima de metano; e (II) projetos de remoção de CO₂ atmosférico, ou, como são usualmente chamados de sequestro de carbono, relacionados a captação e estocagem de carbono em ecossistemas florestais.

Nesse sentido, o MDL configura-se em uma grande oportunidade para que o Brasil promova o desenvolvimento sustentável e ao mesmo tempo melhore sua capacidade tecnológica e financeira, atraindo recursos para a realização de projetos limpos (BRASIL, 2005).

Entre os principais projetos MDL no Brasil, de acordo com Cemanos (2005, p. 2), estão:

[...] co-geração de energia com biomassa; tratamento de Subproduto Sólidos Urbanos e aproveitamento de biogás em aterros sanitários; substituição de combustíveis e/ou aumento de eficiência energética em processos industriais; instalação de biodigestores para captação de metano em granjas de confinamento (particularmente suinocultura; implantação de pequenas centrais hidrelétricas (PCHs); e os projetos de reflorestamento.

Estes setores são os que mais atraem o interesse dos participantes de projetos. A predominância das atividades de projeto em energia renovável, indústria energética e aterro sanitário.

Para Klabin (2000), o Brasil encontra-se em uma situação ímpar, pelo grande território que ocupa em latitudes tropicais e semitropicais, para desenvolver reflorestamentos voltados para absorção de carbono.

Além disso, a potencialidade brasileira nos mercados de crédito de carbono dentro do MDL é devida, sobretudo, a sua vantagem competitiva no setor agropecuário, aonde está concentrado o maior volume de projetos relacionado ao aproveitamento de subproduto para geração de energia, matriz energética limpa, com destaque para hidroelétricas e combustíveis renováveis e agroflorestais, aonde a recuperação da vegetação original está associada à florestas de uso múltiplo, a partir do plantio de espécies nativas e espécies de crescimento rápido, implicando na absorção de CO₂ e na manutenção dos outros serviços ambientais das florestas (KLABIN,2000).

Logo, o potencial de oportunidades para projetos de MDL no Brasil para energia, subproduto sólidos, eficiência energética e florestas está sintetizado na tabela 1.

Tabela 1 – Matriz consolidada das oportunidades de projetos de MDL – Energia, subprodutos sólidos, eficiência energética e florestas

| TIPOS DE TRANSAÇÕES | Geração elétrica a partir de fontes renováveis de energia | Subprodutos sólidos urbanos | Eficiência energética | Florestas | Combustíveis líquidos renováveis | TOTAL |
|----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------------------------|------------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| Potencial de iniciativas em andamento | 1,75 a 4,2 10 ⁶ t CO ₂ /ano | 2,3 10 ⁶ t CO ₂ /ano | 6,5 a 12,2 10 ⁶ t CO ₂ /ano | 2,92 10 ⁶ t CO ₂ /ano | - | 13,5 a 21,6 10⁶ t CO₂/ano |
| | US\$ 8,75 a 21 milhões/ano | US\$ 11,4 milhões/ano | US\$ 33,1 a 61,2 milhões/ano | US\$ 5,4 milhões/ ano | - | US\$ 58,6 a 99,0 milhões/ano |

Fonte: Rezende, Dalmácio e Ribeiro (2012, p. 112).

Tabela 1 – Matriz consolidada das oportunidades de projetos de MDL – Energia, subprodutos sólidos, eficiência energética e florestas

| TIPOS DE TRANSAÇÕES | Geração elétrica a partir de fontes renováveis de energia | Subprodutos sólidos urbanos | Eficiência energética | Florestas | Combustíveis líquidos renováveis | TOTAL |
|---------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| Potencial de iniciativas tecnicamente viáveis no curto/médio prazo | 10,0 a 19,6 10 ⁶ t CO ₂ /ano | 11,5 a 12,1 10 ⁶ t CO ₂ /ano | 0,154 10 ⁶ t CO ₂ /ano | - | 5,5 a 6,2 10 ⁶ CO ₂ /ano | 24,2 a 38,1 10⁶ t CO₂/ano |
| | US\$ 49,9 a 98,1 milhões/ano | US\$ 57,7 a 60,1 milhões/ano | US\$ 0,771 milhões/ano | - | US\$ 27,2 a 30,7 milhões/ano | US\$ 135,6 a 189,7 milhões/ano |
| Potencial teórico de projetos de florestamento e reflorestamento | - | - | - | 47,7 10 ⁶ t CO ₂ /ano | - | 47,7 10⁶ t CO₂/ano |
| | - | - | - | US\$ 47,7 a 242 milhões/ano | - | US\$ 47,7 a 242 milhões/ano |
| TOTAL | 11,75 a 23,8 10 ⁶ t CO ₂ /ano | 13,8 a 14,4 10 ⁶ t CO ₂ /ano | 6,7 a 12,4 10 ⁶ t CO ₂ /ano | 50,6 10 ⁶ t CO ₂ /ano | 5,5 a 6,2 10 ⁶ t CO ₂ /ano | 88,3 a 107,4 10⁶ CO₂/ano |
| | US\$ 58,7 a 119,1 milhões/ano | US\$ 69,1 a 71,5 milhões/ano | US\$ 33,9 a 62,00 milhões/ano | US\$ 53,1 a 247,9 milhões/ano | US\$ 27,2 a 30,7 milhões/ano | US\$ 241,9 a 531,2 milhões/ano |

Fonte: Rezende, Dalmácio e Ribeiro (2012, p. 112).

Todavia, para Moreira e Giometti (2008), para a consecução desse cenário, é necessário que o Protocolo de Kyoto se consolide como um acordo internacional com força legal, aonde só será possível com a adesão dos EUA.

De acordo com Rezende, Dalmácio e Ribeiro (2012), para o período 2013-2017 (segundo período de compromisso de acordo com o Protocolo de Kyoto), as incertezas que dificultam a realização de projeções e de negócios ligados ao MDL são:

- **Tempo de implementação do projeto:** O tempo necessário para validar, registrar e emitir os RCEs de um projeto nas Nações Unidas leva geralmente de 18 a 24 meses, podendo até ser superior (BRUNO FILHO, 2010);
- **Custos e riscos envolvidos:** O custo de execução de um projeto de MDL pode ficar entre 150 mil a 200 mil dólares, o que representa um obstáculo para as micros, pequenas e médias empresas. Estruturar o projeto com recursos próprios e ao mesmo tempo correr os riscos inerentes tem gerado desistência (BRUNO FILHO, 2010);
- **Complexidade do processo:** As etapas de desenvolvimento e aprovação do projeto de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo são complexas e passam por avaliações criteriosas e lentas. Além disso, questões relativas à interpretação de critérios como adicionalidade, por exemplo, tem colocado à margem potenciais projetos (BRUNO FILHO, 2010);
- **Baixos preços dos créditos de carbono:** Nas principais bolsas de valores do mundo que comercializam os créditos de carbono, o mesmo se encontra em preços não atraentes ao mercado, na data de 20/04/2017, na BMF Bovespa, esse a tonelada desse crédito foi negociado a US\$5,20, na Bolsa de Montreal em US\$ 10,00 e na Bolsa de Los Angeles a US\$ 13,00.

O MDL é a oportunidade para a promoção do desenvolvimento sustentável em escala mundial, pois contempla o desenvolvimento das atividades econômicas e financeiras nos países envolvidos no Mecanismo de Desenvolvimento Limpo. A partir da comercialização de créditos de carbono, possibilita, aos países signatários, a geração de emprego, renda e qualidade de vida a partir de investimento em projetos e tecnologias limpas nos países pobres. Além disso, permite a preservação do meio ambiente, por meio da mitigação de gases efeito estufa e projetos de florestamento e reflorestamento.

Logo, neste cenário sistêmico, é preciso que o Brasil, um dos países mais beneficiados pelo MDL, (com projetos nos setores de energia, subprodutos sólidos, eficiência energética e florestas com expectativas de ganho de cerca de US\$ 241,9 a 531,2 milhões/ano), a partir de seu corpo diplomático, articulado com outras nações ações para: valorização do crédito de carbono nos principais mercados mundiais a simplificação do desenvolvimento e a aprovação de projetos MDL junto as Nações Unidas.

Somente a partir destas ações, o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo pode se consolidar como mercado de créditos de carbono capaz de promover em longo prazo o

desenvolvimento sustentável (econômico, social e preservação ambiental) tanto para os países desenvolvidos quanto subdesenvolvidos.

Nesse sentido, a produção de energia a partir da biomassa da cana-de-açúcar representa uma fonte de renda no setor sucroenergético no Brasil. Sua importância, oportunidades e desafios são dissertados no próximo capítulo.

2.4 Setor sucroenergético no Brasil: importância, oportunidades e desafios

A cana-de-açúcar, originária da Nova Guiné, expandiu-se pelo continente asiático por volta do século III a.C. Foi com a chegada dos europeus à América e à Índia que começou uma nova etapa em seu desenvolvimento e produção em escala mundial (MOREIRA, 2007).

Para Góes, Marra e Silva (2008), a cana-de-açúcar está intrinsecamente ligada à história e ao desenvolvimento do país. A cana-de-açúcar foi uma das primeiras atividades econômicas e serem desenvolvidas no Brasil a partir de 1530, por Martin Afonso de Souza, com o início do processo colonial brasileiro.

De acordo com Regazzini e Bacha (2012), desde o início da colonização brasileira, a cana-de-açúcar é uma atividade de grande importância para a economia nacional, aonde desde os primeiros séculos de história, essa cultura se destinava basicamente à produção comercial em grande escala de açúcar para exportação para Europa. Para Prado Junior (1972), era o início de um dos ciclos econômicos mais longos da história do Brasil, posicionando o país como principal fornecedor de açúcar na divisão internacional de trabalho.

Porém, atualmente, são três os principais produtos industrializados de maior escala comercial obtidos da cana-de-açúcar: o açúcar, o etanol e a bioenergia. Toda a estrutura produtiva desses três produtos, desde os primeiros insumos até a venda ao consumidor final, denomina-se setor sucroenergético, setor que não tem a mesma importância para a economia nacional do período colonial, mas representa uma força significativa da economia brasileira (REGAZZINI; BACHA, 2012).

De acordo com Moraes e Bacchi (2015), a história do etanol no Brasil começa nos anos 1930, com a criação do Instituto do Açúcar e do Alcool (IAA). Em 1931, o governo de Getúlio Vargas, tornou obrigatória a mistura de 5 % de álcool na gasolina. Em 1975, o governo federal criou o Programa Nacional do Alcool (Proálcool) que, somente na década de 80, após o segundo choque do petróleo, em 1979, é que ocorreu um crescimento vigoroso em investimentos, subsídios e produtividade; como consequência dessa iniciativa, as áreas de plantio de cana-de-açúcar vêm aumentando continuamente.

Para Moraes, Zaiat e Bonomi (2015), a produção brasileira de etanol de cana começou a se desenvolver na década de 1970 como resultado da crise do petróleo, o que impulsionou a busca por combustíveis alternativos. Desde então, o Brasil tem implementado políticas de biocombustíveis, não somente para reduzir a dependência do país em relação aos combustíveis fósseis, mas também se beneficiar das vantagens ambientais, econômicas e sociais associados a produção e utilização de biocombustíveis sustentáveis.

Além disso, de acordo com Pereira e Silveira (2016), há perspectiva de aumento de demanda de etanol, devido à projeção de aumento nas vendas de veículos bicompostíveis, como também, à perspectiva de aumento de níveis obrigatório de mistura do etanol anidro na gasolina. Outrossim, para Neves e Cornejero (2010), os derivados de cana possuem importância estratégica na indústria mundial. No caso específico do açúcar, por exemplo, este é uma commodity do qual dependem diretamente as indústrias de alimentos e bebidas.

Dado esse contexto, a indústria de açúcar e etanol no Brasil, para Nogueira et al. (2015), tem forte influência sobre o cenário energético, social, econômico e ambiental do país. De acordo com Garcez (2013), o Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, o maior produtor e exportador de açúcar e o segundo maior produtor de etanol do mundo. O setor sucroalcooleiro foi responsável por aproximadamente 2% do PIB nacional e por 31% do PIB da agricultura no Brasil em 2012, tendo empregado cerca de 4,5 milhões de pessoas.

As principais razões para essa expressiva participação na economia nacional foram: o aumento da escala de produção das plantas industriais, entrada em operação de novas usinas com maior escala produtiva, consolidação dos grupos empresariais com capital estrangeiro. Contudo, no Estado de São Paulo, o aumento da capacidade produtiva é devido à expansão das unidades existentes. O aumento da escala produtiva das usinas existentes consiste no crescimento das áreas plantadas próximas às usinas associadas à expansão e/ou modernização da planta industrial e compra de unidades menores. Neste caso, o ativo principal da unidade adquirida são as terras próprias e arrendadas e não a unidade industrial em si (CASTRO; DANTAS; BRANDÃO, 2009).

Como consequência, a expansão do setor, de acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento, CONAB (2016), da área cultivada de cana-de-açúcar direcionada à atividade sucroenergética na safra 2015/16 é de 8.954,8 mil hectares. São Paulo possui 51,8% (4.648,2 mil hectares), Goiás com 10,1% (908 mil hectares), Minas Gerais com 8% (715,3 mil hectares), Mato Grosso do Sul com 8% (713,7 mil hectares), Paraná com 6,8% (613,4 mil hectares), Alagoas com 4,2% (380,3 mil hectares), Pernambuco com 3,1% (273,4 mil

hectares) e Mato Grosso com 2,6% (230,3 mil hectares). Estes oito estados são responsáveis por 94,7% da produção brasileira.

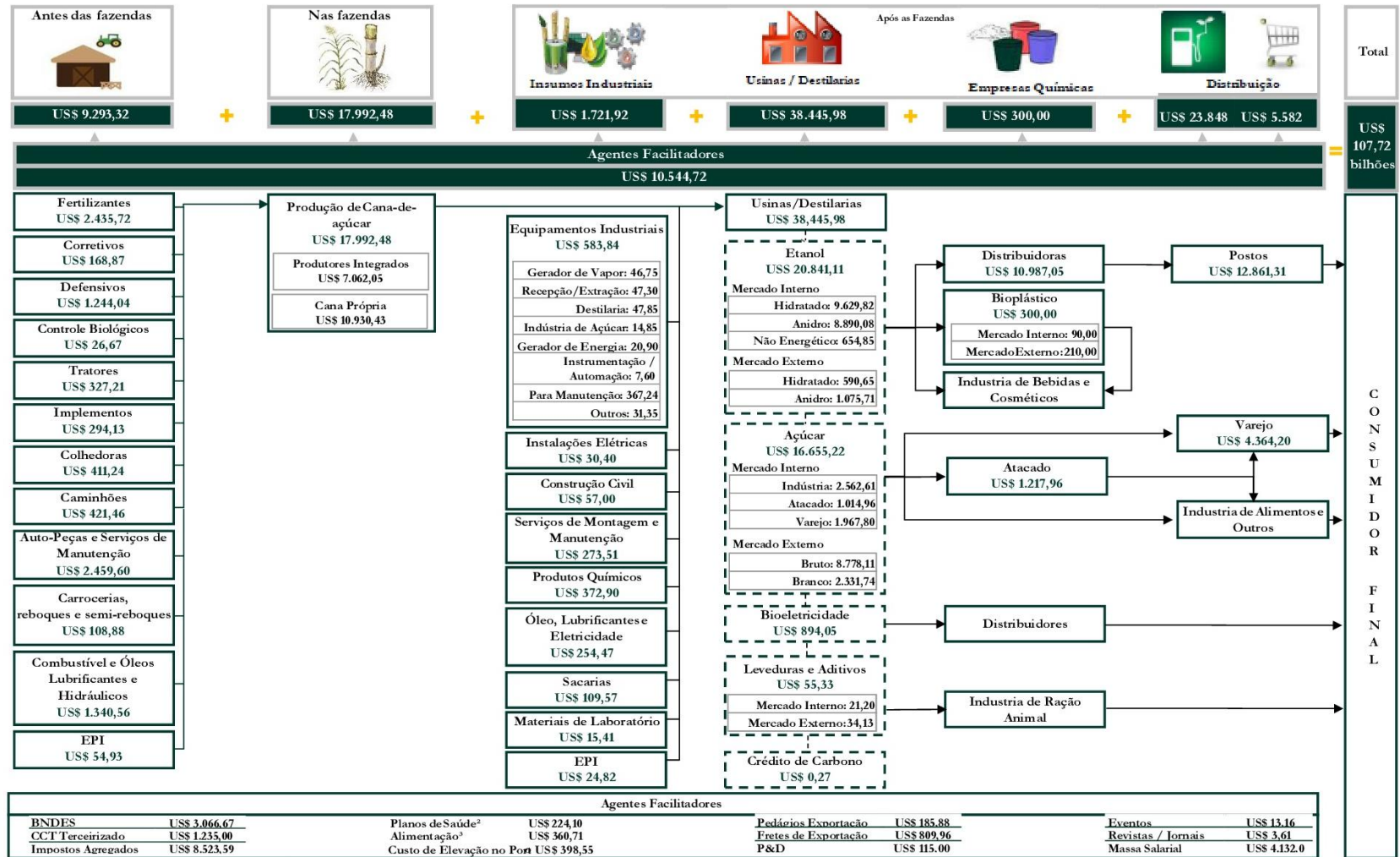
Ainda de acordo com a CONAB (2016):

[...] A produção de cana-de-açúcar, estimada para a safra 2016/17, é de 694,54 milhões de toneladas. O crescimento está avaliado em 4,4% em relação à safra anterior. A área a ser colhida está estimada em 9,1 milhões hectares, aumento de 5,3%, se comparada com a safra 2015/16. A produção de açúcar deverá atingir 39,8 milhões de toneladas, 18,9% superior à safra 2015/16 devido a preços mais rentáveis. A produção de etanol deve se manter acima de 27,9 bilhões de litros, redução de apenas 8,5% em razão da preferência pela produção de açúcar. A produção de etanol anidro, utilizada na mistura com a gasolina, deverá ter aumento de 1,5%, alcançando 11,3 bilhões de litros, impulsionado pelo aumento do consumo de gasolina em detrimento ao etanol hidratado. Para a produção de etanol hidratado o total poderá atingir 16,5 bilhões de litros, redução de 14,3% ou 2,8 bilhões de litros, resultado do menor consumo deste combustível.

Embora os Estados Unidos liderem a produção mundial de etanol, a vantagem competitiva do Brasil, frente aos seus concorrentes, de acordo com Souza, Scur e Souza (2012), é a utilização da cana-de-açúcar, enquanto os europeus utilizam a beterraba e os norte-americanos utilizam o milho. Além disso, o país tem capacidade de expansão de cultivo de cana.

Os números supracitados demonstram a grandeza e complexidade da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar, conseqüentemente de acordo com Neves e Conejero (2007, p. 587), “as usinas produtoras dependem de fornecedores de cana e de bens de capital. Os produtos, álcool, açúcar e energia são distribuídos para distribuidores de combustíveis, distribuidores de energia elétrica, indústria de alimentos, atacado e varejo, e *tradings* exportadoras”. Neves e Trombin (2014), sintetizam a cadeia identificando as etapas do processo produtivo desde insumos, produtos e subprodutos e distribuição até o consumidor final conforme apresentado na Figura 2.

Figura 2 – Cadeia produtiva da cana-de-açúcar no Brasil



Fonte: Neves e Trombin (2014).

A agregação de valor no transcorrer da cadeia produtiva da cana-de-açúcar, de acordo com Bacchi e Caldarelli (2015), traz também efeitos positivos sobre o emprego e a renda da população que reside nas proximidades das unidades produtoras de açúcar, etanol e eletricidade, dinamizando a economia local e contribuindo para o desenvolvimento.

Ante aos expressivos números do setor sucroenergético, para Valente et al. (2012), os investidores formaram expectativas positivas para o futuro do mercado, desencadeando uma série de decisões de investimento entre 2003 e 2008. De acordo com Cardoso et al. (2009), a tecnologia *flex*, a crescente preocupação ambiental, tanto no Brasil, quanto no exterior, e a volatilidade dos preços do petróleo nos mercados internacionais, estimulam os países a buscarem matrizes energéticas renováveis. Ante esse cenário, a expansão do etanol no Brasil foi marcada por forte aporte de investimento estrangeiro e do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. Sob a perspectiva de que Estados Unidos, Japão e União Europeia seriam potenciais consumidores do etanol brasileiro. Durante o governo Lula (2003-2010), o financiamento para a indústria sucroenergética chegou a R\$ 28,2 bilhões. Em 2010, foram destinados R\$ 7,4 bilhões para financiar desde o cultivo (R\$ 953 milhões) até a produção de açúcar e etanol (R\$ 5,6 bilhões) e a cogeração de energia (R\$ 665 milhões).

Porém, de 2009 a 2015, o setor enfrenta uma das piores crises de sua história devido: à recessão econômica nos mercados desenvolvidos e à consequente queda dos investimentos estrangeiros no setor; grau de endividamento das usinas; alto custo de produção; perda de competitividade do etanol frente à gasolina devido a manipulação de preços para contenção da pressão inflacionária e à estiagem na região sudeste nos anos de 2014 e 2015. De acordo com Neves e Trombim (2014), a crise acarretou em mais de 64 mil postos de trabalho perdidos nas usinas de açúcar e mais de 20 mil nas destilarias de etanol. O setor fechou, desde a crise mundial de 2008, na região Centro Sul do país, mais de 80 mil postos de trabalho, acumulando R\$ 60 milhões de dívidas, faturando somente R\$ 65 bilhões.

Ante ao presente cenário, aliado à importância do setor sucroenergético para o desenvolvimento econômico e social do Brasil, é fundamental que o governo federal crie diretrizes de longo prazo para a matriz de combustíveis no Brasil; diferenciação tributária entre os combustíveis renováveis, estímulo aos ganhos de eficiência técnica nos veículos para ampliar a competitividade do etanol ante a gasolina (NEVES; TROBIM, 2014).

Encontrar soluções que levem à retomada da economia do setor sucroenergético a partir de políticas públicas de regulação, coordenação institucional e fomento à competitividade para direcionar investimentos para dinamizar as capacidades tecnológicas, fomentando a pesquisa, o desenvolvimento e inovação de processos agrícolas e industriais,

estimulando, assim, a melhoria da gestão em consonância com ações empresariais voltadas para o aumento da produtividade, diversificação da carteira de investimentos, melhoria de gestão, redução dos impactos ambientais de atividades agrícolas e industriais e a exploração da bioeletricidade a partir da utilização dos subprodutos gerados pela produção tanto de etanol como a palha, bagaço, torta de filtro e vinhaça (ALEM, 2010).

Todavia, a crise do setor sucroenergético, entre 2009 e 2015, pode ser considerada uma janela de oportunidade para o aperfeiçoamento tanto para essa cadeia produtiva, quanto de seus *stakeholders* que contemplam os pontos elencados no parágrafo supracitado. Logo, instrumentais dentro das ciências da administração e da engenharia de produção, como gestão ambiental e a produção mais limpa podem contribuir para redução e reutilização dos subprodutos da produção de etanol, de forma a diminuir o desperdício de matérias-primas, a degradação do meio ambiente, racionalização e redução de custos e aumento de receitas, consequentemente, tornando as empresas do setor mais competitivas no mercado, garantindo sua sustentabilidade e as auxiliando na superação da crise.

O ciclo expansivo da produção de etanol e de açúcar, movido pela crescente demanda doméstica, influenciada pela produção em escala e pelas vendas de veículos *flex-fuels*, movidos a gasolina ou a etanol, garante a biomassa residual necessária para obtenção de grandes montantes de bioeletricidade nos próximos anos.

Dada a importância de temas como gestão ambiental, produção mais limpa, redução e reutilização dos subprodutos do setor sucroenergético, esses temas serão discutidos no capítulo a seguir.

2.5 Gestão ambiental, Produção mais Limpa e subprodutos do setor sucroenergético

Para Lorenzetti e Carrion (2012) a partir da pressão exercida pelos governos, sociedade, instituições multilaterais e organizações não governamentais, decorrente de Estocolmo 72, Rio 92 e o Relatório Bruntland, as organizações começaram a criar instrumentos de gestão que possibilitassem tanto maximização dos resultados econômicos financeiros, quanto à máxima racionalização na utilização dos recursos naturais, alinhando desenvolvimento econômico com preservação ambiental para construção e sustentação de vantagem competitiva. Nesse sentido, as organizações contemporâneas, conhecedoras de que grau de competitividade depende de uma postura responsável em relação aos recursos ambientais e que objetivos tradicionais, como maximização de lucros e do valor das empresas, não são suficientes para sua permanência e crescimento nos mercados que atuam.

O presente modelo de desenvolvimento econômico, influenciado pela globalização, desenvolvimento tecnológico e expansão do conhecimento, exige das organizações uma contínua adaptação em um ambiente em constante evolução para que possam criar e sustentar vantagem competitiva em mercados cada vez mais exigentes. Esse processo provoca demanda, por parte das organizações, de criarem ambientes propícios a inovações em produtos, processos e organizacionais que favoreçam: redução de custos, aumento da qualidade e produtividade em consonância com a preservação do meio ambiente (SLACK et al., 2002).

O meio ambiente passou a fazer parte do planejamento estratégico de organizações, interferindo na posição dos dirigentes na formulação dos planos de ação e elaboração de cenários, fazendo-se, portanto, necessária sua adoção em um conjunto de diretrizes e atividades estratégicas, táticas e operacionais em toda organização (DONAIRE, 1999).

Gestão Ambiental pode ser definida como um conjunto de metodologias administrativas que atuam de maneira estruturada sobre o bem-estar dos colaboradores e a conservação e proteção ao meio ambiente. Objetiva a eliminação e/ou minimização de impactos ao ambiente, decorrentes do planejamento, implementação, execução e controle das atividades organizacionais. Segundo Fogliatti et al. (2011), a gestão ambiental deve ser entendida como um conjunto de ações adotadas no âmbito organizacional objetivando a máxima racionalidade das operações de forma a conservar e proteger o meio ambiente.

Para Epelbaum (2004), a gestão ambiental é percebida como um segmento da gestão empresarial que se preocupa com a identificação, avaliação, monitoramento, controle e redução dos impactos ambientais. Rose (2008) entende como gestão ambiental, uma gestão organizacional que as empresas desenvolvem, implantando políticas e estratégias ambientais, que priorizem a forma de diminuir o desperdício de matéria-prima, a degradação do meio ambiente, redução de custos, tornando-as mais competitivas no mercado e garantindo sua sustentabilidade. O objetivo maior da gestão ambiental é a busca permanente de melhoria da qualidade ambiental dos serviços, produtos e ambiente de trabalho.

A Gestão Ambiental para Maimon (1996, p. 72), é um “conjunto de procedimentos para gerir ou administrar uma organização, de forma a obter o melhor relacionamento com o meio ambiente”. Para Haden et al. (2009), gestão ambiental é o alinhamento de critérios ambientais aos objetivos e estratégias da organização. Para Jabbour (2010) a gestão ambiental deve estar baseada em uma abordagem sistêmica para a incorporação da temática ambiental em todos os níveis organizacionais, incorporando os objetivos ambientais ao planejamento estratégico, tático e operacional das organizações.

A proteção ambiental nas organizações deixou de ser uma função exclusivamente operacional para tornar-se uma função contemplada por toda estrutura organizacional, interferindo no planejamento, execução e controle das atividades (DONAIRE, 1999).

Sob esta ótica, para Oliveira e Pinheiro (2010), a gestão ambiental representa um sistema aonde se inclui toda a estrutura organizacional nas atividades de planejamento, responsabilidades, procedimentos, operações e recursos para desenvolver, implementar, atingir, analisar e manter a política ambiental da instituição.

Com base em Daily e Huang (2001), Boiral (2006), Jabbour e Jabbour (2009) e Jabbour et al., (2012) algumas das principais práticas de gestão ambiental são: (a) política de valorização da gestão ambiental por parte da alta administração; (b) educação ambiental para os colaboradores; (c) redução, reuso e reciclagem dos insumos e subprodutos dos processos operacionais de bens e serviços; (d) concepção e produção de produtos, processos e serviços com menores impactos ambientais; (e) seleção de fornecedores com base em critérios ambientais; (f) sistema de gestão ambiental com base na ISO 14001; (g) transparência na divulgação dos indicadores de desempenho ambiental; (h) emprego de fontes de energia alternativas; (i) responsabilidade sócia ambiental ao longo de toda a cadeia suprimentos e (j) redução na emissão de gases efeito estufa.

Para Stefanelli e Jabbour (2012), a gestão ambiental surge como uma nova função organizacional que vem, recentemente, sendo inserida na prática de líderes organizacionais. Porém, diversas pesquisas indicam que as organizações não praticam a gestão ambiental com o mesmo nível de abrangência e profundidade. Esses diferentes níveis com que as organizações incorporam as questões ambientais têm sido chamados de estágios evolutivos da gestão ambiental (JABBOUR; SANTOS; NAGANO, 2010). Considera-se que as empresas podem evoluir conforme três principais estágios de gestão ambiental. Essa perspectiva evolutiva da gestão ambiental esteve presente nos trabalhos de Hunt e Auster, (1990), Berry e Rondinelli (1998) e Jabbour et al. (2012). De forma geral, assume-se que a evolução da gestão ambiental compreende três estágios:

- **Estágio 1: Reativo** – As organizações nesse estágio tendem apenas a atender à legislação, em outras palavras, apenas reage à problemas ambientais gerados pelas organizações, como aplicação de multas e outras penalidades geralmente impostas pelo setor público. A gestão ambiental é geralmente vista como custo extra, como redutora de potencial competitivo e como um problema legal;
- **Estágio 2: Preventivo** – Nesse estágio a organização busca estratégias para otimizar o consumo de matérias primas por meio de ecoeficiência e da aplicação de seus

princípios de redução, reuso e reciclagem em relação aos insumos produtivos e subprodutos produzidos. A questão ambiental começa a ganhar maior destaque na estrutura organizacional. Porém, a gestão ambiental ainda é tida como de responsabilidade de poucos colaboradores dentro da organização e com pouca influência na alta administração;

- **Estágio 3: Proativo** – Nesse estágio, a questão ambiental é elemento da estratégia organizacional para criação de vantagens competitivas. A gestão ambiental possui *status* de função organizacional, mobiliza departamentos e incorpora a preocupação ambiental no planejamento estratégico, tático e operacional no desenvolvimento de produtos, processos produtivos e na comunicação com os *stakeholders*, em outras palavras, a organização, possui, na gestão ambiental, seus diferenciais competitivos (PORTER; LINDE, 1995).

Para a execução da gestão ambiental proativo é necessário que a ela seja realizada por meio de um Sistema de Gestão Ambiental (SGA), um método que lida com as questões ambientais de maneira sistêmica e que incentiva a melhoria contínua do desempenho ambiental (JABBOUR; SANTOS; NAGANO, 2008).

O SGA é um sistema de gestão organizacional utilizado para projetar, implementar e gerenciar a política ambiental. Ele inclui elementos interdependentes, tais como a estrutura organizacional, a divisão de responsabilidades e o planejamento, procedimentos, processos e recursos necessários para consecução da referida política e seus objetivos (FORTUNSKI, 2008), para Oliveira e Serra (2010), com o pressuposto de otimizar os indicadores desempenho ambiental a partir do gerenciamento das variáveis ambientais ligadas às atividades estratégicas, táticas e operacionais. Um SGA auxilia na identificação de problemas e soluções ambientais baseados no conceito de melhoria contínua. Dentre os Sistemas de Gestão Ambiental, a mais conhecida é a ISO 14001.

A ISO 14001 pode ser aplicada a todos os tipos de organização de quaisquer porte, setor e região. A mesma é baseada no ciclo PDCA (Plan, Do, Check e Act), aonde: (a) planeja políticas, impactos e metas ambientais; (b) executa atividades ambientais; (c) verifica auditorias e avaliações de desempenho ambientais; e (d) age a partir de treinamentos e comunicação ambiental. Nela, estão sistematizados, a partir do planejamento estratégico, a forma como serão planejadas e implementadas as ações, prazos e os recursos necessários para sua operacionalização, assim como os meios para verificar a eficiência e eficácia (JABBOUR et al., 2012).

Dentre as vantagens, pesquisadores como Hunt e Auster (1990), Porter e Linde (1995), Donaire (1999), Benito e Benito (2006), Porter (2009) e Jabbour (2010) apontaram os benefícios diretos e indiretos da implementação, execução e controle do Sistema de Gestão Ambiental ISO 14001 que são:

- Redução de custos a partir: (a) da gestão de riscos ambientais e relações com agentes externos, (b) do custo dos materiais, subprodutos, energia e serviços; (c) custo de capital e seguro, (d) custo do trabalho e (e) da neutralização do pagamento de multas por crimes ambientais.
- Aumento das receitas a partir: (a) do acesso aos mercados de maior rigor ambiental, (b) dos clientes ambientalmente mais exigentes, (c) da diferenciação de produtos, (d) da venda de tecnologias de controle de poluição e gestão de subprodutos, (e) da fidelização dos clientes, (f) da melhoria da imagem da organização junto aos *stakeholders* e (g) da maior competitividade nos mercados nacionais e internacionais
- Otimização da produtividade a partir: (a) do comprometimento da alta administração e dos colaboradores da organização, (b) da padronização do processo produtivo em consonância com o ciclo PCDA e (c) do menor tempo de produção e entrega do produto e/ou serviço ao cliente;
- Aumento da capacidade de controle da organização a partir: (a) da conformidade legal e antecipação de futuras exigências legais, (b) do gerenciamento em tempo real dos indicadores de desempenho ambiental, (c) da auditoria ambiental para proteção preventiva e proativa do meio ambiente ao longo da cadeia produtiva e (d) da transparência e unidade no fluxo de informações para o público interno e externo acerca dos procedimentos de gestão ambiental.
- Fomento as inovações em: (a) produtos, (b) processos, (c) marketing e (e) organizacional, oriundas da implementação, execução e controle da gestão ambiental.
- Maior capacidade de valorização das ações da empresa, conforme o *Dow Jones Sustainability Group Index* e do Índice de Sustentabilidade Empresarial da Bolsa de Valores de São Paulo;
- Maior envolvimento das organizações pertencentes à cadeia de suprimentos.

Assim, as organizações conseguem, simultaneamente, reduzir ou neutralizar os impactos negativos de suas atividades sobre o meio ambiente e obter vantagens competitivas que as diferenciam de outras entidades do setor. Esses benefícios são constatados por todos os

stakeholders da organização: clientes, fornecedores, acionistas, colaboradores, comunidade, governo e organizações não governamentais e credores.

Nesse contexto, de acordo com Miles e Covin (2000) e Sanches (2000), o investimento em instrumentais de gestão ambiental como SGA passam a fazer parte dos objetivos das organizações uma vez que elas passam a perceber que o dispêndio em ativos ambientais pode contribuir para a obtenção de vantagens competitivas. Assim, a capacidade de integrar o meio ambiente no planejamento estratégico oferece a oportunidade de desenvolver competências organizacionais valiosas, potencialmente raras e difíceis de serem imitadas (JUDGE; DOUGLAS, 1998). Além disso, a gestão integrada dos ativos ambientais passa a ser vista como fundamental para a sobrevivência institucional em longo prazo (AZZONE; BERTELÈ, 1994). Portanto, as organizações precisam incorporar questões relativas ao ambiente natural no âmago de suas estratégias competitivas, seja em diferenciação ou, liderança em custo baixo.

Na estratégia competitiva em liderança no custo, a gestão ambiental contribui para redução de: (a) riscos com penalidades ambientais, (b) custo com matérias primas, gestão de subprodutos, consumo de eletricidade e serviços de operação e manutenção, (c) custo de financiamentos e seguros, (d) custos e penalidade por acidente de trabalho e insalubridade. Contribui também com a otimização da produtividade a partir: (a) da padronização da produção em consonância com o ciclo PCDA e (b) do menor ciclo de produção e entrega do produto e/ou serviço ao cliente (SILVA; BARBOSA, 2002).

Na estratégia competitiva em diferenciação, a gestão ambiental contribui com: (a) a agregação do valor da marca da organização, (b) o aumento da qualidade do produto ou serviço e (c) o fomenta das inovações em produtos, processos, marketing e estrutura organizacional (SILVA; BARBOSA, 2002).

Com base na estratégia competitiva da organização (diferenciação ou liderança em custo) e de seu foco competitivo (processos e produtos e/ou serviços), é possível enquadrar estratégias ambientais especializadas que as organizações podem adotar dentro do setor e mercado em que atuam, como pode ser constatado no quadro 3.

Quadro 3 – Estratégia ambiental especializada

| | | | |
|-----------------------------|----------------------|------------------------------------|---------------------------------------------|
| Vantagem Competitiva | Custo | (I) Produtividade de Recursos | (IV) Liderança em custo Ambiental |
| | Diferenciação | (II) Além da Conformidade Legal | (III) Produtos e Serviços Eco orientados |
| | | Processos | Produtos e/ou Serviços |
| Foco Competitivo | | | |

Fonte: Orsato (2003).

Das estratégias ambientais especializadas descritas por Orsato (2003) no quadro acima, cada uma possui as seguintes características:

- **Produtividade de Recursos:** Refere-se à máxima racionalização na utilização dos insumos produtivos desde as matérias primas utilizadas no processo produtivo até reutilização ótima dos subprodutos. De acordo com Orsato (2003), ela possibilita redução substancial dos custos de manufatura e o preço final dos produtos;
- **Além da conformidade legal:** Refere-se à padronização do processo produtivo de toda a cadeia de suprimentos em consonância com o planejamento estratégico e ao sistema de gestão ambiental adotado pela organização ancora da cadeia produtiva que perpassam as exigências legais dos setores e mercados que atuam (ORSATO, 2003);
- **Produtos e serviços ecologicamente orientados:** Refere-se aos produtos e serviços voltados para clientes e mercados com elevadas exigências de padrões e desempenho ambiental. As organizações que almejam gerar vantagem competitiva a partir dessa estratégia ambiental especializada precisam observar três pré-requisitos, conforme Orsato (2003): (a) os clientes devem estar dispostos a pagar pela diferenciação ambiental; (b) os indicadores de desempenho ambiental do produto e serviços devem estar claros e disponíveis para os clientes; e (c) difícil de ser imitada pelos concorrentes;
- **Liderança em custo ambiental:** Refere-se ao conceito tradicional em liderança em custo baixo quando a organização apresenta os custos mais baixos do setor. Ainda de acordo com Orsato (2003), obter vantagem de nessa estratégia ambiental depende de fatores como: custo de mão de obra, acessibilidade de matérias-primas, tecnologia e competências organizacionais.

As quatro estratégias ambientais possuem implicações diretas na maneira como as organizações podem otimizar seus esforços na área ambiental e focalizar no tipo de estratégia ambiental especializada mais adequada. Essas estratégias vêm ao encontro da necessidade de reforma do presente modelo de desenvolvimento, defendido, em linha gerais, pela Conferência de Estocolmo 72, Rio 92 e pelo Relatório Brundtland, baseados no crescimento econômico, preservação ambiental e promoção social.

Sendo as organizações os principais agentes de desenvolvimento econômico e social, elas possuem responsabilidade ímpar na liderança da transição para os modelos de desenvolvimento sustentável. A gestão ambiental, materializada nas organizações a partir do Sistema de Gestão Ambiental, como a ISO 14001, pode oferecer contribuições superlativas, a partir da redução de custos, aumento das receitas, otimização da produtividade, ampliação da capacidade de controle da organização, fomento a inovações, valorização das ações da empresa e maior envolvimento das organizações pertencentes à cadeia de suprimentos. A partir desses resultados, as organizações edificam, com mais capacidade de êxito, vantagens competitivas, seja em diferenciação ou liderança em custo baixo, seja no seu enfoque em processo ou produto e/ou serviço.

Tão importante quanto a ISO 14001, é a Produção Mais Limpa, criada pela *United Nations Environmental Program*, que, segundo Alves e Oliveira (2007), é a aplicação contínua de estratégia ambiental preventiva e integrada, aplicada a processos, produtos e serviços. Incorpora o uso mais eficiente dos recursos naturais, minimizando a geração de subprodutos e poluição, bem como os riscos à saúde humana. Para Nascimento, Lemos e Mello (2008), a base conceitual da Produção Mais Limpa fundamenta-se em três pontos: mudanças tecnológicas, geração de conhecimento endógeno e aplicação de *know how* a partir de técnicas de gestão e mudanças em nível organizacional. De acordo com a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo CETESB (2002), o modelo de gestão ambiental, Produção Mais Limpa, aumenta a eficiência na conservação de matérias-primas, água, energia, eliminação de toxidade de matérias-primas e subprodutos.

Segundo Hirose (2005), as práticas de Produção Mais Limpa envolvem ecoeficiência da produção, cujas principais características são: (a) utilização de materiais não tóxicos e reutilizáveis; (b) processos limpos e com baixo consumo de energia; (c) mínima utilização de embalagens; (d) facilidade de montar, desmontar, consertar e reciclar; (e) destinação final ambientalmente adequada gerida pelo fabricante. A Produção Mais Limpa dá oportunidade de: redução de custos, aumento da produtividade, maximização dos lucros, diminuição de insumos de produção, obtenção de ganhos reais.

Vilaça e Pinto (2012) destacam que a implantação de um sistema de gestão ambiental, em usinas de açúcar e etanol, promove consistência na administração dessas questões a partir da previsão, priorização e distribuição de recursos, atribuição de responsabilidades e avaliação de suas atividades, sendo um processo contínuo e interativo. Além disso, diminuem os custos de produção, melhoram a imagem da empresa e as perspectivas de negócios e, principalmente, diminuem os riscos de danos ambientais. Este processo se dá mediante investimentos em tecnologias mais eficientes, substituição de fontes fósseis por renováveis, racionalização do uso de energia e reflorestamento, devendo conduzir a resultados mensuráveis em consonância com a Produção Mais Limpa, ferramenta da gestão ambiental (GODOY, 2005).

Com a adoção de mecanismos como a Produção Mais Limpa, tem-se, como resultado, a redução dos custos produtivos provenientes da utilização mais eficiente dos recursos e, conseqüentemente, melhoria da imagem da organização nos mercados de atuação (PORTER; LINDE, 1995). Com o advento desses fatores, a questão ambiental, para as indústrias e para o setor sucroenergético, inicia um processo de modificação de percepção dos subprodutos de produção, passando de fator inibidor de competitividade a gerador de vantagens competitiva.

Nesse sentido, a União da Indústria da Cana-de-açúcar, a ÚNICA (2012), a partir de seu 2º Relatório de Sustentabilidade do setor sucroenergético, de 2012, executou uma série de medidas socioambientais que vem ao encontro da literatura supracitada neste capítulo, dentre as quais pode se citar o compromisso nacional para aperfeiçoar as condições de trabalho na cana-de-açúcar e o zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar

Ao mesmo tempo, a instituição se comprometeu em elaborar, incentivar e ampliar a:

Consulta aos *stakeholders* aumentar para 100% a participação das associadas no relatório; fortalecer a consistência dos indicadores socioambientais setoriais junto às associadas; atingir o maior número possível de trabalhadores treinados pelo Programa Renovação, e incentivar as associadas a investirem em projetos de requalificação dos cortadores de cana; incentivar a implantação de programas de sustentabilidade estendido a toda a cadeia produtiva; buscar 100% de adesão das suas associadas no Compromisso Nacional para Aperfeiçoar as Condições de Trabalho na Cana-de-açúcar; continuar desenvolvendo as atividades do AGORA nos estados brasileiros e expandir a atuação do projeto AGORA em todo o país. E contribuir para erradicação de trabalho infantil e trabalho forçado, ou análogo ao escravo, em todas as unidades associadas (UNICA, 2012, p. 41).

Do mesmo modo, a reutilização dos subprodutos da produção de etanol para a produção de eletricidade é de fundamental importância para auxiliar as empresas do setor sucroenergético a criarem e sustentarem vantagem competitiva.

Sendo o bagaço e a vinhaça dois dos principais subprodutos da produção de etanol, em especial a vinhaça que, dada a sua elevada carga orgânica, pode ser reutilizada por meio de

biodigestores anaeróbios para produção de gás metano e, posteriormente, queimada em motores de combustão interna para produção de energia elétrica. Sendo assim, o bagaço e a vinhaça com suas principais características, vantagens e desafios são dissertados respectivamente nos capítulos a seguir.

2.6 Bagaço da cana-de-açúcar para produção de energia elétrica: vantagens e desafios

Para Souza e Azevedo (2006), o setor sucroenergético apresenta vários subprodutos, entre eles o bagaço da cana. O aproveitamento desse resíduo industrial vai desde o composto para ração animal, fertilizante, biogás até a matéria-prima para compensados e para indústria química em geral. No início do século XX, o bagaço era utilizado como combustível em substituição da lenha. No século XXI, seu uso ocorre na produção de energia tanto térmica quanto elétrica, conhecido como cogeração. Nesse sentido, a geração de energia elétrica, a partir do bagaço de cana, está inserida na geração de Produção Mais Limpa. Com alto teor de fibras, o bagaço, oriundo do esmagamento da cana-de-açúcar para produção de etanol e açúcar, é utilizado na produção de vapor e energia elétrica por meio da cogeração para a própria operacionalização da usina, garantindo a sua autossuficiência energética durante a safra (CONSECANA, 2012).

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (2006), define-se cogeração de energia como o processo de produção combinando calor e energia mecânica, convertido totalmente ou parcialmente em energia elétrica. Para Zanetti e Oliveira (2006), cogeração é a produção conjunta de trabalho mecânico e calor utilizável a partir da queima do mesmo combustível. O trabalho mecânico, em geral, é utilizado para acionar o gerador elétrico.

De acordo com Companhia Nacional de Abastecimento (2011), na safra 2010/2011, foram moídos 623,9 milhões de toneladas de bagaço da cana. Para a União da Indústria Canavieira do Estado de São Paulo (2012), o potencial de cogeração dessa fonte pode alcançar 14.000 Megawatt médios em 2021.

Para Cortez e Dias² (1992, apud CORTEZ, MAGANHÃES, HAPPI, 1992), o bagaço excedente, cerca de 30% nas destilarias e de 10% nas usinas, é utilizado para outros fins, predominando a venda a granel para o uso como energético na indústria de laranja. Da energia contida numa tonelada de cana, há cerca de 560.000 kcal em 250 kg de bagaço úmido.

² CORTEZ, L.; DIAS, L. F. C. Avaliação do Potencial de Cogeração nas Destilarias Anexas do Estado de São Paulo fora do Complexo COPERSUCAR. In: ENCONTRO NACIONAL DE CIÊNCIAS TÉRMICAS, Rio de Janeiro, 1992. *Anais...* Rio de Janeiro, 1992.

Para Nova Cana (2015) e Galbiati, Gallo e Lavanholi (2012), dentre as vantagens da produção de energia elétrica a partir do bagaço da cana-de-açúcar, pode-se apontar: (a) competitividade em termos de custos; (b) alternativa energética para o país no curto e médio prazo; (c) complementaridade sazonal com relação ao regime de chuvas; (d) proximidade dos centros de carga de matéria prima e consumo de energia elétrica; (e) autossuficiência energética na produção de açúcar e etanol; (f) diminuição dos riscos de falta fornecimento de energia elétrica em virtude estiagens prolongadas; (g) uso mais eficiente da energia térmica, normalmente rejeitada para a atmosfera; (h) geração de renda e de emprego no campo; (i) estímulo à indústria de bens de capital e poupança de divisas – coeficiente de importação é próximo de zero, dispensando tanto a importação de equipamentos como a de combustíveis; (j) geração descentralizada que se interliga aos troncos principais do sistema de transmissão de energia elétrica; (k) produção local de energia com menores perdas de transmissão de energia elétrica; (l) maior flexibilidade e confiabilidade na produção de energia elétrica; (m) menor tempo e custo de construção; (n) menor emissão de poluentes. As usinas de cogeração alcançam uma redução de emissão de CO₂ em torno de 30% em comparação com geração de estações de queima de carvão; (o) Aproveitamento do subproduto produzido em grande quantidade e (p) Melhora o retorno dos investimentos realizados na unidade produtora de açúcar e etanol.

Porém, de acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento (2011), Szklo e Tolmasquin (2001) e Zancaner e Santos (2013), as quatro barreiras que podem tornar a cogeração de energia elétrica a partir do bagaço da cana-de-açúcar menos atrativa para investimento são:

- **Etanol de segunda geração:** Produzido também a partir do bagaço da cana-de-açúcar, este combustível emerge como concorrente da utilização desse subproduto para a produção de energia elétrica;
- **Tecnologia:** No aspecto tecnológico, os principais desafios estão na modernização do processo de geração de energia e na eficiência de aproveitamento do potencial energético. As soluções estão na maior eficiência das caldeiras, gaseificação e integração com o processo de hidrólise. As tecnologias supracitadas determinarão o preço final do kWh, conseqüentemente, determinando a viabilidade econômica de todo o projeto;
- **Linhas de Transmissão:** o custo de conexão da usina de cogeração à rede de distribuição é uma das maiores barreiras de entrada a viabilização da venda de bioeletricidade gerada pelas usinas. A construção e manutenção de linhas de

transmissão de energia elétrica não são a atividade fim das usinas e as mesmas não têm nem experiência nem escala para construir tais ramais a custos competitivos;

- **Leilões de energia da ANEEL:** O preço médio de energia elétrica negociada nos leilões da Agência Nacional de Energia Elétrica, declinaram de R\$ 154 por megawatt médio em 2008 para R\$ 102 em 2011. Os preços atrativos nos leilões exclusivos para biomassa, de 2008, começaram a declinar principalmente porque o governo alterou as regras a partir de 2009 e passou a permitir a concorrência de outras fontes de energia.

Sendo assim, a produção de excedente de energia elétrica para venda não é uma especialidade dos produtores de açúcar e etanol, porém, a atratividade se dá pela viabilidade econômica do projeto que depende de fatores como: tecnologia empregada na caldeira, investimentos em subestações, linha de transmissão e o preço do MWh pago nos leilões da ANEEL.

Para Barja (2006), a viabilidade de um projeto de cogeração de energia elétrica, a partir do bagaço da cana, depende também de outros fatores, tais como: o preço da eletricidade, do etanol e a liquidez da venda de excedentes elétricos. Do lado da sustentabilidade econômica estão os custos de implantação desses processos. Para Souza e Azevedo (2006), o potencial de geração de eletricidade pelo setor sucroenergético está relacionado com a tecnologia empregada, devido os custos unitários (R\$/kW instalado) serem influenciados pelo efeito escala. Dessa forma, deve haver um equilíbrio entre uma opção, que ambientalmente traz benefícios aos desafios dos custos da produção e preço de venda.

De acordo com a Nova Cana (2015), o Brasil conta com 434 usinas sucroenergéticas, todas autossuficientes em energia elétrica graças à cogeração de energia a partir do bagaço de cana. Porém, somente 88 unidades comercializam os seus excedentes de eletricidade no mercado, sendo 54 centrais de cogeração, exportando energia elétrica para a rede de transmissão no estado de São Paulo e 34 centrais em outros 11 estados brasileiros, o que ainda é muito pouco dado tanto a importância e o tamanho do setor sucroenergético na economia, quanto as necessidades socioeconômicas do Brasil. Nesse sentido, para poder sustentar o crescimento econômico, é necessário estimular o aumento na geração de eletricidade de maneira mais efetiva e eficiente.

Logo, para ofertar energia suficiente para impulsionar o crescimento econômico do país, bem-estar da sociedade e ter um impacto positivo no meio ambiente, devem estar apoiadas em tecnologias mais eficientes e menos poluentes a fim de utilizar, de forma mais racional, as possíveis fontes de energia. Assim, os sistemas de cogeração de energia elétrica a partir do bagaço de cana aparecem, ao mesmo tempo, como uma solução imediata para a crise

atual de energia vivida pelo Brasil e, também em longo prazo, como uma solução para os problemas ambientais, sociais e baixo crescimento econômico.

2.7 O etanol de segunda geração: oportunidades e desafios

Como podemos constatar no capítulo supracitado, a energia tem importância superlativa, seja no planejamento estratégico, tático e operacional das nações, questões ligadas a política de desenvolvimento econômico, operacionalização da sociedade e segurança nacional.

Porém, grande parte da energia consumida no mundo é oriunda de fontes não renováveis, como petróleo e carvão mineral. Essa situação coloca grande parte dos países em situação de vulnerabilidade energética e estratégica, devido: a possibilidade de esgotamento desses recursos mesmo em longo prazo, oscilação dos preços nos mercados internacionais e consequentemente de todos os seus derivados; impactos ambientais, dentre eles, o aquecimento global e seus desdobramentos.

Ante os problemas supracitados, contrários as dimensões social e ambiental da sustentabilidade, a busca por fontes renováveis de energia que contemple o tripé da sustentabilidade se acelerou no final do século XX.

Nesse sentido, o mundo tem buscado energia renováveis como: eólica, solar, geotérmica, biodiesel, pequenas centrais hidrelétricas e maré motriz, porém, todas essas ainda não possuem preços competitivos para substituírem o petróleo, carvão mineral e a energia nuclear como fonte principal de energia.

Todavia, o etanol, fonte renovável de energia, oriunda da cana-de-açúcar, milho e beterraba já é produzida em larga escala, sobretudo no Brasil e nos Estados Unidos para suprir a demanda de veículos movidos a etanol. Contudo a produção de etanol de primeira geração oriunda do milho e da beterraba compete diretamente com produção de alimentos derivados desses, o que converge em um processo inflacionário dos alimentos em escala mundial o que contribui para o crescimento da insegurança alimentar em escala mundial.

Agrava o problema supracitado a procura mundial de biocombustíveis, devido as oscilações históricas no preço do petróleo, em junho de 2008, foi vendido acima de US\$ 140/barril. Nesse sentido, dentro de suas respectivas políticas energéticas estratégicas, os países vêm tentando diminuir sua dependência de petróleo.

O Japão, por exemplo, intenciona misturar pelo menos 10% de etanol à gasolina e a União Europeia, a mistura deverá ser de 10% a partir de 2020 (KOHLHEPP, 2010).

E na trajetória para se tornar uma commodity global, o etanol celulósico ou de segunda geração é fundamental.

O etanol de segunda geração, para Romero (2008) e Szwarc (2008), produzido a partir da celulose, presente nos subprodutos da cana-de-açúcar e em outras matérias-primas vegetais, é uma alternativa fundamental aos cerca de cem países capazes de produzir o combustível renovável e que desejam fazê-lo sem prejudicar a produção de alimentos.

O etanol celulósico apresenta grande potencial de crescimento, pois não depende da produção de alimentos para sua industrialização e nem da expansão da área plantada com cana-de-açúcar, e sim do reaproveitamento dos subprodutos da produção de etanol e açúcar, como o bagaço e na palha da cana, que são fontes de celulose e respondem por dois terços do potencial energético da planta. A principal vantagem do bagaço está na logística, pois, como se trata de um subproduto da cana que já está disponível na usina, não há necessidade de implantação de infraestrutura de coleta e de transporte.

Nos EUA, o governo federal e empresas de capital de risco têm financiado as pesquisas científicas com centenas de milhões de dólares. Outros centros avançados de pesquisa, como o Canadá, o Japão e os países nórdicos outrossim vêm conduzindo programas de pesquisa nessa área, de acordo com o Jornal Estado de Minas (2009):

Os investimentos de milhões de dólares mostram que a aposta em um novo combustível líquido é mesmo para valer. Entre os gigantes estão empresas sediadas nos Estados Unidos, como Texas Pacific Group, incorporada à KKR por US\$ 45 bilhões, e a Amyris Biotechnologies, que investe cerca de US\$ 20 milhões em pesquisas sobre o produto de segunda geração. Outros gigantes como as americanas Diversa e Celunol e Dupont e a British Petrol, do Reino Unido, avançam na corrida pelo combustível de segunda geração, assim como a canadense Husky Energy. A americana Chevron firmou parceria com o Departamento de Energia dos Estados Unidos com investimentos de nada menos que US\$ 1,5 bilhão em projetos de energia renovável.

Projeções indicam que esses processos poderiam produzir cerca de 300 litros de etanol por tonelada de bagaço seco, aumentando o rendimento de produção de etanol por hectare em até 100% (SZWARC, 2008).

No Brasil, apesar dos investimentos serem mais modestos, há importantes iniciativas em curso. O Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação coordena um projeto que envolve um grupo de universidades. Além disso, o Centro de Tecnologia Canavieira, a Petrobrás, a Dedini e a Oxiteno também desenvolvem trabalhos nesse campo (SZWARC, 2008).

A situação do Brasil é privilegiada por duas razões. O primeiro é que a infraestrutura para produzir etanol já está montada e o conhecimento sobre o combustível já esta acumulada

pelos cientistas. A segunda vantagem é o custo da matéria prima, o bagaço da cana está disponível nos pátios das usinas e não representará custo (NASSIF, 2010).

Dado toda a movimentação científica em busca da produção em larga escala do etanol de segunda geração, a desvantagem brasileira na corrida pela segunda onda de inovação na produção desse produto é uma maior articulação de esforços entre os entes do sistema nacional de inovação: universidades, institutos de pesquisa, empresas e agências de fomento, com o objetivo de alcançar o projeto dominante e consequentemente consolidar as inerentes vantagens competitivas do Brasil na produção deste combustível.

Se consolidado pelo país, a combinação da produção de etanol de primeira e segunda geração permitirá obter maior quantidade de combustível sem aumentar o volume de matéria-prima cultivada nem a área plantada, mas, em consequência, ter-se-á menor disponibilidade de bagaço para geração de energia elétrica. No momento em que a tecnologia de segunda geração estiver em escala comercial, as usinas seguirão a lógica do mercado, voltando sua produção para eletricidade ou etanol, de modo semelhante ao que ocorre com a destinação do caldo, que a depender das condições produz mais etanol ou mais açúcar (PACHECO,2011).

Vários especialistas defendem a ideia de que, no momento, o Brasil precisa mais de eletricidade do que de combustíveis líquidos, e que a utilização de bagaço para produção de etanol não seria benéfica, visto que o país sofreu em 2001 e voltou a sofrer em 2015 uma restrição no desenvolvimento econômico e social devido ao racionamento de energia elétrica.

Portanto, com o agravamento da concentração de GEE na atmosfera, as consequências do aquecimento global e a questão energética estratégica para o desenvolvimento, bem estar e segurança dos países, esses procuram por fontes alternativas de energia capazes de serem produzidas em larga escala, renováveis e limpas, dentre todas as opções o etanol se apresenta como uma opção viável. Logo se faz necessário um salto qualitativo e quantitativo de produção, ou seja, um aumento da quantidade de etanol produzido pela mesma quantidade de biomassa, sem competir com a produção de alimentos.

Porém, o Brasil, precisa articular seu sistema nacional de inovação: universidades, institutos de pesquisa, empresas de energia e agências de fomento para consolidação do projeto dominante e consequentemente fundamentar as inerentes vantagens competitivas do país na produção desse combustível.

O etanol de segunda geração, a partir do bagaço da cana-de-açúcar, é uma das melhores opções ao presente momento histórico ante ao problema do aquecimento global e o aumento da demanda, tanto no mercado nacional quanto internacional por biocombustíveis.

A vinhaça, sendo um dos piores subprodutos da produção de etanol de primeira e segunda geração, seja pelo seu volume e capacidade poluidora, pode contribuir para geração de eletricidade, substituindo o bagaço desse fim para que o mesmo possa ser direcionado para produção de etanol celulósico quando assim for viável economicamente. Logo, a vinhaça e toda sua característica química, arcabouço legal e potencial reutilização é dissertado no capítulo 3.

3 VINHAÇA, BIODIGESTORES, BIOGÁS, MÁQUINAS TÉRMICAS E CONCENTRADORES

3.1 Vinhaça: conceito, desafio e oportunidades

3.1.1 Definição, aspectos químicos de vinhaça e potencial poluidor

Ante a importância da produção de energia elétrica, as matrizes renováveis de energia, sobretudo os subprodutos da produção de etanol, aparecem como uma oportunidade a serem exploradas, dentre elas, pode-se destacar a vinhaça.

A vinhaça, de acordo com Moraes, Zaiat e Bonomi (2015), é sub produto da destilação do vinho fermentado para a produção de etanol a partir de culturas de açúcar (beterraba e cana), culturas de amido (milho, trigo, arroz e mandioca) e material celulósico (bagaço e madeira) e o que mais se destaca em quantidade e capacidade poluidora, também conhecida como vinhaça, restilo, calda ou garapão. Este resíduo aumenta proporcionalmente com o aumento da produção de etanol no mundo. A crescente demanda deste combustível no Brasil e no mundo como um dos instrumentos de combate ao aquecimento global faz com que haja um acréscimo da produção de vinhaça, agravando o problema de sua destinação. Para Salomon (2007), para cada litro de etanol produzido se produz, em média, 10 a 15 litros de vinhaça.

De acordo com Rodrigues et al. (2012), a composição quantitativa da vinhaça varia em função do tempo, índice de maturação, tipo de solo e da matéria prima utilizada para produção de etanol. De acordo com Freire e Cortez (2000), a vinhaça é caracterizada como efluente de destilarias com alto poder poluente e alto valor fertilizante; o poder poluente, cerca de cem vezes maior que o do esgoto doméstico, decorre da sua riqueza em matéria orgânica. É definida como líquido de cor parda clara, que escurece em razão da oxidação, resultante do processo de fermentação, pH variando de 3,7 a 5 e elevada corrosividade e altos índices de demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e demanda química de oxigênio (DQO), além de elevada temperatura na saída dos destiladores. Para Rafaldini et al. (2006), devido a sua elevada carga de matéria orgânica, auxilia na proliferação de vetores de doenças e gera forte odor na sua decomposição.

Ludovice (1997), define a vinhaça como um efluente composto de 93% de água e 7% de outros compostos. Desses compostos, cerca de 75% são matéria orgânica formado de ácidos orgânicos e em menor quantidade, por cátions como o K^+ , Ca^{+2} e Mg^{+2} e sua graduação alcoólica não é superior a 0,03°GL. Autores como Silva, Griebeler e Borges (2007) e Rossetto

(1987), relatam que dos efluentes líquidos da indústria sucroenergética, a vinhaça é a que possui maior carga poluidora, apresentando DBO variando de 20.000 a 35.000 mg/L e a quantidade despejada pelas usinas varia de 10 a 15 litros de vinhaça por litro de etanol produzido, dependendo das condições de produção que sai dos aparelhos de destilação, em média de 85 a 90 °C.

A vinhaça possui maior teor poluidor dentre outros subprodutos industriais, comparando sua DBO com outros subprodutos. Por exemplo, a DBO (média) da vinhaça é de 30.000 mg/L, curtumes 4.000 mg/L e indústria têxtil 1.200 mg/L (LUDOVICE, 1997).

No que se refere à composição da vinhaça, de acordo com a Agência Nacional de Águas³ (2009 apud DINIZ 2010), ela depende de fatores como: natureza da composição dos vinhos, sistema de fermentação, tipo de levedura utilizada; tipo de tratamento das leveduras, aditivos utilizados na fermentação, aparelhos utilizados na destilação, qualidade da água usada, componentes utilizados para desinfecção e natureza e composição da matéria-prima.

No que se refere à vinhaça de etanol de segunda geração, há falta de informação na literatura sobre sua viabilidade econômica, principalmente devido ao atual estágio de desenvolvimento desse processo produtivo. A investigação de um processo tecnológico eficiente ainda está em andamento. A vinhaça de etanol de segunda geração apresenta um teor de matéria orgânica mais elevada do que a vinhaça de etanol de primeira geração. Em contraste, o teor de nutrientes e minerais, especialmente de potássio, é consideravelmente inferior para vinhaça de segunda geração. Assim, a aplicação da vinhaça de segunda geração no solo não pode ser justificada como ocorre com a vinhaça de primeira geração (MOARES; ZAIAT; BONOMI, 2015).

Em linha gerais, a composição química da vinhaça de diferentes origens é sintetizada na tabela 2.

Tabela 2 – Características físico-químicas de vinhaça de diferentes matérias primas

| Matéria Prima | Produção (L/L _{EtOH}) | DBO (g/L) | DQO (g/L) | N _{total} | P _{total} | K | SO ₄ ²⁻ | pH | Fonte |
|--------------------|---------------------------------|-----------|-----------|--------------------|--------------------|-----------|-------------------------------|------|---------------------------------------------------------------|
| Melaço (beterraba) | 11,6 | 44,90 | 91,10 | 3.569,00 | 163,00 | 10.030,00 | 3.030,00 | 5,35 | Holmes and Sane ⁴ (1986, apud Wilkie et al., 2000) |

Fonte: Fuess e Garcia (2012).

³ AGÊNCIA NACIONAL DE AGUAS. **Manual de Conservação e Reuso de Água na Agroindústria Sucroenergética**. Brasília, DF: ANA, FIESP, ÚNICA, CTC, 2009. Disponível em: <<http://www.fiesp.com.br/indices-pesquisas-e-publicacoes/manual-de-conservacao-e-reuso-de-agua-na-agroindustria-sucroenergetica/>>. Acesso em: 17 ago. 2015.

⁴ HOLMES, B. S.; SANE, M. **Appropriate solutions to agro-industrial pollution abatement in developing countries**. In: EFFLUENT TREATMENT AND DISPOSAL, Oxford, Pergamon Press, 1986.

Tabela 2 – Características físico-químicas de vinhaça de diferentes matérias primas

| Matéria Prima | Produção (L/L_{EtOH}) | DBO (g/L) | DQO (g/L) | N_{total} | P_{total} | K | SO₄²⁻ | pH | Fonte |
|----------------------|--------------------------------------|------------------|------------------|--------------------------|--------------------------|----------|------------------------------------|-----------|--------------------------------------------------------------|
| Caldo de cana | 16,30 | 16,70 | 30,40 | 628,00 | 130,00 | 1.952,00 | 1.356,00 | 4,04 | Wilkie et al. ⁵ (2000, apud Fuess e Garcia, 2012) |
| Melaço (cana) | 14,00 | 39,00 | 84,90 | 1.229,00 | 187,00 | 5.124,00 | 3.478,00 | 4,46 | Wilkie et al. (2000, apud Fuess e Garcia, 2012) |
| Melaço (cana) | nd | 25,8 | 48,00 | 820,00 | 480,00 | nd | nd | nd | Menezes ⁶ (1980, apud Fuess e Garcia, 2012) |
| Material celulósico | 11,10 | 27,60 | 61,30 | 2.787,00 | 28,00 | 39,00 | 651,00 | 5,35 | Wilkie et al. (2000, apud Fuess e Garcia, 2012) |
| Mandioca | 16,00 | 31,40 | 81,10 | 650,00 | 124,00 | nd | nd | 3,5 | Wilkie et al. (2000, apud Fuess e Garcia, 2012) |
| Milho | nd | 26,9 | 64,50 | 755,00 | 1.170,00 | nd | nd | 3,65 | Wilkie et al. (2000, apud Fuess e Garcia, 2012) |
| Milho | nd | 43,10 | 59,40 | 546,00 | 228,00 | nd | 299,00 | nd | Wilkie et al. (2000, apud Fuess e Garcia, 2012) |
| Sorgo sacarino | nd | 46,00 | 79,9 | 800,00 | 100,00 | nd | nd | 4,5 | Wilkie et al. (2000, apud Fuess e Garcia, 2012) |

Fonte: Fuess e Garcia (2012).

Até o final dos anos 70, volumes crescentes de vinhaça eram lançados nos mananciais superficiais. Os lançamentos eram de caráter sazonal, de acordo com o ciclo da produção de etanol, afetando, conseqüentemente, as funções de auto regulação e auto reprodução dos ecossistemas (CORAZZA, 2006).

Os impactos da aplicação da vinhaça variam de acordo com a sua composição química, volume e da periodicidade de aplicação. Para Piacente (2005), a alta concentração de vinhaça no solo e no lençol freático pode acarretar alta concentração de metais como o

⁵ WILKIE, A. C.; RIEDESEL, K.J.; OWENS, J.M. Stillage characterization and anaerobic treatment of ethanol stillage from conventional and cellulosic feedstocks, **Biomass and Bioenergy**, v. 19, p. 63-102. 2000. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953400000179>>. Acesso em: 17 ago. 2015.

⁶ MENEZES, T. J. B. **Etanol: o combustível do Brasil**. São Paulo: Editora Agrônômica Ceres, 1980. 233 p. Disponível em: <<http://bases.bireme.br/cgi-bin/wxislind.exe/iah/online/?IsisScript=iah/iah.xis&src=google&base=REPIDISCA&lang=p&nextAction=lnk&exprSearch=147153&indexSearch=ID>>. Acesso em: 17 ago. 2015.

magnésio, alumínio, ferro e cloreto como, também, a matéria orgânica. De acordo com Ludovice (1997), em canais de escoamento de vinhaça, a contaminação do lençol freático pode chegar a 91,7%, tornando assim poluída a manta freática. Uma vez contaminada, as possibilidades de reversão são pequenas. Ainda, de acordo com o mesmo autor, a vinhaça apresenta nocividade elevada para grandes animais aquáticos, afugenta a fauna marítima da costa brasileira do fenômeno fisiológico da desova e destrói a microflora, microfauna, plantas aquáticas submersas e flutuantes.

De acordo com Moraes, Zaiat e Bonomi (2015), a aplicação indiscriminada da vinhaça no solo intensifica a salinização, a lixiviação de metais, emissões de gases de efeito estufa e contaminação de águas subterrâneas. A situação é mais complexa no caso da vinhaça de etanol de segunda geração e das pentoses de bebidas alcoólicas, para as quais não existem normas ambientais e elas não podem ser utilizadas como fertilizantes em culturas de cana-de-açúcar, diferentemente da vinhaça de etanol de primeira geração.

Considerando que o Brasil produziu, na safra 2013/2014, de acordo com a UNICA (2016a), em torno de 25,04 bilhões de litros de etanol, a produção de vinhaça nessa safra foi de no mínimo 250 bilhões de litros, um volume bastante preocupante.

Porém, a inadequada e indiscriminada disposição de vinhaça no solo, nos rios, nos lagos e nos aquíferos tem recebido a atenção desde a década de trinta no Brasil, devido aos problemas ambientais associados a essa prática.

3.1.2 Revisão normativa sobre o descarte de vinhaça no Brasil

Dado seu caráter poluidor, como também seu volume de produção, uma série de arcabouços legais tem sido construída historicamente com o objetivo de minimizar e mesmo eliminar o descarte da vinhaça indiscriminada no solo, rios, lagos e aquíferos.

Uma das primeiras propostas legais com o objetivo de regular o descarte desse subproduto, de acordo com Fernandes Filho e Araujo (2016, p. 151) foi:

Em 1642, os holandeses foram responsáveis por elaborar uma legislação bastante avançada para a época, tendo editado, em 5 de março de 1642, norma que proibia o lançamento do bagaço de cana-de-açúcar nos rios e açudes da região. Quase três séculos se passariam até que, no governo Vargas, o assunto voltasse à baila, por meio do Decreto n.º 23.777, de 23 de janeiro de 1934, que reconhecia o lançamento do vinhaça nas águas fluviais como um problema de solução urgente, em virtude de sua ação nociva sobre a sobrevivência dos peixes. Por meio de referido decreto, ficavam as usinas de açúcar obrigadas a lançarem seus subprodutos industriais longe das margens, em lugar fundo e de correnteza e, na impossibilidade da tal prática, deveriam as usinas adotar tanques de depuração para, somente então, escoarem o líquido beneficiado para as coleções hídricas. Os subprodutos da depuração seriam transformados em adubos.

Posteriormente ao Decreto n° 23.777 de 1934, uma série de normativas foram elaboradas para adequar o descarte de vinhaça nas coleções hídricas. Melissa et al. (2007) e Brasil (2011), apontam, a partir de uma perspectiva história, os principais instrumentos legais referentes a proteção das águas e lançamento de vinhaça:

- **Decreto-Lei n° 1.413, de 14 de agosto de 1975:** Dispõe sobre o controle da poluição do meio ambiente provocada por atividades industriais (BRASIL, 1975);
- **Portaria do Ministério do Interior n° 323 de 29 de novembro de 1978:** A partir da safra 1979/ 1980, fica proibido o lançamento direto ou indireto de vinhaça em qualquer coleção hídrica pelas destilarias de álcool instaladas ou que venham a se instalar no país (BRASIL, 1978);
- **Portaria do Ministério do Interior n° 124, de 20 de agosto de 1980:** Baixa normas no tocante à prevenção de poluição hídrica para a localização de indústrias, construções ou estruturas potencialmente poluidoras e para dispositivos de proteção (BRASIL, 1980);
- **Portaria do Ministério do Interior n° 158 de 03 de novembro de 1980:** Dispõe sobre seu lançamento em coleções hídricas e sobre efluentes de destilarias de usinas de açúcar. A Resolução do CNRH n° 15 de 01/06/2001 dá as diretrizes para a gestão integrada das águas superficiais e subterrâneas (BRASIL, 1980);
- **Lei n° 7.960 de 21 de dezembro de 1989:** Dispõe sobre a prisão temporária por crime de envenenamento de água potável, dentre outros (BRASIL, 1989);
- **Lei n° 9.605, de 12 de fevereiro de 1998:** Em seus artigos 33 e 54, aponta as penas que serão impostas aos infratores quando da ocorrência da morte de animais por emissão de efluentes nas águas e na ocorrência de poluição hídrica, respectivamente. Há casos em que os infratores recebem as penas de reclusão de um a três anos, multa ou ambas, cumulativamente, para infração do artigo 33 e de um a cinco anos de reclusão na infração do artigo 54 (BRASIL, 1998);

3.1.3 Revisão normativa sobre o descarte de vinhaça nos estados brasileiros

Com o objetivo de complementar o quadro federal legal referente ao descarte de vinhaça, os estados da federação elaboraram seus respectivos arcabouços legais visando fazer cumprir a legislação.

De acordo com Fernandes Filho e Araujo (2016), os estados do Acre, Alagoas, Amapá, Amazonas, Bahia, Ceará, Espírito Santo, Maranhão, Mato Grosso, Pará, Paraíba,

Piauí, Rio Grande do Norte, Rio Grande do Sul, Rondônia, Roraima, Sergipe e Tocantins não possuem legislação referente ao descarte de vinhaça. No estado de Goiás, o Centro de Apoio Operacional do Meio Ambiente do Ministério Público do Estado de Goiás, na Recomendação MP/GO n.º 003/2007, os promotores, dado à expansão do setor sucroenergético no estado, reconhecem a Agência Ambiental do Estado de Goiás, a realização de EIA/RIMA, que exige das usinas que se abstenham de manter subprodutos líquidos em contato com o solo e que procedam a fertirrigação em áreas de pelo menos 200 metros distantes das coleções hídricas.

Em Minas Gerais, a Lei n.º 9.367/86 prevê que “o vinhaça, as águas residuais e os subprodutos sólidos das indústrias de açúcar, álcool e aguardente não podem ser lançados direta ou indiretamente em qualquer curso d’água ou lagoa sem tratamento prévio...”, com penas previstas na Lei Estadual n.º 7.772/80.

No que se refere aos estados de Alagoas, a Portaria MINTER n.º 323, de 29.11.78, proíbe o lançamento de vinhaça em coleções de água (ALAGOAS, 1986).

Especificamente nos estados do Paraná, Pernambuco, Rio de Janeiro e Santa Catarina, de acordo com Fernandes Filho e Araujo (2016, p, 154).

No Paraná, a Lei n.º 8.935/1989 proíbe a instalação de usinas de álcool nas bacias destinadas ao abastecimento público. O Decreto n.º 10.068/2014 regulamenta, de forma bem definida, o armazenamento e distribuição da vinhaça, e a implementação de auditoria ambiental compulsória. O decreto prevê a necessidade de apresentação de projeto técnico de impermeabilização do sistema de armazenamento e distribuição do subproduto, que deve vir acompanhado de plantas em escala e, especificação da tecnologia do revestimento, metodologia de construção, cronograma de execução e plano de monitoramento. A norma prevê a necessidade de impermeabilização dos canais e determina um cronograma de adaptação às unidades já instaladas.

Em Pernambuco chegou a possuir uma lei que proibia a instalação de destilarias de álcool sem a previsão, em seus projetos, de processos de tratamento ou aproveitamento de vinhaça, e que impedia as empresas de lançarem seus efluentes em qualquer volume d’água do estado. Tal normativo, porém, foi revogado pela Lei n.º 9.988/1987.

No Rio de Janeiro, por meio da Lei n.º 940/85 previu, a partir da safra 1986/87, a obrigatoriedade de tratamento do vinhaça, das águas de lavagem e dos demais efluentes, além de ter obrigado as indústrias do setor a apresentarem projetos de utilização das águas residuárias e demais subprodutos.

Em Santa Catarina prevê, no Código Estadual do Meio Ambiente, a proibição do lançamento, em corpos d’água, de qualquer subproduto proveniente de usinas de açúcar e destilaria de álcool, direta ou indiretamente.

O estado do Mato Grosso do Sul possui um quadro legal exigente, avançado e detalhista referente ao descarte de vinhaça. A Lei n.º 4.661/2015 prevê a elaboração do Plano de Aplicação da Vinhaça pelas usinas sucroenergéticas aonde tal plano deve relatar: memorial descritivo e planta, localização dos reservatórios e dos cursos d’água, poços utilizados para abastecimento, áreas de interesse ambiental, dados geológicos e hidro geológicos do local, os

resultados de pesquisas analíticas dos solos e a forma e a dosagem de aplicação da vinhaça (FERNANDES FILHO; ARAUJO, 2016).

Além disso, a lei supracitada também obriga as usinas sucroenergéticas a elaborar, a cada safra, relatórios técnicos de monitoramento com resultados detalhados de análise de poços, reservatórios e águas superficiais para mensurar os níveis de ponte Hidrogeniônica e a demanda química e bioquímica de oxigênio, outrossim, impõe restrições à área de aplicação de vinhaça.

No estado de São Paulo destaca-se a Norma Técnica P 4.231 da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo de 2005. Atualmente em sua terceira edição e segunda versão, a norma traz critérios e procedimentos detalhados para a aplicação de vinhaça no solo, critérios e procedimentos para aplicação na agricultura, estabelece os critérios e procedimentos para o armazenamento, transporte e aplicação da vinhaça, gerada pela atividade sucroenergetica no processamento de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo, dispõe sobre os limites da aplicação de vinhaça de acordo com os seguintes parâmetros (CETESB, 2006):

- O potássio é o elemento químico em maior abundância na vinhaça, portanto, é o fator limitante para o uso do efluente como fertilizante;
- O teor de potássio aplicado não pode ultrapassar 5% da capacidade de troca catiônica do solo (CTC);
- Após atingir o limite de 5 % da capacidade de troca catiônica do solo, o teor de potássio aplicado deve se manter em 185 kg de óxido de potássio (K_2O) por hectare ao ano, quantidade que a cultura da cana-de-açúcar extrai anualmente do solo, limitando-se a reposição da mesma quantidade da extração.

A norma traz ainda, para Fernandes Filho e Araujo (2016), requisitos técnicos relativos à construção de tanques de armazenamento, à impermeabilização de canais, à concentração máxima de elementos nas amostras fiscalizadas e instruções de aplicação do efluente. Atualmente, essa é a norma que fornece às usinas as diretrizes para disposição de vinhaça ao mesmo tempo em que dá suporte jurídico aos órgãos fiscalizatórios.

3.1.4 Potencial utilização de vinhaça

Embora com todo arcabouço legal no que se refere à destinação adequada de vinhaça no Brasil, para Moares, Zaiat e Bonomi (2015), especificamente no que refere à resolução CETESB, ela pode ser considerada superficial porque é prescrita somente de acordo com o seu teor de potássio, porém, os potenciais impactos ambientais a ele associados não são considerados.

Todavia, os instrumentos normativos e legislações publicadas têm como objetivo não somente mitigar o descarte de vinhaça no solo e nas coleções de águas, mas também, incentivar novas aplicações para esse subproduto com o pressuposto de promover o desenvolvimento econômico e social em sua reutilização em consonância com a preservação ambiental. Simultaneamente com a construção desses instrumentos legais, pesquisadores têm focado em encontrar usos e tratamentos para a vinhaça.

Para tanto, deve-se considerar a viabilidade econômica e ambiental do reaproveitamento desse subproduto: estágio no processo de pesquisa e desenvolvimento, logística, investimento em infraestrutura, custos e despesas com operação e manutenção, competitividade do produto final em liderança em custo ou diferenciação.

Nesse sentido, Sheehan e Greenfield (1980), Willington e Marten (1982), Gloria, Orlando Filho (1983), Cortez, Freire e Rosillo Calle (1998), Cortez, Magalhães e Happi (1992), Corazza, Salles Filho (2000), Oliveira (2011), Laime et al. (2011), FAPESP (2012), Rodrigues et al.,(2012), Moares, Zaiat e Bonomi (2015) e UNICA (2016b) baseiam-se nas tecnologias disponíveis para o reaproveitamento da vinhaça, enumeram alternativas em consonância com o desenvolvimento sustentável. Dentre as alternativas pode-se citar:

- **Biodigestão anaeróbia:** O aproveitamento de vinhaça para a produção de biogás aparece como uma das principais alternativas que pode vir a se tornar viável do ponto de vista econômico e ambiental, devido ao aumento da eficiência dos biodigestores, ao quadro legal mais exigente referente ao descarte de vinhaça no solo, ao tratamento do subproduto, à produção de biogás para a geração de eletricidade e substituição do Diesel na frota das usinas e vinhaça biodigerida para utilização como fertilizante com baixas cargas de DQO para aplicação nas lavouras (RODRIGUES et al., 2012; UNICA, 2016b);
- **Fertirrigação:** A fertirrigação é a principal utilização de vinhaça, na medida em que o processo conjunto de irrigação e adubação consiste na utilização da própria água de irrigação para conduzir e distribuir o adubo orgânico ou químico na lavoura. Seus principais benefícios são: (a) elevação do pH; (b) aumento da disponibilidade de alguns íons; (c) aumento da capacidade de troca catiônica (CTC); (d) aumento da capacidade de retenção de água (e) melhoria da estrutura física do solo; (f) aumento da população e atividade microbiana no solo; (g) aumento da produção de açúcar por hectare, (h) aumento da longevidade dos ciclos de produção; (i) aumento da produtividade agrícola, sobretudo em solos mais pobres e em regiões mais secas, (l) custo inferior ao da adubação mineral, (m) baixo investimento (tanques, caminhões, e

hoje, dutos e bombas); (n) baixo custo de manutenção (pouco pessoal, Diesel, eletricidade gerada localmente) e n) rápida disposição (não sendo necessário grandes reservatórios reguladores) (GLORIA; ORLANDO FILHO, 1983). De acordo com Cortez, Freire e Rosillo Calle (1998), a aplicação racional da vinhaça *in natura* em doses de 150m³/ha equivale a uma adubação de 61 kg/ha de nitrogênio, 40 kg/ha de fósforo, 343 kg/ha de potássio, 108 kg/ha de cálcio e 80 kg/ha de enxofre;

- **Construção civil:** A vinhaça pode ser adicionada à massa de cimento. Também existem estudos sobre a fabricação de materiais de construção, principalmente tijolos, a partir de vinhaça, sendo feitos avanços significativos quanto à resistência do material obtido. A viabilidade econômica desta alternativa deve se restringir às construções próximas do local de origem da vinhaça devido aos custos com transportes (CORAZZA; SALLES FILHO, 2000; LAIME et al., 2011);
- **Produção de biodiesel:** o excedente de vinhaça pode ser usado para produzir lipídeos com maior valor agregado para produção de biodiesel e antiespumantes, com uso direto pela própria indústria sucroenergética. Para tanto, são selecionadas linhagens de leveduras com capacidade de consumir os compostos orgânicos de vinhaça para produção desse combustível (FAPESP, 2012);
- **Fabricação de ração animal:** A fabricação de ração animal a partir de vinhaça também é uma possibilidade estudada durante os anos 80. O subproduto deve ser tratado para a redução do nível de potássio, podendo ser utilizado em ração de bovinos, suínos e aves. Reporta-se que a ração assim produzida não interfere no sabor ou odor do leite e seus derivados e tem boa aceitação pelos animais e taxa de conversão (ganho de peso com relação ao consumo de ração) é adequada. Há, porém, limitações de dosagem que devem ser obedecidas. Em ruminantes, por exemplo, a ração feita da vinhaça não pode ultrapassar 10% da alimentação diária. Em suínos, ela não deve ultrapassar de 2 a 3%. (CORAZZA; SALLES FILHO, 2000; LAIME et al., 2011);
- **Produção de leveduras:** A produção de levedura a partir da vinhaça é também uma tecnologia alternativa que pode reduzir a descarga desse subproduto. No entanto, dois fatores contribuem para o aumento dos custos dessa alternativa: (a) necessidade de adicionar sais de amônio e magnésio à vinhaça e (b) alto consumo de energia para a evaporação da água de vinhaça necessária no processo (CORAZZA; SALLES FILHO, 2000; LAIME et al., 2011).

Sendo assim, os principais produtos e processos oriundos de vinhaça têm suas respectivas vantagens e desvantagens sintetizados no quadro 4.

Quadro 4 – Uso potencial da vinhaça: vantagens e desvantagens

| Processo/Produto final | Vantagens | Desvantagens |
|-------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Biodigestão Anaeróbia | Produção de energia elétrica; Redução de DBO; Efluente e fertilizante. | Custo elevado; Alta tecnologia. |
| Fertirrigação | Fácil de ser adotado. | Efeito de longo prazo desconhecido; Custo logístico elevado. |
| Construção civil | Avanços significativos quanto à resistência do material. Potencial de redução da descarga de vinhaça. | Restringe-se às construções próximas ao local de origem da vinhaça. Custo logístico elevado. |
| Biodiesel | Produzir lipídeos com maior valor agregado para produção de biodiesel. | Em fase de pesquisa. |
| Ração Animal | Método barato; Fácil de ser adotado. | Não foi pesquisado o suficiente. |
| Leveduras | Redução da descarga de vinhaça. | Elevado custo no processo de produção. |

Fonte: Adaptado de Cortez, Magalhães e Happi (1992), Corazza, Salles Filho (2000), Laime et al. (2011), FAPESP (2012), Rodrigues et al., (2012), Moares, Zaiat e Bonomi (2015) e UNICA (2016b).

As possibilidades de reutilização supracitadas estão em consonância com a Produção Mais Limpa pela indústria sucroenergética, conforme destacado no capítulo 3.3 dessa dissertação. Em suma, a utilização de vinhaça e seus aspectos políticos, legais, econômicos, sociais e tecnológicos são sumarizados no quadro 5.

Quadro 5 – Aspectos políticos, legais, econômicos, sociais e tecnológicos de vinhaça

| Político/Legal | Econômico | Social | Tecnológico |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Ausência de políticas públicas de fomento ao biogás;</p> <p>Baixo investimento em pesquisa e desenvolvimento em reutilização de vinhaça;</p> <p>Falta de clareza no setor de eletricidade;</p> <p>Interferência governamental no setor de combustíveis e energia elétrica;</p> <p>Ausência de leilões exclusivos para a biomassa da cana-de-açúcar;</p> <p>Fiscalização deficitária concernente ao cumprimento do arcabouço legal referente a destinação de vinhaça;</p> <p>Taxa de juros.</p> | <p>Descapitalização do setor sucroenergético;</p> <p>Retração do Produto Interno Bruto;</p> <p>Elevado investimento em transmissão de eletricidade;</p> <p>Riscos econômicos referente a investimento em pesquisa e desenvolvimento;</p> <p>Investimentos substanciais em pesquisa e desenvolvimento;</p> <p>Preço do MWh no ambiente de contratação livre e regulado;</p> <p>Investimento na elaboração e construção de usina de biodigestão de vinhaça.</p> | <p>Movimentos ambientalistas;</p> <p>Exigência do consumidor por processos produtivos em consonância com o desenvolvimento sustentável.</p> | <p>Biodigestor plug and flow;</p> <p>Biodigestor UASB;</p> <p>Biodigestor EGSB;</p> <p>Biodigestor de filtro anaeróbio;</p> <p>Biodigestor IC;</p> <p>Reator Anaeróbio de Leito Fluidizado;</p> <p>Reator Anaeróbio de Leito Expandido;</p> <p>Fertirrigação sem emissão de NO₂;</p> <p>Construção civil;</p> <p>Geração de eletricidade;</p> <p>Produção de biogás;</p> <p>Ração animal;</p> <p>Produção de biodiesel;</p> <p>Produção de leveduras.</p> |

Fonte: Elaborado pelo Autor.

No que se refere especificamente à biodigestão anaeróbia da vinhaça, ela surge como uma alternativa de produção de energia elétrica. Esse processo reduz o potencial poluidor, normalizando a DBO e o pH, ao mesmo tempo, produz o biogás.

Os principais tipos de biodigestores, as principais características do biogás e sua produção a partir da vinhaça serão discutidos com maior profundidade no capítulo a seguir.

3.2 Biodigestores

3.2.1 Definição de biodigestão

A biodigestão anaeróbia consiste na fermentação com ausência de oxigênio de subprodutos orgânicos a partir de bactérias anaeróbias que digerem a matéria orgânica transformando-a em metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂), principais componentes do biogás. A execução e a eficiência da biodigestão dependem tanto de condições específicas de operação como de temperatura, pH do meio, do tipo de substrato usado no processo, da

concentração de sólidos e do período de retenção da biomassa no biodigestor (SALOMON, 2007).

O processo de biodigestão anaeróbia, de acordo com Gaspar (2003, p. 17), consiste na “degradação biológica de substâncias orgânicas complexas na ausência de oxigênio. No processo de digestão anaeróbia, a matéria orgânica é degradada biologicamente, tendo como um dos produtos finais o metano”. Ainda segundo Salomon (2007), a biodigestão anaeróbia que ocorre a partir de um biodigestor é semelhante a que ocorre no ecossistema, na qual as bactérias trabalham para realizar a transformação da matéria orgânica em metano.

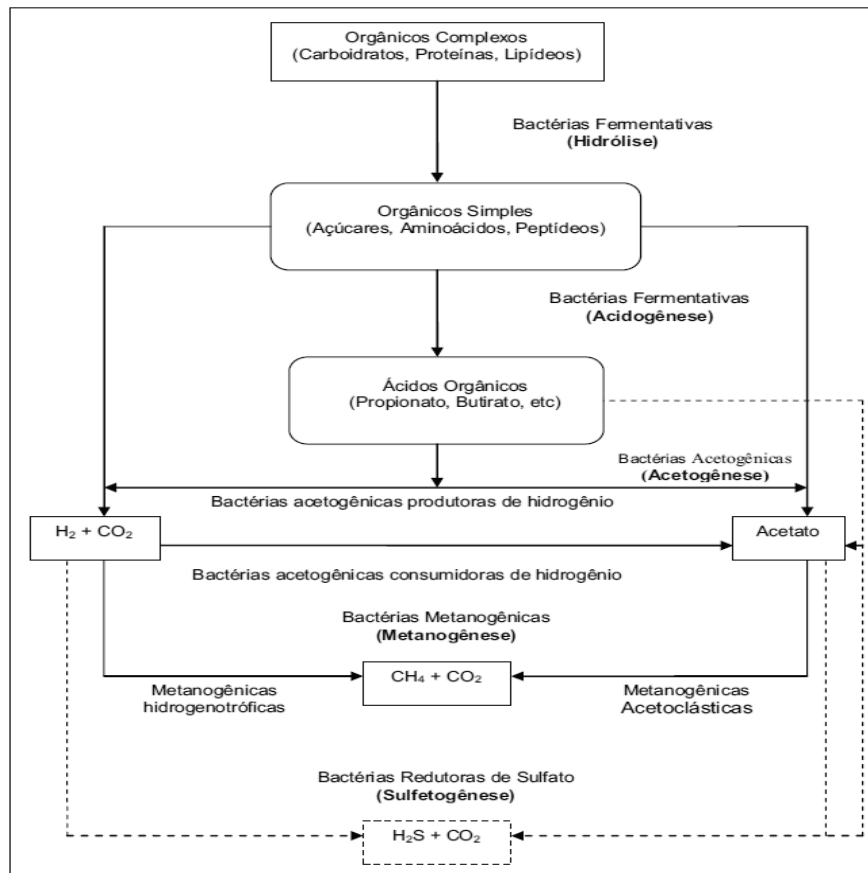
A digestão anaeróbia para Moraes, Zaiat e Bonomi (2015, p. 894), é composta:

[...] por um conjunto de processos metabólicos complexos e sequenciais que ocorrem na ausência de oxigênio e dependem da atividade de pelo menos, três grupos de bactérias para promover a fermentação estável e auto reguladora da matéria orgânica: acidogênicas, acetogênica e metanogênica. Na presença de sulfato, sulfito, ou tiosulfato, há também a atividade das bactérias redutoras de sulfato, responsável pela redução de compostos de enxofre oxidados em sulfureto dissolvido no efluente e de sulfureto de hidrogênio no biogás. Os fatores ambientais que influenciam a digestão anaeróbia envolvem, principalmente, temperatura, pH, alcalinidade, macronutrientes adequados (N, P, SO_4^{2-}) e micronutrientes (traços de metais), tempo metabólico adequado e uma fonte de carbono para a síntese e de energia, que afeta o produto químico e as taxas de reação bioquímica.

A digestão anaeróbia, para Campos et al. (2006), Siqueira (2010) e Baldacin e Pinto (2015) é um processo que ocorre na ausência de oxigênio no qual bactérias facultativas e anaeróbias degradam compostos orgânicos complexos, convertendo-os em metano e dióxido de carbono. Nesse sentido, compostos orgânicos como os carboidratos, proteínas e lipídios são hidrolisados em compostos orgânicos simples como: açúcares, aminoácidos e peptídeos, posteriormente, são metabolizados pelas bactérias fermentativas acidogênicas e transformados em ácidos orgânicos como o acético, o propiônico e o butírico.

Em seguida, as bactérias acetogênicas transformam os produtos da etapa anterior em hidrogênio, dióxido de carbono e acetato, na sequência, a metanogênese resulta na formação de metano a partir de dois grupos de bactérias arqueas: as metanogênicas acetoclásticas, que utilizam o acetato e o metanol, e as hidrogenotróficas, que metabolizam o hidrogênio e o dióxido de carbono, por fim, a sulfetogênese, que a partir das bactérias redutoras de sulfato, produzirá o sulfeto. A figura 3 ilustra o processo bioquímico supracitado.

Figura 3 – Etapas do processo da biodigestão anaeróbia



Fonte: Siqueira (2008).

Fair e Moore⁷ (1934, apud MORAES; ZAIAT; BONOMI, 2015) foram os primeiros a demonstrar que as taxas mais elevadas de reação de digestão ocorrem em duas faixas de temperatura ótimas denominadas mesófilos, em aproximadamente 30°C, e termofílica, em aproximadamente 50 °C.

Nesse processo, grande parte da matéria orgânica é convertida em biogás, cerca de 70 a 90%, em biomassa microbiana, cerca de 5 a 15% e lodo excedente, entre 10 a 30% (PESTANA; GANGHIS, 2010).

A utilização da biodigestão anaeróbia para tratamento de efluentes cresceu muito nas últimas décadas. Este crescente emprego da biodigestão anaeróbia deve-se principalmente ao balanço energético mais favorável do que no processo aeróbio convencional. Dentre as principais vantagens estão: o baixo consumo de eletricidade, a produção de metano, a baixa

⁷ FAIR, G. M.; MOORE, E. W. Time and rate of sludge digestion, and their variation with temperature. **Sewage Works J**, p. 3-13, 1934. Disponível em: <<http://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2s2.010144227156&origin=inward&txGid=0>>. Acesso em: 28 mar. 2016.

produção de lodo, custo de implantação e de operação, simplicidade operacional, a tolerância a altas cargas e capacidade de compactação (BERNI; BAJAY, 2003).

Porém, as desvantagens são: sensibilidade das bactérias a algumas condições ambientais tais como o pH, a temperatura, a necessidade nutricional, compostos tóxicos, as sobrecargas orgânicas e hidráulicas e o longo processo de partida.

- **Temperatura:** As bactérias metanogênicas sofrem com a influência da temperatura pois apresentam um intervalo de temperatura restrito de operação, podendo causar o aumento de ácidos voláteis a partir de baixas temperaturas e, conseqüentemente, uma queda de pH (SILVA, 2013). Segundo Faria (2012), para cada 5°C de queda de temperatura, há um declínio de 34% da atividade dos microrganismos;
- **pH:** O pH está ligado às concentrações de ácidos orgânicos voláteis, resultantes do equilíbrio entre populações de bactérias e a alcalinidade do sistema, nesse sentido, qualquer desequilíbrio provoca o acúmulo de ácidos orgânicos, conseqüentemente, a queda do pH (SALOMON, 2007). Segundo a autora, os valores de pH abaixo de 6 e acima de 8 praticamente fazem cessar a produção de metano. O ácido carbônico e os ácidos voláteis são os compostos que mais influenciam o pH nos processos anaeróbios;
- **Toxicidade:** A toxicidade é considerada uma das razões para a não aplicação de processos anaeróbios, na medida em que as bactérias metanogênicas são inibidas pelas toxinas devido a pequena fração de substratos sintetizados e ao elevado tempo de geração dessas bactérias (SALOMON, 2007);
- **Nutrição:** As necessidades nutricionais das bactérias presentes no sistema de biodigestão anaeróbio são estabelecidas de acordo com a composição química das bactérias. Os elementos em maior quantidade são: carbono, oxigênio, nitrogênio, hidrogênio, fósforo e enxofre. Outros nutrientes como cátions (Mg^{+2} , Ca^{+2} , Na^{+1} , K^{+1} e Fe^{+2}) e ânions (Cl^{-1} SO^{-2}) servem como elementos auxiliares para as enzimas contidas no biodigestor (BRUNO, 2007).

3.2.2 Reatores anaeróbios

O biodigestor anaeróbio constitui-se basicamente de uma câmara de fermentação aonde ocorre a biodigestão da matéria orgânica, de uma campânula que armazena o gás produzido ou se permite a saída deste gás, uma entrada para substrato a ser fermentado e uma saída para o efluente produzido pelo processo. De tecnologia simples, a principal preocupação

é a manutenção das propriedades fermentativas da biomassa bacteriana. Na construção de um biodigestor eficiente com alta produtividade, deve-se atender basicamente a três requisitos: o saneamento, o atendimento de uma demanda energética e a utilização do material biodegradado como fertilizante (GRANATO; SILVA, 2002).

Sendo assim, os principais benefícios da biodigestão anaeróbia são: a produção de biogás combustível, o controle de poluição das águas e a preservação fertilizante do subproduto (ZANIN; BAGATINI; PESSATTO, 2010).

Os biodigestores, para Rizzo e Leite (2004), são divididos em dois grupos: reatores de biomassa em suspensão e os reatores de biomassa fixa a um suporte inerte. Sua evolução ao longo história é dividida em três gerações de reatores como mostra o quadro 6.

Quadro 6 – Gerações de reatores anaeróbios

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

Fonte: Rizzo e Leite (2004).

3.2.2.1 Modelos de Biodigestores

As tecnologias mais utilizadas para biodigestão anaeróbia em escala industrial são Biodigestor “*Plug Flow*”, *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* (UASB), Reator Anaeróbio de Circulação Interna, Filtro Anaeróbio, Reator Anaeróbio de Leito Fluidizado e Reator Anaeróbio de Leito Expandido. Esses tipos de reatores podem tratar efluentes com altas cargas orgânicas.

3.2.2.1.1 Biodigestor “Plug-Flow”

De acordo com Lima⁸ (2011, apud NOGUEIRA ET AL., 2015), o modelo de reator anaeróbio fluxo tubular, também chamado de “*plug-flow*”, é um reator de alimentação contínua, caracterizado como uma lagoa retangular coberta, aonde a relação comprimento/largura é de ordem de 3 para 1. O biodigestor é formado por uma câmara de

⁸ LIMA, H. Q. **Avaliação dos modelos Hashimoto e AMS-III.D para produção de metano com dejetos de suínos**. 2011. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Alimentos). Universidade Federal do ABC; Santo André, 2011. p. 148. Disponível em: <http://tede.ufabc.edu.br/tde_busca/arquivo.php?codArquivo=254>. Acesso em: 28 mar. 2016.

fermentação no solo coberto com um manto de polietileno com espessura de 0,8 mm a 2 mm na cor preta. O revestimento interior é feita de material sintético flexível, manta de polí cloreto de vinila (PVC) com uma espessura de 0,8-1 milímetros na cor preta ou branca para evitar vazamentos e potencial contaminação do solo e do lençol freático.

Ainda de acordo com Nogueira et al. (2015, p. 302), a cobertura de PVC flexível atua como um gasômetro, que ao ser insuflado, a pressão do biogás permanece constante devido à flexibilidade da manta.

[...] neste sistema, a remoção das lamas e a reciclagem do desperdício são realizadas com o auxílio de uma bomba hidráulica, o que contribui para a agitação do substrato. Outra maneira de promover esta agitação é a partir da recirculação do biogás para a parte inferior da câmara de fermentação, utilizando um compressor de gás e válvula de alívio, favorecendo a degradação do substrato e aumentar a eficiência do processo de digestão anaeróbia. Neste sentido, biodigestores tubulares mostram um tempo de retenção mais elevada, Precisamente devido à sua maior tempo de retenção hidráulico, eles permitem uma redução de matéria orgânica que é superior ao de biodigestores UASB hemofílicas.

No biodigestor *Plug Flow* com bactérias mesófilas, o processo anaeróbio é viável sob no intervalo de temperatura entre 10 e 42 °C, já os biodigestores com bactérias termofílicas, a temperatura encontra-se acima de 42 °C (NOGUEIRA, 2015).

3.2.2.1.2 Biodigestor modelo UASB

Desenvolvido na Holanda, os biodigestores *Upflow Anaerobic Sludge Blanket Digestior* (UASB) são indicados para o tratamento de efluentes com teor de sólidos de até 2% (CORTEZ et al., 2008).

Para Granato (2003), nesse reator, o efluente é bombeado de baixo para cima, aonde se encontra sob estritas condições anaeróbias a uma velocidade de ascensão que varia de 0,5 a 1,5 m/h, nele ocorre um processo de seleção que pode resultar no crescimento de microrganismos anaeróbios em conglomerados compactos (grânulos) variando de tamanho entre 0,5 e 5 mm. Esses grânulos são biocatalíticos, que podem converter a matéria orgânica degradável em biogás de maneira rápida e completa.

De acordo com Salomon (2007, p. 125),

[...] o biodigestor UASB pode apresentar várias configurações, como tanques cilíndricos, quadrados e retangulares. Nessas configurações, o efluente é bombeado ao topo do reator aonde é distribuído na estrutura de distribuição, constituída por uma ou mais caixas distribuidoras de fluxo. Estas caixas são divididas internamente, conduzindo o efluente aos seus compartimentos internos. De cada um destes compartimentos, parte um tubo que conduz o efluente à parte inferior do reator, aonde é liberado e inicia seu fluxo ascendente, passando pela manta de lodo e vindo a ser coletado na parte superior, em vertedores ou tubulações perfuradas. Este é o

efluente do reator UASB. O gás que é produzido no compartimento de reação na forma de bolhas é coletado na parte central do separador trifásico.

O biodigestor UASB é utilizado para biodigestão de vinhaça devido a sua alta carga orgânica e taxa de produção nas usinas (da ordem de milhares de metros cúbicos diários). Para tornar tecnicamente viável a biodigestão de vinhaça, é necessário um reator que demande um menor tempo de retenção hidráulica (TRH), diminuindo assim a necessidade do aumento do volume deste pela quantidade de efluente digerido. Segundo Pinto (1999), o TRH é reduzido ao manter elevada a concentração de arqueas no interior do reator. Este efeito pode ser conseguido mantendo a recirculação externa ou retenção interna de microrganismos.

Segundo Florêncio⁹ (1999, apud SALOMON, 2007), a entrada do afluente num biodigestor de fluxo ascendente ocorre em sua parte inferior e em seguida, este segue um fluxo de baixo para cima. Esse procedimento faz com que microrganismos cresçam dispersos, não necessitando de um material de suporte e de um dispositivo de mistura, formando flocos ou grânulos que permanecem no reator aumentando a atividade bacteriana. No reator do tipo UASB, a remoção do DQO de efluentes industriais chega a ser de 80% com uma carga orgânica aplicada de 4 a 12 kg DQO/m³/dia, com um TRH de 4 a 12 horas (TCHOBANOGLIOUS¹⁰ et al., 1993 apud SALOMON, 2007). O biogás produzido é extraído na parte superior do biodigestor com o uso de um separador trifásico (sólido-líquido-gás) que separa o gás do efluente e faz o lodo retornar à câmara de digestão dando continuidade ao processo

3.2.2.1.3 Biodigestor EGSB

De acordo com Shultz et al. (2001), o reator de manta de lodo granular expandido EGSB (*Expanded Granular Sludge Bed*) surgiu da necessidade do aperfeiçoamento dos atuais sistemas de tratamento de efluentes. Para Toscani (2010), o EGSB foi elaborado a partir de alterações nos reatores UASB com o objetivo de otimizar o contato efluente/biomassa no processo de tratamento. Ambos os biodigestores usam lodo granular, porém, o EGSB opera com velocidades superficiais de 4 a 10 m/h produzidas pelas altas taxas de recirculação e pela relação altura e diâmetro do reator, enquanto que nos reatores UASB não devem ultrapassar 1,5 m/h.

⁹ FLORENCIO, M.L. Sistemas de tratamento anaeróbio. In: IV Curso de tratamento biológico de resíduos. 1997, MCT/CNPq, CPGEQ/UFSC, CDB. Florianópolis. **Anais**. IV Curso de tratamento biológico de resíduos, 1997, p.24

¹⁰ TCHOBANOGLIOUS G. et al. **Integrated solids waste management**: Engineering principles and management issues. Irwin Macgraw Hill, 1993. 978 p.

Dado essas características, para Zaiat (2003) e Chernicharo (1997), o reator EGSB promove: maior contato do efluente com a biomassa, aumento da eficiência do tratamento do efluente, segregação das partículas suspensão, redução do volume morto e curto-circuito, diluição de compostos tóxicos em concentrações elevadas, reduz os choques de pH favorecendo a atividade das bacteriana metanogênica e suporta altas cargas orgânicas, maiores que 40 kg DQO/m³/dia e, conseqüentemente, apresenta maior produção de biogás.

A Tabela 3 apresenta a utilização do reator EGSB para o tratamento de diferentes tipos de efluentes, obtendo altas eficiências na remoção de matéria orgânica.

Tabela 3 – Eficiência do reator EGSB para tratamento de determinadas águas residuárias

| Substrato | COV (kg DQO m ⁻³ .d ⁻¹) | Remoção de DQO | TDH | Fonte |
|-----------------------------------------|------------------------------------------------|----------------|-------------|-----------------------------------------------------------|
| Efluente de abatedouro | 15 | 67% | 5 h | Núñez e Martínez ¹¹ (1999, apud Correia, 2014) |
| Efluente de cervejaria | 12,6 | >80% | 1,2 – 2,1 h | Kato et al. ¹² (1999, apud Correia, 2014) |
| | | 81,1% | 6 h | |
| | | 57,9% | 3 h | |
| Efluente doméstico | 1,66 – 7,55 | 82,8% | 0,87h | Li et al. ¹³ (2007, apud Correia, 2014) |
| | | 56,6% | 1,5 h | |
| | | 79,5% | 0,32 h | |
| Efluente da fabricação de óleo de palma | 1,45-17,5 | 91% | 2 dias | Zhang et al. ¹⁴ (2008, apud Correia, 2014) |

Fonte: Correia (2014).

¹¹ NÚÑEZ, L.A.; MARTÍNEZ, B. Anaerobic treatment of slaughterhouse wastewater in an expanded granular sludge bed (EGSB) reactor. **Water Science and Technology**. v. 40, n. 8, p. 99 – 106, 1999. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273122399006149>>. Acesso em: 27 jul.2017.

¹² KATO, M. T.; FLORENCIO, L; ARANTES, R. F. M. Tratamento de esgotos sanitários em reatores tipo EGSB anaeróbio e aeróbio. Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios, **PROSAB**. v. 2, p. 175 – 184. 2001.

¹³ LI, X. M.; GUO, L.; YANG, Q.; ZENG, G. M.; LIAO, D.X. Removal of carbon and nutrients from low strength domestic wastewater by expanded granular sludge bed-zeolite bed filtration (EGSB-ZBF) integrated treatment concept. **Process Biochemistry**. v. 42, n. 8, p. 1173–1179, 2007. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359511307001079>>. Acesso em: 27 jul.2017.

¹⁴ ZHANG, Y.; YAN, L.; CHI, L.; LONG, X.; MEI, Z.; ZHANG, Z. Startup and operation of anaerobic EGSB reactor treating palm oil mill effluent. **Journal of Environmental Sciences**. v. 20, p. 658 – 663, 2008. Disponível em: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18763558>>. Acesso em: 27 jul.2017.

Tabela 3 – Eficiência do reator EGSB para tratamento de determinadas águas residuárias

| Substrato | COV (kg DQOm ⁻³ .d ⁻¹) | Remoção de DQO | TDH | Fonte |
|-----------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------|--------|----------------------------------------------------------|
| Efluente da fabricação de óleo de palma | 5,8 | 90% | 5 dias | Fang et al. ¹⁵ (2011, apud Correia, 2014) |
| Efluente de arroz parabolizado | 1 5 | 72% 83% | 5 h | Schulz et al. ¹⁶ (2001, apud Correia, 2014) |
| Lixiviado de aterro | 37,9 | 93% | 17 h | Liu et al. ¹⁷ (2011, apud Correia, 2014) |
| Efluentes do processamento do milho | 0,65 – 3,85 | 79 – 95% | --- | Ince et al. ¹⁸ (2012, apud Correia, 2014) |
| LAS - padrão | 13,2 | 78% | | Delforno et al. ¹⁹ (2014, apud Correia, 2014) |
| LAS - Efluente de lavanderia diluído | 11,2 | 77% | 38 h | |

Fonte: Correia (2014).

3.2.2.1.4 Biodigestor IC

O reator anaeróbico de circulação interna, assim como o reator EGSB, foi o aperfeiçoamento a partir do biodigestor UASB. O reator IC foi desenvolvido pela empresa holandesa PAQUES BV que possui sua patente. De acordo com Sereno Filho et al. (2013), o sistema IC é um reator com altura entre 16 e 24 metros e superfície de área pequena. Em

¹⁵ FANG, C.; O-THONG, S.; BOE, K.; ANGELIDAKI, I. Comparison of UASB and EGSB performance, for treatment of raw and deoiled palm oil mill effluent (POME). **Journal of Hazardous Materials**. v. 189, p. 229 – 234, 2011. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030438941100210>>. Acesso em: 27 jul.2017.

¹⁶ SCHULZ, C. K.; SANTOS, M. S.; KOETZ, P. R.; VSCHORNCK, F. Tratamento de efluentes da indústria de arroz parboilizado em reatores EGSB. **Revista Brasileira de Agrociência**. v. 7, p. 68 – 72, 2001. Disponível em: <<https://periodicos.ufpel.edu.br/ojs2/index.php/CAST/article/download/356/350>>. Acesso em: 27 jul.2017

¹⁷ LIU, J. Y.; BIAN, H. D. B.; CAO, Y. L. ZHONG, J. P.; HU, J.; LIU, Q.; QIAN, G. R.; LIU, F. TAI, J. Quick start-up of EGSB reactor treating fresh leachate of municipal solid waste. **Journal of Shanghai University** (English Edition). v. 15, n. 3, p. 212-217, 2011. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s11741-011-0723-3>>. Acesso em: 27 jul.2017.

¹⁸ INCE, B.; CETECIOGLU, Z.; CELIKKOL, S.; INCE, O. The microbial diversity, methane production, operational routine of an anaerobic reactor treating maize processing wastewater. **Water Practice and Technology**. v. 7, n. 2, 2012. Disponível em: < <http://wpt.iwaponline.com/content/7/2/wpt2012027>>. Acesso em: 27 jul.2017.

¹⁹ DELFORNO, T. P.; MOURA, A. G. L.; OKADA, D. Y.; VARESCHE, M. B. A. Effect of biomass adaptation to the degradation of anionic surfactants in laundry wastewater using EGSB reactors. **Bioresource Technology**, v. 154, p. 114–121, 2014. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852413018646>>. Acesso em: 27 jul.2017.

linhas gerais, o reator IC consiste de dois reatores UASB superpostos um sobre o outro, um alimentado com alta carga orgânica e o outro com uma carga menor.

As cinco as principais características do Reator Anaeróbio de Circulação Interna, de acordo com Sereno Filho et al. (2013, p. 5) são:

Zona de Mistura: No fundo do reator o efluente que chega para o tratamento é efetivamente misturado com o lodo anaeróbio e o efluente da corrente de recirculação. Isto resulta numa diluição e condicionamento do efluente de entrada, minimizando os riscos de toxicidade e choques de carga orgânica e pH.

Zona de Leito Expandido: Contém um leito de lodo anaeróbio granulado expandido altamente concentrado. A expansão/fluidização do leito é efetuada pela elevada vazão ascensional de efluente, recirculação e biogás produzido. O efetivo contato entre o efluente e os microrganismos resulta em uma alta atividade do lodo, que possibilita a aplicação de elevados carregamentos orgânicos com boa eficiência de conversão.

Zona de Polimento: O primeiro separador consegue remover a maior parte do biogás produzido na zona de leito expandido. Com isso, garante pouca turbulência na zona de polimento. A vazão de efluente que é recirculada internamente também ficará restrita ao compartimento inferior do reator, entrando na zona de polimento vazão idêntica a de entrada de efluentes no reator.

Sistema de Recirculação: A circulação interna é baseada no princípio do “gas-lift” e é controlada pela vazão de biogás produzida no reator (não é necessária a utilização de bomba). Portanto, a vazão de recirculação depende somente da DQO do efluente de entrada e seu controle é automático: quando maior a DQO, maior produção de biogás na zona de leito expandido, maior vazão de recirculação e também maior diluição do efluente de entrada após a mistura na zona de mistura.

Dentre as principais vantagens do reator IC, de acordo com a STAB (2014), pode-se destacar: conversão de 80% a 90% do efluente em biogás; geração de 1% a 2% de lodos; tempo de retenção hidráulica entre 2 e 3 horas; taxa de carregamento orgânico entre 20 a 30 kg DQO/m³.r.d; velocidade de ascensão entre 8 a 10 m/h; espaço ocupado reduzido; baixo consumo de eletricidade, baixo consumo de produtos químicos/nutrientes e problemas de corrosão; construção modular permitindo ampliações e menor sensibilidade a acidentes de processo. Essas características o tornam adequado para o tratamento dos efluentes produzidos por indústrias de açúcar e etanol, alimentos, cervejarias, refrigerantes, papel e celulose.

3.2.2.1.5 Biodigestor de Leito Fixo ou Filtro Anaeróbio

De acordo com Abreu e Zaiat (2008), os estudos sobre os reatores anaeróbios de leito fixo ou de filtro anaeróbio, iniciaram-se com a publicação de Young e Mccarty do artigo “*The anaerobic filter for waste treatment*”, na revista científica *Journal WPCF*, em 1969. A configuração de um reator anaeróbio de leito fixo inclui: tanque contendo material para aderência e imobilização da biomassa, conseqüentemente, formando o leito fixo. Aonde, líquido penetra pela base, flui a partir de uma camada filtrante e é descarregado na parte superior. No caso do fluxo descendente, o líquido percorre o sentido inverso.

Para a estabilização da matéria orgânica, as águas residuárias passam por uma massa de sólidos biologicamente ativos contidos no interior do reator, havendo então a conversão da matéria orgânica em metano e gás carbônico (SOARES, 2015).

Dentre as principais vantagens do reator anaeróbio de leito fixo estão: elevado período de retenção celular, mesmo com aplicação de elevadas cargas hidráulicas; curtos períodos de detenção hidráulica; elevado grau de estabilização do lodo, baixo custo de implantação, operação e manutenção e simplicidade operacional (LIMA, 2006).

Porém, os reatores anaeróbios de leito fixo também apresentam determinados pontos negativos, os quais são destacados: o alto volume, entupimento do reator pelo aumento na espessura do biofilme e a alta concentração de sólidos suspensos no efluente (SOARES, 2015).

Para Ávila (2005), os reatores anaeróbios de leito fixo são adequados para o tratamento de efluentes com materiais dissolvidos aonde propiciam menores riscos de entupimento do meio suporte. Em algumas indústrias, tais como de laticínios, cítricos, curtumes, matadouros, frigoríficos, lavagem de garrafas, alimentícia, sucroenergetica, chorume, indústria têxtil, cervejarias, petroquímica, coqueria, química e farmacêutica, tais reatores têm sido utilizados como unidade de tratamento de seus respectivos efluentes.

A tabela 4 apresenta os resultados da utilização de reatores anaeróbios de leito fixo para diversos tipos de efluentes.

Tabela 4 – Eficiência do reator de leito fixo para tratamento de determinadas águas residuárias

| Tipo de efluente | Tipo de meio suporte | Concentração efluente (mg/l) | | Tempo Detenção Hidráulica (h) | Eficiência de remoção (%) | | Fonte |
|------------------|----------------------|------------------------------|------|-------------------------------|---------------------------|---------|--------------------------------------------------------|
| | | DQO | DBO | | DQO | DBO | |
| Doméstico | Brita | 534 | - | 8 – 24 | 59 | - | Carvalho ²⁰ (1994, apud Pinto, 1995) |
| Glicose | Pedregulho | 1500 | 3000 | 4 – 72 | 37 – 92 | 63 – 93 | Young e McCarty ²¹ (1969, apud Pinto, 1995) |

Fonte: Pinto (1995).

²⁰ CARVALHO, E.H. **Filtros biológicos anaeróbios: conceitos básicos, projeto e desenvolvimento**. 1994. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade Paulo, 1994.

²¹ YOUNG, J.C.; McCARTY, P.L. The anaerobic filter for waste treatment. **Journal Water Pollution Control Federation**, v. 41, n. 5, 1969, p. 160-173.

Tabela 4 – Eficiência do reator de leito fixo para tratamento de determinadas águas residuárias

| Tipo de efluente | Tipo de meio suporte | Concentração efluente (mg/l) | | Tempo Detenção Hidráulica (h) | Eficiência de remoção (%) | | Fonte |
|-------------------------|------------------------------|------------------------------|------|-------------------------------|---------------------------|------|------------------------------------------------------------|
| | | DQO | DBO | | DQO | DBO | |
| Farmacêutico | ND | - | 2000 | 36 | - | 94 | Jennet e Dennis ²² (1974, apud Pinto 1995) |
| Cervejaria | ND | 6000-24000 | - | 15 – 330 | 90 | - | Pinto (1995) |
| Processamento de peixe | ND | 466 | 407 | 74 – 38 | 80,7 | 74,9 | Pinto (1995) |
| Processamento de batata | Pedregulho | 1358-2341 | - | 24 | 70 – 92 | - | Pinto (1995) |
| Conserva alimentícia | ND | 61-641 | - | 16 – 24 | 80 | - | Paula Jr. ²³ (1985, apud Pinto 1995) |
| Processamento trigo | ND | - | 8800 | 22 | - | 64 | Pinto (1995) |
| Chorume | Pedregulho | 13780 | - | 12 – 96 | 60 – 95 | - | Pinto (1995) |
| Laticínio | Cilindro de fibras poliéster | 56000 | - | 24 – 240 | 88 – 95 | - | Cánovaz Diaz et al. ²⁴ (1988, apud Pinto, 1995) |
| Vinhaça | Anéis cerâmicos | 10000- 50000 | - | 48 – 120 | 57 – 79 | - | Carrondo et al. ²⁵ (1983, apud Pinto 1995) |
| Curtume | Pedregulho | 330-5600 | - | 72 | 80 | - | Arora et al. ²⁶ (1975, apud Pinto 1995) |

Fonte: Pinto (1995).

²² JENNETT, C.J.; DENNIS, N.D.Jr. Anaerobic filter treatment

of pharmaceutical waste. **Journal Water Pollution Control Federation**, v. 47, n. 1, 1975, p. 104-121.

²³ PAULA Jr., D.R.; FORESTI, E., CAMPOS, J.R. Avaliação de diferentes tipos de reatores anaeróbios para tratamento de águas residuárias de indústria de conservas alimentícias. In: III TALLER Y SEMINARIO LATINO AMERICANO “TRATAMIENTO ANAEROBIO DE AGUAS RESIDUALES”, Montevideu, 1994. **Anais...** Montevideu: TSLA, 1994.

²⁴ CAÑOVAS-DÍAZ, M.; HOWELL, J.A. Downflow fixed-film anaerobic reactors stability studies under organic and hydraulic overloading at different working. **Water Research**, v. 22, n. 5, 1988, p. 529-536.

²⁵ CARRONDO, M.J.T. et al. Anaerobic filter treatment of molasses fermentation waste water. 1983. In: HENZE, M. (ed) *Anaerobic Treatment of Waste water in Fixed Film Reactors*. Oxford; Pergamon Press. p. 117-126.

²⁶ ARORA, H.C.; CHATTOPADHYA, S.N.; ROUTH, T. Treatment of vegetable tanning effluent by the anaerobic contact filter process. **Journal of the Institute of Water Pollution Control**, v. 74, n. 5, 1995, p. 584-596.

3.2.2.1.6 Biodigestor de Leito Expandido

No Reator Anaeróbio de Leito Expandido, os microrganismos encontram-se aderidos a um suporte expandido. O material empregado como suporte deve possuir uma área superficial necessária para adesão dos microrganismos e manter boas características de sedimentação para assegurar a retenção da biomassa no reator (SALOMON, 2007).

De acordo com Pinto (1995), o reator de leito expandido possui estrutura cilíndrica e recebe o despejo a ser tratado pela parte inferior juntamente com parte do efluente. As elevadas taxas hidráulicas aplicadas proporcionam a expansão do meio suporte contendo a biomassa aderida que pode ser constituído de areia, cascalho, PVC e resinas, com diâmetros de 0,3 a 3,0 mm. De acordo com Baldacin e Pinto (2015, p. 10):

O biofilme cresce aderido nas partículas, que devido à velocidade ascensional provocam a expansão das mesmas, podendo expandir ainda mais de acordo com o aumento da recirculação empregada no processo. A expansão é mantida em um nível aonde cada partícula conserve sua posição em relação às outras partículas ali presentes; mantendo de 10 a 20% de expansão em relação ao leito.

Dentre as vantagens do biodigestor de leito fluidizado, de acordo com Granato (2003), pode-se citar: a difusão do substrato no reator, a eliminação de entupimentos, o aumento de contato da biomassa com o substrato, a eficiência quando tratados os esgotos de concentrações muito baixas, baixo tempos de detenção hidráulica e remoção de DQO em torno de 60 a 70%.

3.2.2.1.7 Biodigestor de Leito Fluidizado

O reator anaeróbio de leito fluidizado é utilizado para o tratamento de efluentes, o mesmo foi desenvolvido na década de 70 com o objetivo de otimizar a retenção da biomassa e acabar com os problemas de colmatção, dado o acúmulo de materiais sólidos no material suporte nesses biodigestores (WEBBER, 2006).

De acordo com Rosa e Monteggia (2002), esses biodigestores são sistemas de tratamento que utilizam fluidização com o propósito de prover a transferência entre a água residuária e os microrganismos que atuarão na degradação do efluente. Logo, faz-se necessária uma alta velocidade de escoamento do efluente no leito, a qual ocorre a partir da recirculação. Dada as elevadas taxas de recirculação, os biodigestores de leito fluidizado operam em regime de mistura completa, promovendo condições de transferência de massa e cobertura de concentrações.

Segundo Webber (2006), no reator anaeróbio de leito fluidizado existem duas regiões distintas: a região de reação, aonde ocorre a degradação da matéria orgânica, a formação do

biofilme e a produção de biogás e a região de sedimentação, responsável pela separação das biopartículas e pela decantação dos efluentes.

Além dessas regiões, o sistema de separação e coleta do biogás produzido é um dispositivo que elimina a turbulência, provocada pelas bolhas de gás, possibilitando a sedimentação no decantador, região de sedimentação (FRANÇA, 2006).

Ainda de acordo com França (2006), pode-se citar as seguintes vantagens do reator anaeróbio de leito fluidizado: impede o acúmulo de biomassa e facilita a subtração e adição de material ativo; a velocidade de fluidização permite o controle da espessura do biofilme; retenção de alta concentração de biomassa, conseqüentemente, aumentando o contato entre as bactérias e o substrato do efluente; diminuição do tempo de retenção hidráulica; menor tamanho de reator; eliminação do leito entupido; baixa perda hidráulica principal; circulação hidráulica otimizada; maior área superficial por unidade de volume do biodigestor; menor custo de operação e manutenção e a capacidade de degradação de DQO entre 30 a 60 kgDQO/m³/dia, com eficiência entre 80% a 87%.

Além disso, esse biodigestor tem sido avaliado também para o uso na produção enzimática de hidrogênio, degradação de subprodutos líquidos da destilação do carvão e petróleo, tratamento de águas residuárias com fenol, produção de penicilina e na hidrólise da celulose. Porém, as desvantagens deste sistema são: energia utilizada para produzir a expansão do leito; os problemas hidráulicos relacionados com a manutenção da vazão e a fina camada biológica formada sobre o suporte (MALAJOVICH, 2016).

Em suma, o reator anaeróbio de leito fluidificado possui funcionamento praticamente igual ao reator anaeróbio de leito expandido, sendo que a única diferença é o tamanho das partículas do meio suporte que é menor no leito fluidificado e as suas taxas de expansão.

3.3 Biogás

O biogás, para Deganutti et al. (2002), é um produto resultante da fermentação, na ausência de oxigênio, de dejetos animais, subprodutos vegetais, lixo orgânico industrial, agrícola e residencial em condições adequadas de umidade. A reação desta natureza é denominada biodigestão anaeróbia. O biogás é especialmente relevante no contexto brasileiro, dados a importância e o tamanho do setor agrícola e pecuário na economia do país, aonde biogás poderia ser gerado a partir de subprodutos agropecuários.

De acordo com Castañon (2002), atribui-se o nome de biogás à mistura gasosa resultante da fermentação anaeróbia da matéria orgânica. A formação do biogás é comum na natureza. Assim, ele pode ser encontrado em pântanos, lamas escuras, locais aonde o material

orgânico sofre naturalmente decomposição. A mistura é essencialmente constituída por metano (CH_4) e por dióxido de carbono (CO_2), encontrando-se, ainda em menores proporções, ácido sulfídrico (H_2S) e nitrogênio (N_2). Sua composição aproximada é mostrada na tabela 5.

Tabela 5 – Composição média do biogás de diferentes subprodutos orgânicos

| Gás | Porcentagem (%) |
|-------------------------------------------|-----------------|
| Metano (CH_4) | 40-75 |
| Dióxido de carbono (CO_2) | 25-40 |
| Nitrogênio (N_2) | 0,5-2,5 |
| Oxigênio (O_2) | 0,1-1 |
| Ácido sulfídrico (H_2S) | 0,1-0,5 |
| Amônia (NH_3) | 0,1-0,5 |
| Monóxido de carbono (CO) | 0-0,1 |
| Hidrogênio (H_2) | 1-3 |

Fonte: Castañon (2002).

A pureza do biogás, de acordo com Rego e Hernandez (2006), é avaliada pela presença do metano. Quanto maior o percentual de metano, mais puro é considerado o biogás, logo, seu poder calorífico está diretamente relacionado com a quantidade de metano existente na mistura gasosa. O metano é um gás incolor, altamente combustível, queima com chama azul lilás, sem deixar fuligem e com um mínimo de poluição.

Para Deganutti et al. (2002), em função da porcentagem com que o metano participa na composição do biogás, o poder calorífico inferior (PCI), pode variar de 5.000 a 7.000 kcal por metro cúbico. Esse PCI pode chegar a 12.000 kcal por metro cúbico, uma vez eliminado todo o gás carbônico da mistura. Nesse sentido, a equivalência energética do biogás em relação a outros combustíveis é determinada levando em conta o poder calorífico e a eficiência média de combustão. A Tabela 6 mostra essa relação segundo quatro fontes consultadas a partir da relação comparativa de equivalência de 1 metro cúbico de biogás com outros energéticos usuais.

Tabela 6 – Equivalência entre um m^3 de biometano e outros energéticos

| Energético | Nogueira (1986) | Motta (1986) | Ferraz e Marriel (1980) | Moraes et al. (2014) |
|-----------------|--------------------|-----------------|----------------------------|-------------------------|
| Gasolina (L) | 0,61 | 0,70 | 0,61 | 0,61 |
| Querosene (L) | 0,62 | - | 0,58 | - |
| Óleo Diesel (L) | 0,55 | - | 0,55 | 0,55 |
| GLP (L) | 1,43 | 0,40 | 0,45 | - |
| Etanol (L) | 0,80 | - | - | 0,79 |

Fonte: Adaptado de Oliveira (2009) e Moares et al. (2014).

Tabela 6 – Equivalência entre um m³ de biometano e outros energéticos

| Energético | Nogueira (1986) | Motta (1986) | Ferraz e Marriel (1980) | Moraes et al. (2014) |
|---------------------|----------------------------|-------------------------|------------------------------------|---------------------------------|
| Carvão Mineral (kg) | 0,74 | - | - | - |
| Lenha (kg) | 3,5 | - | - | - |
| Eletricidade (kWh) | - | 1,25 | 1,43 | - |

Fonte: Adaptado de Oliveira (2009) e Moares et al. (2014).

Para poder ser inserido em um gasoduto comercial, o biogás deve chegar a um nível de purificação de pelo menos 97% de metano (VENEZIA, 2014).

Ainda de acordo com Venezia (2014), se o biogás for purificado até esse padrão, será possível injetar o gás na rede comercial de gasodutos para consumo. Além disso, existem outras opções. Muitas cidades purificam o biogás dos seus aterros até a qualidade de gás natural veicular (GNV), que exige um nível de purificação semelhante ao nível exigido para injeção em gasodutos para fornecer combustível renovável às suas frotas de veículos municipais. O processo de purificação é necessário devido a presença no biogás de substâncias não combustíveis como água e dióxido de carbono (CO₂) que prejudicam a queima do metano (CH₄), fazendo com que o biogás seja menos eficiente. Além disso, a presença de ácido sulfídrico (H₂S), provoca corrosão precoce dos equipamentos, como os compressores, motores em geral, turbinas e em tanques de armazenamento, portanto, o H₂S deve ser removido.

Logo, para Salomon (2007), as principais práticas para separação das impurezas do biogás são: absorção física e química, adsorção em uma superfície contínua, separação por membranas, separação criogênica e separação a partir de conversão química, remoção de H₂S. O ácido sulfídrico poderá ser removido a partir do processo seco de oxidação e processos de oxidação em fase líquida.

Para Costa (2006), existem alternativas de purificação do biogás, definidas de acordo com a sua pretensão. Para a aplicação em veículos automotivos, são necessárias três etapas de purificação:

1. Biogás passa por um filtro de óxido de ferro (Fe₂O₃), responsável pela retirada do ácido sulfídrico (H₂S);
2. Na ausência do H₂S, o biogás é enviado ao compressor de baixa pressão para forçar a passagem do biogás a partir de uma torre de absorção de CO₂. Nesta torre, a água pressurizada é pulverizada em pequenas gotículas para facilitar a absorção do CO₂.

Este processo resultará na dissolução do CO₂, formando o ácido carbônico (H₂CO₃), que é enviado para a caixa de eliminação, aonde o CO₂ é liberado para a atmosfera;

3. A água é recalçada para a torre de absorção e o metano purificado é submetido ao processo de armazenamento.

Para o uso em caldeiras e turbinas, de acordo com Salomon (2007), é necessário reduzir o nível de umidade a partir de purgadores e linhas de condensação. Isso é feito para que o ácido sulfídrico, contido no biogás, não corroa a caldeira e a turbina.

Dado a importância do biogás nas dimensões econômica, ambiental e social da sustentabilidade, o governo do Estado de São Paulo (2012) instituiu, a partir do Decreto Lei Nº 58.659 de 4 de dezembro de 2012, o Programa Paulista de Incentivo ao Biogás, considerando a participação de energias renováveis em matriz energética, ampliação de alternativas de geração de energias renováveis, a produção e consumo de biogás produzido a partir da biomassa, o potencial de geração de biogás proveniente do setor sucroenergético e a mesma como um vetor de desenvolvimento regional.

Em seu artigo segundo, a Lei tem os seguintes objetivos:

- I – incentivar e ampliar a participação de energias renováveis na matriz energética do Estado de São Paulo, a partir das externalidades positivas da geração de gases combustíveis provenientes de biomassa;
- II – estabelecer a adição de um percentual mínimo de Biometano ao gás canalizado comercializado no Estado de São Paulo. § 1º - O gás proveniente de biomassa será denominado Biometano, quando sua composição for compatível com a Resolução da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP nº 16, de 17 de junho de 2008. § 2º - O gás Biometano poderá ser misturado com o gás canalizado comercializado no Estado de São Paulo, atendidas as disposições do § 1º deste artigo. § 3º - O percentual de que trata o inciso II deste artigo e sua eventual progressividade, deverão ser validados pelo Conselho Estadual de Política Energética – CEPE, criado pela Lei nº 11.248, de 4 de novembro de 2002, observado parecer favorável do órgão técnico competente, bem como o estabelecido no § 1º deste artigo (SÃO PAULO, 2012, p. 2).

O estado do Rio de Janeiro (2012), concomitantemente a São Paulo, criou políticas de incentivo ao biogás a partir da Lei Nº 6.361, de 18 de dezembro de 2012. A Política Estadual de Gás Natural Renovável do Rio de Janeiro se apoia nas seguintes premissas:

- I – Aumento da participação do biocombustível biogás na matriz energética estadual; II – redução da produção dos gases de efeito estufa no Estado do Rio de Janeiro; III – disposição final adequada de subprodutos orgânicos; IV – valoração econômica dos subprodutos orgânicos; e V – descentralização e interiorização da economia (RIO DE JANEIRO, 2012, p. 1).

Para execução dos pressupostos supracitados, o artigo Art. 1º, da presente lei visa“ incentivar a produção e o consumo de Gás Natural Renovável – GNR, assim entendido o gás resultante do processo de purificação do biogás, oriundo de biodigestão anaeróbia de

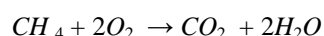
subprodutos orgânicos” (RIO DE JANEIRO, 2012, p. 1), para tanto, o mesmo será captado em aterros sanitários, aterros controlados, estações de tratamento de esgoto, determinados resíduos industriais e agrícolas, dentre eles o bagaço, palha e a vinhaça.

Especificamente no que se refere a vinhaça biodigerida e o biogás, de acordo com Nogueira et al. (2015), na indústria sucroenergética, as opções para o aproveitamento são:

- **Uso em caldeira para geração de vapor e acionamento da moagem da cana:** A queima do biogás na caldeira, gera vapor para processo de esmagamento da cana-de-açúcar, aonde o excedente do bagaço utilizado nesse processo, também poderia ser utilizado para produção de energia elétrica;
- **Substituição de combustíveis:** A gasolina, Diesel e etanol podem ser substituídos pelo biogás purificado utilizado em veículos e máquinas agroindustriais durante o período da safra;
- **Acionamento de máquinas térmicas:** motor ciclo de Otto ou ciclo de Rankine conjugado a um gerador elétrico para produção de eletricidade, produz 2,5 vezes das necessidades totais de eletricidade para uma destilaria autônoma.

Quanto à sua aplicação para produção de energia elétrica, seu potencial energético, é dado segundo Van Haadel²⁷ (2003, apud REGO; HERNANDES, 2006),

[...] Para quantificá-lo deve-se avaliar a quantidade de material orgânico, expressa em massa de DQO (demanda química de oxigênio) presente. VAN HANDEL encontrou aproximadamente 500kg de DQO por m³ de álcool produzido, independente das proporções entre a vazão de álcool e a vazão de vinhaça. Pelo processo de digestão anaeróbia da vinhaça há uma conversão deste material orgânico em gases metano e dióxido de carbono que, juntos, formam o biogás:



(16 g) (64 g)

Pela equação acima, estequiometricamente a cada 16 gramas de metano tem-se 64 gramas de oxigênio. Adotando-se uma eficiência de remoção do material orgânico de 80%, que tem sido alcançada com segurança, a cada m³ de álcool há uma remoção de 400kg DQO, o que equivale a uma produção de 100 kg de CH₄ (4:1). Considerando-se que o poder calorífico inferior (PCI) do metano é de 12.000 kcal/kg, 1kg de CH₄ é equivalente a 50.400 kJ (kWs) ou 14 kWh. Para os 100 kg de metano considerados na produção de 1m³ de álcool, o potencial energético é de 1.400 kWh/ m³ de álcool. Entretanto, supondo-se que a eficiência de um grupo gerador ciclo Otto, que irá queimar este biogás, é de 35%, no máximo, tem-se uma relação de 490 kWh por m³ de álcool (1.400 kWh * 35%).

Logo, dado o substancial volume de produção de vinhaça, sua elevada capacidade poluidora, sua utilização para a produção de energia elétrica com contribuição para o desenvolvimento econômico e social do país, as usinas podem gerar e suprir a própria

²⁷ VAN HAANDEL, A. **Valorização de subprodutos gerados nas destilarias de álcool.** 2003.

demanda energética (térmica e elétrica) e ao mesmo tempo produzir excessos que poderiam ser repassados às concessionárias.

Porém, os investimentos em rede de transmissão de energia elétrica, de acordo com Castro e Dantas (2008), cabem às usinas produtoras aonde, dependendo da sua localização e da rede de transmissão, representam uma barreira de entrada substancial nesse mercado, além disso, soma-se à descapitalização, às dívidas das usinas e ao aumento das taxas de juros no Brasil dificultando o acesso a crédito para investimento.

3.4 Máquinas térmicas

Máquinas térmicas são dispositivos que extraem energia do ambiente na forma de calor e realizam o trabalho útil, Os motores de combustão interna representam a tecnologia mais difundida dentre as máquinas térmicas devido a sua simplicidade, robustez e alta relação potência/peso, o que faz com que estes acionadores sejam empregados em larga escala como elementos de propulsão para geração de eletricidade contínua, back-up ou de carga de pico e para acionamento de bombas, compressores ou qualquer outro tipo de carga estacionária (SUZUKI ET AL., 2011).

Dentre as principais máquinas térmicas que podem fazer uso do biogás ou biometano para geração de eletricidade, pode-se destacar os motores ciclo Otto e ciclo Diesel.

3.4.1 Motor Otto

No século XIX, o engenheiro alemão Nikolaus Otto desenvolveu um motor de quatro tempos termodinamicamente fechado e, por isso, é considerado o pai dos motores a combustão interna por ignição de centelha (MELLO, 2009). Para Carvalho (2011), o rendimento real desse motor está próximo de 21% a 25%. No total, a perda de energia gira em torno de 75% a 80%. Este motor pode trabalhar com combustíveis gasosos e líquidos, junto com a admissão de ar na câmara de combustão.

De acordo com Gehring (2014), os motores do ciclo Otto funcionam em quatro etapas descritas a seguir.

- 1º. Fase:** A mistura de ar atmosférico e combustível é admitida na câmara de combustão. O cilindro está cheio da mistura inflamável e neste momento a válvula de admissão está vedada, criando um ambiente hermético;
- 2º. Fase:** O pistão se movimenta para comprimir a mistura interna do cilindro, ao atingir o final do percurso, o pistão terá comprimido a mistura combustível;
- 3º. Fase :** Os sistemas de ignição produzem uma centelha a partir da vela de ignição do

cilindro, como resultante da fonte de calor, a mistura inflamável sofre combustão liberando energia transmitida ao pistão e as suas partes integrantes. Nessa etapa, a energia do combustível é liberada, transformando-se em energia mecânica;

- 4º. Fase:** Abertura da válvula de escape a partir do qual os gases são expulsos pelo pistão, fazendo com que o produto da queima da mistura ar-combustível seja expelido do cilindro para a atmosfera.

3.4.2 Motor Diesel

Os motores ciclo Diesel foram desenvolvidos por Rudolf Diesel, na Alemanha, entre de 1893 a 1898. Para Conde (2007), este motor de combustão interna apresenta maior potência e menor custo operacional se comparado com os motores ciclo Otto, pois os motores Diesel são normalmente utilizados para cargas que requerem grande força e apresentam longa vida útil. Os motores do ciclo Diesel utilizam o aumento da temperatura devido à compressão de uma massa de ar para dar início à reação de combustão. Somente ar é admitido, aonde, após a compressão, o combustível é pulverizado na massa de ar quente dando início a combustão.

Os motores do ciclo Diesel, de acordo com Varella e Santos (2010), de quatro tempos apresentam as seguintes etapas:

- 1º. Fase:** Durante a entrada, a válvula de admissão está aberta e a válvula de descarga está fechada e, à medida que o pistão desce, o ar entra;
- 2º. Fase:** As válvulas de admissão e descarga estão fechadas. A compressão do ar na câmara produz elevação da temperatura, aonde o combustível é injetado na câmara de combustão. Após a injeção, o combustível se inflama, iniciando-se a combustão;
- 3º. Fase:** As válvulas de admissão e descarga estão fechadas, com a explosão, o pistão é acionado pela força de expansão dos gases, transformando a energia térmica em mecânica, promovendo o movimento de rotação do motor;
- 4º. Fase:** A válvula de admissão está fechada e a de descarga está aberta. O movimento ascendente do pistão expulsa do cilindro os subprodutos da combustão a partir da válvula de descarga para a atmosfera.

Exposto sucintamente as principais características dos motores ciclo Otto e ciclo Diesel, Gehring (2014), compara as principais características desses dois tipos de motores de combustão interna, sumarizado no quadro 7.

Quadro 7 – Características dos ciclos de combustão Otto e Diesel

| Variável | Otto | Diesel |
|-----------------------------------|--------------------|------------------------|
| Tempo de formação da mistura | Antes da combustão | Simultânea à combustão |
| Volatilidade do combustível | Alta | Baixa |
| Temperatura dos gases de descarga | 800° C | 600° C |
| Custo de fabricação | Baixo | Alto |
| Rendimento térmico | Menor | Maior |
| Ignição | Centelha elétrica | Compressão |

Fonte: Gehring (2014).

Para conversão em eletricidade nos motores de combustão interna, seja ciclo Otto ou ciclo Diesel, são utilizados geradores para a conversão. De acordo com Gehring (2014), são utilizados geradores assíncronos.

Comparando ambos os motores de combustão interna, podem ser comparadas as características técnicas como: potência elétrica, eficiência elétrica e vida útil para maior fundamentação na tomada de decisão, como pode ser constatado na tabela 7.

Tabela 7 – Comparação entre grupos geradores a ciclos Otto e Diesel

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

Fonte: Gehring (2014).

As principais vantagens desses sistemas, de acordo com Gehring (2014) são: (a) utilização para pequenas e médias demandas elétricas, de centenas de kW até dezenas de MW; (b) utilização de diversos tipos de combustíveis líquidos ou gasosos; (c) a relação energia térmica/energia mecânica é menor que os outros acionadores; (d) a eficiência dos motores de combustão interna não é tão sensível às condições ambiente locais; (e) as instalações são modulares e flexíveis; (f) tempo de construção é curto e rápida entrada em operação e (g) possui alta relação potência/peso.

3.4.3 Motor Stirling

Para Bosso (2013), os motores Stirling são motores de combustão externa, cujo nome possui origem no pastor Robert Stirling quem o aperfeiçoou o referido motor.

O motor Stirling é formado por duas câmaras aonde o gás é mantido fechado. A combustão externa aquece o gás no interior do motor, o que o leva a expandir. Esta expansão do gás movimentada o pistão ligado ao eixo, produzindo movimento mecânico. Em razão de possuir fonte externa de calor, este motor aceita qualquer fonte de gás ou líquido combustível (GEHRING, 2014).

Os motores Stirling, para Cruz (2012), funcionam em 4 fases descritas a seguir.

- 1º. Fase:** Ocorre a compressão à temperatura constante, conseqüentemente, diminuindo o volume no qual é realizado trabalho sob o gás. Estando o gás, a uma pressão inferior, o pistão vai ser empurrado pelo ar exterior sofrendo trabalho enquanto dissipa calor para exterior;
- 2º. Fase:** Ocorre o aquecimento do gás a volume constante, aumentando assim a temperatura. O êmbolo deslocador transfere o gás que se encontra no polo frio para o polo quente. Sendo o gás aquecido pela fonte de calor, a pressão deste aumenta sem que haja, no entanto, variação no volume durante o aumento de pressão;
- 3º. Fase:** Ocorre a expansão do volume à temperatura constante, conseqüentemente, no qual o gás realiza trabalho. Devido à pressão acrescida ao gás, este vai empurrar o pistão realizando, assim, trabalho para o exterior, enquanto absorve calor da fonte quente;
- 4º. Fase:** Com o arrefecimento do gás a volume constante, aumenta, assim, a temperatura. O êmbolo deslocador transfere agora o gás que se encontra no polo quente para o polo frio. Visto que o gás é agora arrefecido pelo sistema, a pressão diminui sem a variação no volume durante a diminuição da pressão.

Dentre as vantagens dos motores Stirling, de acordo com Heidrich (2002), pode-se citar: (a) eficiência global na faixa dos 30 %; (b) baixo nível de ruído; (c) utilização de variedade de combustíveis; (d) possibilidade de cogeração; (e) vida útil em torno de 25.000 horas; (f) baixa poluição, pois opera com combustão contínua; (g) dispensa pré-tratamento do biogás e (h) baixo custo de manutenção.

Porém, as principais desvantagens, ainda de acordo com Heidrich (2002), pode-se destacar: (a) motores de pequenas potências; (b) baixa potência (<100 kVA); (c) lenta variação às cargas e (d) pouco presente no mercado.

3.4.4 Turbinas a gás

As turbinas a gás são motores térmicos compostos por compressor, caixa de combustão e turbina que aproveitam a energia liberada na combustão, armazenada nos gases

de exaustão que se expandem sobre as pás móveis de um rotor, transformando energia química em energia mecânica. Aonde os combustíveis, aceitos pelas turbinas, são geralmente gás natural, propano, querosene e o biogás (BOHÓRQUEZ, 2007).

No que se refere a sua operacionalização, Viana et al. (2012) afirmam que o ar atmosférico penetra no compressor, o qual comprime o ar na câmara de combustão, aonde o gás combustível é injetado de maneira contínua, formando uma mistura de gases em alta pressão explosiva. A queima do gás, à pressão constante, eleva a temperatura da câmara e provoca a expansão do gás que, por sua vez, movimentam as turbinas. A energia mecânica gerada nas turbinas pode ser transformada em eletricidade quando há um gerador em anexo.

De acordo com Gehring (2014), os rendimentos das turbinas a gás são de aproximadamente 35%, porém, como os gases liberado pelas turbinas apresentam alta temperatura, também podem ser reaproveitados em cogeração, aonde a eficiência energética pode chegar a 80%.

O ciclo teórico de funcionamento da turbina a gás, de acordo com Repinaldo (2013), é o ciclo à pressão constante denominado ciclo Brayton como pode ser observado a seguir:

- 1º. Fase:** O ar ingressa no compressor à pressão atmosférica e é comprimido sem troca de calor com o meio;
- 2º. Fase:** Inicia-se a combustão à pressão constante, com introdução de energia térmica que gera um aumento de volume do fluido;
- 3º. Fase:** A expansão é adiabática e ocorre pelos condutos da turbina;
- 4º. Fase:** Os gases de exaustão são provisoriamente resfriados a uma pressão constante, retornando ao estado inicial do ciclo.

De acordo com Repinaldo (2013), as vantagens da turbina a gás são: (a) compactas; (b) adequadas para sistemas de transportes como aviões, navios e até mesmo transporte terrestre; (c) partida e parada mais rápidas; (d) tempo de resposta baixo; (e) equipe de operação e manutenção reduzida; (f) consome menos matéria prima na fabricação; (g) menor custo e (h) produz menos vibração;

No que se refere às desvantagens da turbina a gás, Repinaldo (2013), afirma: (a) menor potência específica; (b) menor eficiência; (c) menor vida útil; (d) mais sensível à qualidade do combustível; (e) muitos componentes sob alta tensão mecânica; (f) ruído de alta frequência; (g) necessidade de grande quantidade de ar; (h) produção de grande quantidade de gases quentes e (i) não pode ser consertado na planta.

3.4.5 Turbina a vapor

Em 1883, o engenheiro sueco Carl Gustav de Laval construiu a primeira turbina a vapor, uma roda de pás impulsionada por um jato de vapor. Posteriormente, Charles A. Parson, em 1884, apresentou um novo modelo no qual o vapor era introduzido no centro do corpo da turbina e se distribuía em dois fluxos opostos com uma melhor distribuição nas quedas de pressão e reduzindo a necessidade de altas velocidades de rotação da turbina de reação (MORAIS, 2007).

Em 1896, Charles G. Curtis, em colaboração com William Leroy e a General Electric Company, desenvolveu vários modelos de turbinas para aperfeiçoar alguns problemas mecânicos e técnicos. Entre esses projetos, destacou-se a turbina de ação de duas etapas que deu origem ao que hoje se conhece como estágio de regulação em diversas turbinas a vapor. Ljunström, em 1910, desenvolveu a turbina de ação radial de duplo fluxo, o que também inspirou o projeto dos pré-aquecedores de ar. A partir dessa época até hoje, a turbina a vapor se converteu em um dos principais equipamentos de centrais térmicas e hidráulicas (MORAIS, 2007).

As turbinas a vapor são motores de combustão externa, em outras palavras, utilizam a energia liberada pela combustão de um combustível dentro de uma caldeira para aquecer o fluido nas tubulações até que se transforme em vapor. O vapor em alta pressão e temperatura na caldeira movimentam as placas da turbina e, desta forma, a energia térmica é transformada em energia mecânica (HENRIQUES, 2004).

Estas máquinas térmicas são baseadas no ciclo de Rankine formado por quatro processos os quais, de acordo com Fernandes, Piso e Moraes Junior (2006), são descritos a seguir:

- 1º **Fase:** O fluido pressurizado entra numa caldeira, ele é aquecido à pressão constante até se tornar vapor superaquecido;
- 2º **Fase:** O vapor superaquecido se expande a partir de uma turbina para gerar trabalho. Com esta expansão, tanto a pressão quanto a temperatura se reduzem;
- 3º **Fase:** O vapor, então, entra num condensador aonde é resfriado, idealmente, à pressão constante até a condição de líquido saturado. Este líquido, portanto, retorna à bomba e o ciclo se repete;
- 4º **Fase:** O fluido é bombeado idealmente sem troca de calor com o meio de uma pressão baixa para uma pressão alta a partir de uma bomba. O bombeamento requer algum tipo de energia para se realizar.

Para Correia Neto (2001), as turbinas a vapor são amplamente utilizadas em usinas de cogeração e na geração de energia elétrica e possuem sua maior aplicação em usinas termoelétricas convencionais ou nucleares. A eficiência elétrica da Turbina a Vapor é de aproximadamente 35%, quando combinada com a cogeração este índice sobe para até 85%. Nesse sentido, as principais vantagens das turbinas a vapor, de acordo com Gehring (2014) e Correia Neto (2001), são: (a) utilização de vapor a alta pressão e alta temperatura; (b) alta eficiência; (c) alta relação potência/tamanho; (d) operação suave, quase sem vibração; (e) não há necessidade de lubrificação interna; (f) vapor na saída sem óleo e (g) por se tratar de um motor de combustão externa, pode ser utilizado uma ampla variedade de combustíveis.

As desvantagens das turbinas a vapor, de acordo com Gehring (2014) e Correia Neto (2001), são: (a) necessário um sistema de engrenagens para baixas rotações; (b) turbina a vapor não pode ser feita reversível e (c) eficiência de turbinas a vapor simples é pobre.

3.4.6 Microturbinas

Para Rondina (2007), as microturbinas são sistemas reduzidos compostos por compressor, câmara de combustão, turbina e gerador elétrico com uma potência total não superior a 250 kW.

De acordo com França Junior (2008), as microturbinas funcionam com a admissão de ar por compressores até a câmara de combustão. Na câmara de combustão, o ar é misturado com o vapor do combustível. A combustão desta mistura produz gases em alta temperatura e pressão que movimentam as microturbinas e produzem energia mecânica. São estas turbinas, acopladas a geradores, que produzem eletricidade. As recuperações do calor dos gases exauridos pelas microturbinas são utilizadas para o pré-aquecimento do combustível, otimizando sua eficiência.

As microturbinas evoluíram das aplicações da turbina nas indústrias aeroespacial e automotiva para aplicações em geração distribuída, apresentando inovações tecnológicas como o uso de mancais a ar, de ligas metálicas e cerâmicas resistentes à altas temperaturas e de componentes eletrônicos de alta potência (RONDINA, 2007).

A eficiência das microturbinas na geração de eletricidade varia entre 30 a 33%, mas quando combinadas a cogeração pode atingir cerca 70%.

Como principais vantagens das microturbinas, de acordo com Carvalho et al. (2007), pode-se citar: (a) durabilidade; (b) baixas emissões de gases efeito estufa; (c) modularidade; (d) baixo custo de manutenção; (e) baixos níveis de ruído e de vibração; (f) flexibilidade de combustível e (g) alta eficiência na cogeração.

Como barreiras para sua popularização, ainda de acordo com Carvalho et al. (2007), pode-se citar: (a) alto custo; (b) eficiência com cargas parciais questionáveis; (c) experiência limitada com o uso dessa tecnologia; (d) ruídos de altas frequência e (e) alta vazão de combustível.

3.4.7 Comparação entre as tecnologias.

As tecnologias de conversão supracitadas nesse capítulo: motor Otto, motor Diesel, motor Stirling, turbinas a vapor, turbinas a gás e microturbinas possuem características técnicas próprias como potência, eficiência elétrica, eficiência de cogeração e emissões de óxidos de enxofre e nitrogênio, com respectivas vantagens e desvantagens para queima de biogás para obtenção de eletricidade e cogeração.

Nesse sentido, para a escolha de uma determinada tecnologia de conversão, caberá uma análise de viabilidade econômica e ambiental. Gehring (2014) sintetizou as características técnicas na tabela 8.

Tabela 8 – Comparação entre as diferentes tecnologias compatíveis com o biogás

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

Fonte: Gehring (2014).

3.5 Concentrador de vinhaça

Para Silva, Griebeler e Borges (2007), a concentração de vinhaça é uma tecnologia utilizada para reduzir a quantidade de água presente neste subproduto sem a perda do material sólido dissolvido, reduzindo o seu volume e, conseqüentemente, os custos com transporte e aplicação no processo de fertirrigação. A vinhaça concentrada de 50 até 60 Brix, ou seja, cada 100g de vinhaça concentrada apresenta 50 a 60 gramas de sólidos solúveis e o restante de água (40 – 50 gramas) pode ser empregada como: fertilizante, ração animal e cinzas que

também são usadas como fertilizante. Além disso, auxilia as usinas na redução de captação de água e sua reutilização nos sistemas produtivos industriais (SILVA, 2012).

De acordo com Gomes, Eça e Viotto (2011), em vários métodos são citados em literatura para a concentração vinhaça como: floculação, sedimentação e filtração, evaporação, bioconcentração, nano filtração, osmose inversa e microfiltração seguida de nano filtração. No entanto, os mais utilizados são: concentração por evaporação e a concentração por membranas de osmose reversa.

Para Carvalho e Silva (2010), no Brasil, os dois primeiros concentradores de vinhaça foram instaladas na Usina Tiúma em Pernambuco, em 1978. Todavia, incorreram problemas de incrustações e as paradas para limpeza dificultavam a operação. A outra unidade de concentrador de vinhaça foi instalada na Usina Santa Elisa, no estado de São Paulo, também em 1978, porém, o concentrador ficou inativado em função do alto consumo de energia, todavia, em 1999 com a implantação do sistema de cogeração na usina, a unidade passou a funcionar continuamente, produzindo cerca de 3 m³/h de vinhaça concentrada.

O concentrador de vinhaça permitiu que a usina Santa Elisa reduzisse o custo de transporte do subproduto para as regiões mais afastadas e pudesse ter a flexibilidade de dosar a concentração de vinhaça conforme as características do solo.

Ainda de acordo com Carvalho e Silva (2010), com a evaporação é uma operação utilizada em segmentos industriais intensivos em água, tem o objetivo de obter produtos mais concentrados, com menor proporção de um soluto volátil. Os evaporadores são utilizados em setores como: alimentício, papel e celulose, sucoenergética, farmacêutica e fertilizantes.

O tipo de equipamento de concentração a ser utilizado no processo de evaporação depende das características do soluto, solvente, taxa de evaporação necessária, sistema de aquecimento e a viscosidade do fluido. Para tanto, utiliza-se principalmente dois sistemas: evaporação em múltiplos efeitos e o uso de fontes residuais de calor.

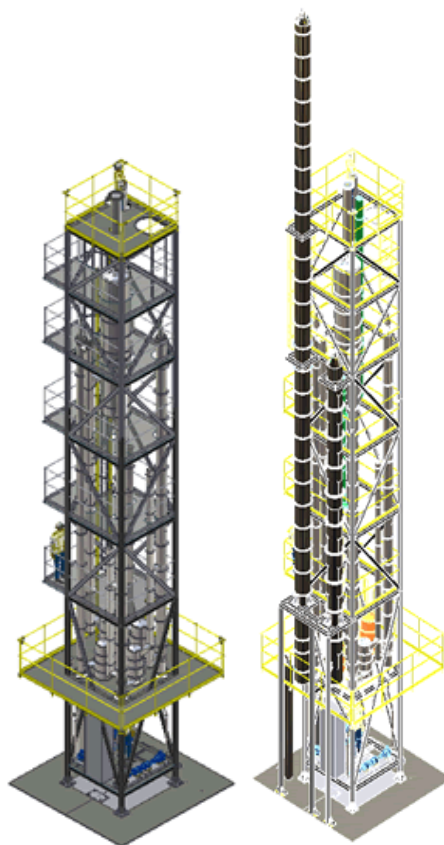
No sistema de evaporação em múltiplos efeitos, para Staud (2007), um evaporador é montado em continuação ao outro, de modo que o vapor de um evaporador é utilizado como fonte de calor para o seguinte e assim sucessivamente, até o encerramento do processo. Logo, quanto maior o número de vaporizadores, maior será a redução do consumo de energia. Além da economia de vapor, obtém-se economia de água de resfriamento no condensador. Com relação a fontes de calor, é acoplado o evaporador à coluna de destilação para que os vapores provenientes dela forneçam calor para o próximo vaporizador (STAUD, 2007).

Dentre as principais tecnologias de concentradores a vapor no mercado, de acordo com Santa Cruz (2011), destaca-se o concentrador Citrotec “Ecovin”, que se utiliza evaporadores

com o princípio de névoa turbulenta descendente acelerada termicamente. A tecnologia apresenta como pontos positivos: a alta taxa de evaporação, baixa taxa de incrustação, baixo consumo energético, possibilidade de automatização e construção 100% em aço inoxidável.

Além desse modelo, a empresa também oferece o concentrador Ecovin JL, elaborado a partir da junção do evaporador com as colunas de destilação. Esse concentrador tem como objetivo otimizar o consumo energético na concentração de vinhaça. A junção das etapas do processo permitiu a produção de etanol com a vinhaça já concentrada e um adicional mínimo no consumo global de vapor. As tecnologias mencionadas (Ecovin e Ecovin JL) apresentam como propostas a utilização da vinhaça concentrada para os fertirrigação, alimentação animal, solidificação, queima e biodigestão (SANTA CRUZ, 2011).

Figura 4 – Concentrador de vinhaça Citrotec

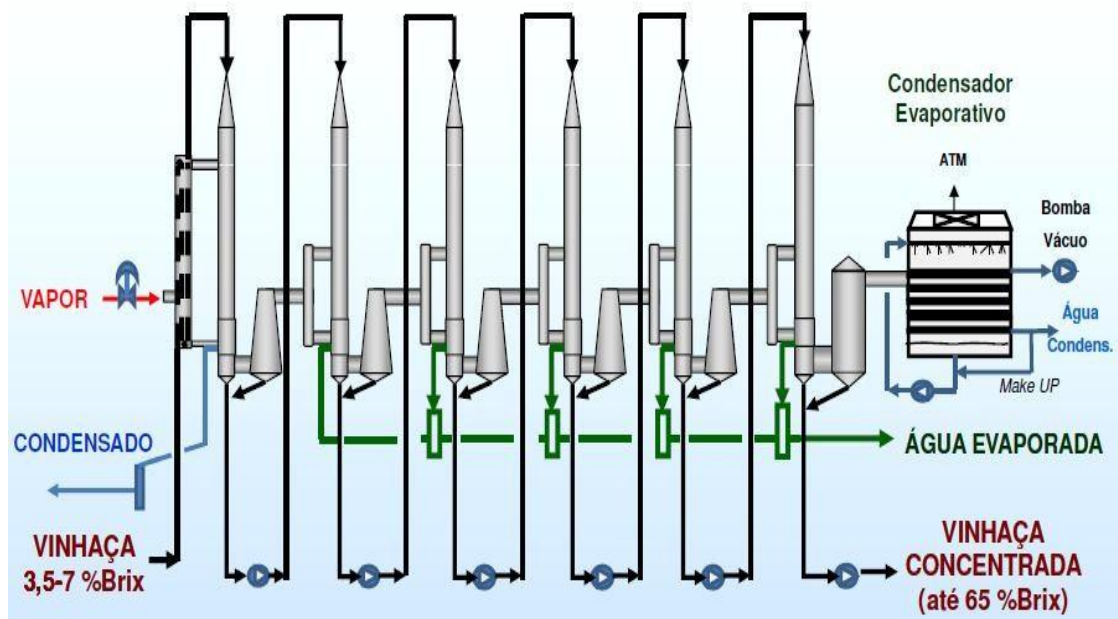


Fonte: Santa Cruz (2011).

Já o concentrador de vinhaça com tecnologia Thermally Accelerated Short Time Evaporator, fabricado pela Dedini, outrossim se fundamenta na evaporação em múltiplas fases, com evaporadores em névoa turbulenta de fluxo descendente. No que se refere aos benefícios desse sistema, a Dedini aponta: rápido aquecimento e evaporação uniforme; mínima ocorrência de incrustação; layout compacto, construídos em aço inoxidável e de

fácil instalação; fornecimento de estruturas pré-montadas visando reduzir o tempo e custo de montagem e instalação; operação em cascata permite configurações em até sete estágios e automatização de todo o sistema (SANTA CRUZ, 2011).

**Figura 5 - Concentrador de vinhaça Thermally Accelerated Short Time Evaporator
Dedini**



Fonte: Santa Cruz (2011).

No que se refere ao processo de concentração por osmose reversa, de acordo com Elias Neto (2016, p. 20):

A tecnologia de concentração de vinhaça por membranas, consiste no processo de separação de sólidos por uma barreira física seletiva, utilizando-se membranas de osmose reversa. Estas membranas são constituídas por pratos justapostos dentro de um cilindro, formando um circuito do concentrado, retirando o permeado pelo centro do cilindro. Essa tecnologia apresenta resultados em torno de 50 a 80% de geração de permeado com boa qualidade, com altos teores de sólidos dissolvidos (35.000 a 55.000 mg/L).

Ainda para Elias Neto (2016), as membranas não têm o mesmo potencial de concentração se comparado com o processo de evaporação. Enquanto na concentração por evaporação atinge teores de sólidos da ordem de 20% ou mais, na membrana os teores de sólidos atingem cerca de 12%. Como subproduto do processo de osmose reversa esta água em nível de potabilidade que pode ser reutilizada no processo industrial.

A utilização de concentradores de vinhaça, de acordo com Poveda (2014), se encontra em crescimento no setor sucroenergético. As leis que regulam o descarte e a fertirrigação vinhaça, como também os equipamentos que aproveitam calor residual de outros processos,

têm fomentado o aumento na implantação desse sistema. Além disso, o uso de sistemas *Clean-in-Place* e *Thermally Accelerated Short Time* reduziram as incrustações e consumo energético foi diminuído com sistemas de cogeração e com aproveitamento de calor residual utilizando concentradores acoplados à destilaria. A tabela 9 enumera as usinas que tem instalado concentradores de vinhaça.

Tabela 9 – Usinas com concentradores de vinhaça

| 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 | Olímpia/SP | 220 m ³ /h |
| Usina Cerradinho | Potirendaba/SP | 105 m ³ /h |

Fonte: Poveda (2014).

Nesse sentido, de acordo com Silva (2015), a concentração de vinhaça traz vários benefícios que tornam o investimento viável ambientalmente para uma usina produtora de etanol: (a) redução do risco de contaminação de vinhaça junto a coleções de águas; (b) redução do risco de percolação para as águas subterrâneas; (c) redução de emissão de gases efeito estufa na atmosfera pelo menor consumo de combustíveis fósseis para a aplicação da vinhaça no campo; (d) eliminação dos fortes odores advindos da fertirrigação com vinhaça; (e) redução da sobrecarga exercida sobre os pavimentos de rodovias; (f) redução do consumo de água a partir da reutilização do condensado para a reutilização no processo industrial (embebição do caldo para extração, diluição do fermento na fermentação, diluição do mel para o preparo do mosto e lavagem de pisos) e consequente redução na captação dos corpos e cursos d'água; (g) economia no custo da fertirrigação, com facilidade de distribuição em terras descontínuas e viabilização da distribuição para áreas distantes e (h) redução na utilização de fertilizantes minerais.

A tecnologia de concentração da vinhaça se tornou uma realidade dentro do setor sucroenergético, seja pela redução dos custos de aplicação da vinhaça no campo com a redução de seu volume ou pelos ganhos ambientais referentes à economia de água e à redução do potencial de poluição das águas subterrâneas. Contudo, duas questões em especial freiam a introdução dessa tecnologia: o alto custo da planta de concentração e a preferência por tecnologias que atuem na redução da produção de vinhaça (SANTA CRUZ, 2011).

4 METODOLOGIA

A pesquisa científica é um conjunto de procedimentos sistemáticos baseados no raciocínio lógico, que tem por objetivo encontrar soluções para os problemas propostos mediante o emprego de métodos científicos. Sendo assim, a metodologia consiste nos estudos dos métodos empregados pelas ciências na investigação sobre o comportamento de certos fenômenos, buscando validação e sua relação com as teorias científicas (GIL, 2007).

4.1 Classificação da pesquisa

Do ponto de vista da sua natureza, a presente pesquisa pode ser classificada como aplicada, pois, objetiva gerar conhecimentos para aplicação prática dirigidos à solução de problemas específicos (MOREZI, 2004): utilização de vinhaça *in natura* em biodigestores e concentradores, em consonância com a dimensão ambiental e econômica da sustentabilidade. Como utilizou dados e análises quantitativos, também pode ser considerada uma pesquisa quantitativa.

Para Barros e Lehfeld (2000), a pesquisa aplicada tem como objetivo a necessidade de produzir conhecimento para aplicação de seus resultados, com a missão de contribuir para fins práticos, visando à solução imediata do problema encontrado.

A presente pesquisa também pode ser considerada exploratória, pois se caracteriza por ter foco na compreensão dos fatos (LAZARINI, 1997). A pesquisa exploratória tem como objetivo proporcionar maior compreensão do problema, no intuito de torná-lo mais explícito ou a construir hipóteses ou proposições. A grande maioria das pesquisas exploratórias envolve levantamento bibliográfico e análise de exemplos que estimulem a compreensão (GIL, 2007).

4.2 Métodos de coleta

Inicialmente, a coleta de dados deste trabalho foi realizada por meio de levantamento bibliográfico, na busca de informações e dados disponíveis em publicações de origem nacional ou internacional. A pesquisa bibliográfica é realizada a partir do levantamento de referências teóricas já analisadas e publicadas por meios impressos e eletrônicos, tais como: livros, artigos científicos, teses, dissertações e *web sites*. Isso permite ao pesquisador conhecer o que já foi estudado sobre o assunto (FONSECA, 2002).

Para a edificação do referencial teórico, foi realizado levantamento bibliográfico nas bases dados da *Scientific Electronic Library Online*; *Web of Science*; teses e dissertações do Sistema integrado de Bibliotecas da Universidade Estadual Paulista, Universidade de São

Paulo, Universidade Estadual de Campinas, Fundação Getúlio Vargas, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Universidade de Brasília, Universidade Federal de Itajubá, Universidade Federal de Lavras, Universidade Federal de São Carlos, Universidade Federal da Paraíba, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Universidade Federal de Santa Catarina, Universidade Federal do ABC, Santo André, Universidade Federal de Minas Gerais, Universidade Federal de Uberlândia, Universidade Federal de Alfenas, Universidade Federal do Paraná e Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro por meio das seguintes palavras chave: vinhaça, energia, desenvolvimento sustentável, setor sucroenergético, setor elétrico, biodigestores, biogás e motores de conversão de biogás em eletricidade, concentrador, fertilizantes e crédito de carbono.

Para consecução do objetivo geral da pesquisa foram utilizados dados quantitativos. Na presente pesquisa foi utilizada a análise de viabilidade econômica a partir de projeções de fluxos de caixa para se determinar o valor presente líquido, *payback* e *payback* descontado taxa interna, como também: a análise energética, a partir do consumo de Diesel com o transporte de vinhaça; balanço de energia consumida pelo Diesel e gerada pelo biogás, geração e consumo de eletricidade e equivalente populacional de geração de eletricidade de vinhaça biodigerida e a análise ambiental a partir do equivalente populacional de vinhaça; balanço de emissão e mitigação de emissão de NO_x, SO_x e CO₂ eq. Todas as análises supracitadas foram fundamentadas com base em Poveda (2014) e Moraes et al. (2014).

As análises discorridas anteriormente foram aplicadas em três situações:

1. Concentrador modelo Ecovin JL, fabricado e patenteado pela empresa Citrotec, a partir dessa tecnologia, a usina incorre em ganhos com a economia no transporte de vinhaça *in natura*, ausência de multas, captação de água e fertilizantes (SILVA, 2015; POVEDA, 2014; SIMÕES, SENA, CAMPOS, 2004);
2. Biodigestores de circulação interna e um motor de combustão interna, com rendimento de 38%, com ganhos econômicos com a venda de eletricidade, créditos de carbono, economia com fertilizantes e ausência de multas (MORAES et al., 2014; POVEDA, 2014; PROCKNOR, 2008);
3. Por fim o conjugado biodigestor de circulação interna e motogerador, com rendimento de 38%, operando conjuntamente com o concentrador, para geração e venda de eletricidade, créditos de carbono e fertilizantes, como também economia com transporte de vinhaça *in natura*, multas ambientais e consumo de água (MORAES et al., 2014; POVEDA, 2014; PROCKNOR, 2008).

No que se refere à coleta de dados quantitativos, o instrumento utilizado foi o levantamento em bancos de dados a Agência Nacional de Petróleo, União da Indústria da Cana-de-açúcar, Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil, Empresa Citrotec, Moraes et al. (2014), Poveda (2014) e Nogueira et al. (2015).

4.3 Variáveis

De acordo com Köche (2000), variáveis são grandezas que podem variar ao longo do tempo ou de caso a caso. Nesse sentido, variáveis independentes são aquelas que se introduz intencionalmente para verificar-se a relação entre suas variações e o comportamento de outras variáveis, ou seja, correspondem àquilo em função do qual se deseja conseguir realizar previsões e/ou obter resultados.

As variáveis dependentes são aquelas cujo comportamento se quer verificar em função das oscilações das variáveis independentes, ou seja, correspondem àquilo que se deseja prever e/ou obter como resultado (KÖCHE, 2000).

No que se refere às variáveis moderadoras, podem ser aquele fator ou propriedade que também é causa, condição, estímulo ou determinante para que ocorra determinado efeito, porém é considerada uma variável secundária em relação a uma variável independente (KÖCHE, 2000).

Com base em Oliveira (2004), Nogueira et al. (2015), Poveda (2014) e Moraes et al. (2014) as variáveis independentes, dependentes e moderadoras da presente pesquisa são apresentadas no quadro 8.

Quadro 8 – Variáveis independentes, dependentes e moderadoras da pesquisa

| | |
|-------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Variáveis independentes | Custo do biodigestor de circulação interna (R\$) |
| | Custo de operação e manutenção do biodigestor e dessulfurificador (R\$) |
| | Custo do motogerador (R\$) |
| | Custo de operação e manutenção do motogerador (R\$) |
| | Custo do concentrador Ecovin JL (R\$) |
| | Custo de operação e manutenção do concentrador Ecovin JL (R\$) |
| | Capacidade de processamento do concentrador Ecovin JL (m ³) |
| | Preço do Diesel (R\$) |

Fonte: Adaptado de Oliveira (2004) e Nogueira et al. (2015).

Quadro 8 – Variáveis independentes, dependentes e moderadoras da pesquisa

| | |
|-------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Variáveis independentes | Preço do MWh no ACR (R\$) |
| | Preço do crédito de carbono (R\$) |
| | Preço dos fertilizantes (R\$) |
| | Preço de mão de obra dos motoristas de caminhão (R\$) |
| | Depreciação dos veículos (R\$) |
| | Distância média percorrida pelos caminhões para fertirrigação (km) |
| | Tempo médio de aplicação e recarga de vinhaça (horas); |
| | Capacidade de transporte dos caminhões 2318, Volvo rodotrem e motobomba (m ³) |
| | Percentual de volume de vinhaça transportado por dia pelos caminhões 2318, caminhões Volvo rodotrem e motobombas (%) |
| | Ausência de multa por descarte inadequado de vinhaça (R\$); |
| | Aliquotas de impostos de renda e contribuições sociais sobre venda de eletricidade (%) |
| | Taxa de desconto (%) |
| | Vida útil do concentrador, biodigestor e motogerador (anos) |
| | Dias de safra (dias/ano) |
| | Meses de safra (meses/ano) |
| | Semanas no ano (semanas/ano) |
| | Porcentagem de volume de biogás vazado (%) |
| | Poder Calorífico Inferior do biogás (kJ/Nm ³) |
| | Energia térmica produzida pelo biogás ano (TJ/ano) |
| | Rendimento termoelétrico do motor (%) |
| | Poder calorífico inferior do Diesel (kJ/litro) |
| | Consumo de eletricidade residencial per capita anual no Brasil (MWh/ano) |
| | DQO de águas de esgoto (kg/m ³) |

Fonte: Adaptado de Oliveira (2004) e Nogueira et al. (2015).

Quadro 8 – Variáveis independentes, dependentes e moderadoras da pesquisa

| | |
|-----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Variáveis independentes | Média de consumo de água por habitante (litros/habitante) |
| | Contribuição per capita de esgoto |
| | DQO de vinhaça (kg/m ³) |
| | Fator de emissão de NO _x por consumo de eletricidade (g/MWh) |
| | Fator de emissão de NO _x por kilometro percorrido (g/km) |
| | Fator de emissão NO _x do motogrador de biogás (kg NO _x /TJ) |
| | Fator de emissão de SO _x por consumo de eletricidade (g/MWh) |
| | Densidade do Diesel (kg/m ³) |
| | Massa molecular do H ₂ S (g/M) |
| | Fator de emissão de CO ₂ eq. por consumo de eletricidade (t CO ₂ eq./MWh) |
| | Quantidade CO ₂ eq. por massa de Diesel (t/kg de Diesel) |
| | Fator de NO _x evitado a partir da geração de eletricidade (g/MWh) |
| | Fator de SO _x evitado a partir do uso de vinhaça para geração de eletricidade (g/MWh) |
| | Fator de CO ₂ eq. evitado a partir do uso de vinhaça para geração de eletricidade (t CO ₂ eq./MWh) |
| | Volume máximo de vinhaça transportado pelo caminhão 2318 em 24 horas (m ³) |
| | Volume máximo de vinhaça transportado pelo caminhão Volvo rodotrem em 24 horas (m ³) |
| | Salário mensal dos camioneiros (R\$) |
| | Preço da uréia no mercado internacional de fertilizantes (R\$/t) |
| | Preço do superfosfato triplo no mercado internacional de fertilizantes (R\$/t) |
| | Preço do cloreto de potássio no mercado internacional de fertilizantes (R\$/t) |
| Preço da soda cáustica no mercado internacional (R\$/m ³) | |
| Volume semanal de soda cáustica para limpeza (m ³) | |
| Variáveis dependentes | Número de concentradores |

Quadro 8 – Variáveis independentes, dependentes e moderadoras da pesquisa

| | |
|----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Variáveis dependentes | Capacidade de redução do volume de vinhaça (m ³) |
| | Volume de vinhaça <i>in natura</i> e concentrada transportado por dia pelos caminhões 2318, caminhões Volvo rodotrem e motobombas (m ³) |
| | Número de viagens realizadas pelos caminhões 2318 e Volvo rodotrem para o transporte de vinhaça <i>in natura</i> e concentrada |
| | Número de caminhões necessários para transporte de vinhaça <i>in natura</i> e concentrada |
| | Número de camioneiros necessários para o transporte de vinhaça <i>in natura</i> e concentrada em três turnos |
| | Custo de motoristas por safra no transporte de vinhaça <i>in natura</i> e concentrada (R\$) |
| | Consumo de combustível por safra no transporte de vinhaça <i>in natura</i> – caminhão 2318, caminhão Volvo rodotrem e motor MB OM 352 e bomba EQ 9048 (litros) |
| | Custo de consumo de combustível por safra no transporte de vinhaça <i>in natura</i> – caminhão 2318, caminhão Volvo e motor MB OM 352 e bomba EQ 9048 (R\$) |
| | Custo total anual no transporte de vinhaça <i>in natura</i> (R\$) |
| | Custo de depreciação por safra da frota de caminhões 2318 e Volvo rodotrem (R\$) |
| | Custo de consumo de combustível por safra – caminhão 2318 pós concentração de vinhaça (R\$); |
| | Custo de depreciação por safra da frota de caminhões 2318 pós concentração de vinhaça (R\$); |
| | Custo anual no transporte de vinhaça concentrada (R\$) |
| | Economia por safra no transporte de vinhaça (R\$) |
| | Preço da uréia em vinhaça <i>in natura</i> (R\$) |
| | Preço do superfosfato triplo em vinhaça <i>in natura</i> (R\$) |
| | Preço do cloreto de potássio em vinhaça <i>in natura</i> (R\$) |
| | Preço da vinhaça <i>in natura</i> (R\$) |
| | Preço da vinhaça concentrada (R\$) |
| | TIR |
| VPL | |
| Payback/Payback descontado | |

Quadro 8 – Variáveis independentes, dependentes e moderadoras da pesquisa

| | |
|---------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Variáveis dependentes | Consumo anual de eletricidade na biodigestão (MWh) |
| | Potência elétrica do sistema de biodigestores (kW) |
| | Potência elétrica do concentrador (MW) |
| | Consumo anual de eletricidade do concentrador (MWh) |
| | Custo anual de eletricidade do concentrador (R\$) |
| | Custo anual de soda cáustica (R\$) |
| | Volume de vinhaça produzida por ano (m ³ /ano) |
| | Volume de vinhaça concentrada produzida por ano (m ³) |
| | Volume de biogás produzido por m ³ de vinhaça (Nm ³ /m ³) |
| | Volume de biogás/ano (m ³ /ano) |
| | Energia térmica produzida pelo biogás ano (TJ/ano) |
| | Quantidade potencial de bagaço substituído pela eletricidade biogás de vinhaça (t/ano) |
| | Quantidade potencial de etanol de segunda geração produzido por bagaço excedente (m ³ /ano) |
| | Quantidade de Diesel substituído por biogás de vinhaça (m ³ /ano) |
| | Quantidade caminhões médios abastecidos por biogás de vinhaça |
| | Quantidade de gasolina substituída por biogás de vinhaça (m ³ /ano) |
| | Quantidade de veículos a gasolina abastecidos por biogás de vinhaça |
| | Quantidade de etanol substituída por biogás de vinhaça (m ³ /ano) |
| | Quantidade de veículos a etanol abastecidos por biogás de vinhaça |
| | Energia elétrica exportada por ano (MWh/ano) |
| Receita anual de venda de eletricidade (MWh/ano) | |
| Imposto anual sobre a venda de eletricidade (R\$) | |
| Potência elétrica de geração instalada (MW) | |

Fonte: Adaptado de Oliveira (2004) e Nogueira et al. (2015).

Quadro 8 – Variáveis independentes, dependentes e moderadoras da pesquisa

| | |
|-----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Variáveis dependentes | Economia com água permeada não captada (R\$) |
| | Energia consumida do Diesel por ano (TJ/ano) |
| | Equivalente populacional de geração de eletricidade de vinhaça biodigerida e concentrada (habitantes) |
| | Equivalente populacional após a concentração de vinhaça (habitantes) |
| | Equivalente populacional de vinhaça biodigerida (habitantes) |
| | Equivalente populacional de vinhaça biodigerida (habitantes) |
| | Fluxo de vinhaça pós concentração (litros/dia) |
| | Fluxo de vinhaça (litros/dia) |
| | Emissão de NO _x pelo concentrador (t/ano) |
| | Kilometragem total percorrida pela frota de caminhões 2318 no ano (km) |
| | Emissão de NO _x no transporte de vinhaça concentrada (t/ano) |
| | Emissão de NO _x por ano no motogerador de biogás (tNO _x /ano) |
| | Emissão de SO _x pelo concentrador (t/ano) |
| | Emissão de SO _x no transporte de vinhaça concentrada com Diesel S500 (t/ano) |
| | Emissão de SO _x por ano no motogerador de biogás (tSO _x /ano) |
| | Emissão de CO _{2 eq.} pelo concentrador (t/ano) |
| | Emissão de CO _{2 eq.} no transporte de vinhaça concentrada com Diesel S500 (t/ano) |
| | Emissão de NO _x evitada a partir do uso de vinhaça para geração de eletricidade (Tno _x /ano) |
| | Emissão de NO _x evitada a partir do uso de vinhaça para geração de eletricidade equivalente em CO ₂ (t CO _{2 eq} /ano) |
| | Emissão de SO _x evitada a partir do uso de vinhaça para geração de eletricidade (tSO _x /ano) |
| | Emissão de CO ₂ evitada a partir do uso de vinhaça para geração de eletricidade (tCO _{2 eq}) |
| | Balanco de energia consumida pelo Diesel por ano (TJ/ano) |
| | Balanco de geração e consumo de eletricidade (MWh/ano) |

Fonte: Adaptado de Oliveira (2004) e Nogueira et al. (2015).

Quadro 8 – Variáveis independentes, dependentes e moderadoras da pesquisa

| | |
|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Variáveis dependentes | Balanco de energia gerada pelo biogás por ano (TJ/ano) |
| | Balanco de energia consumida pelo Diesel e gerada pelo biogás por ano (TJ/ano) |
| | Balanco de emissão e mitigação de NO _x pelo concentrador e transporte de vinhaça concentrada com Diesel S 500 (t/ano) |
| | Balanco de emissão e mitigação de SO _x pelo concentrador e transporte de vinhaça concentrada com Diesel S 500 (t/ano) |
| | Balanco de emissão e mitigação de CO ₂ eq. pelo concentrador e transporte de vinhaça concentrada com Diesel S 500 (t/ano) |
| | Balanco de emissão e mitigação de NO _x pelo motogerador e geração de eletricidade a partir de vinhaça (t/ano) |
| | Balanco de emissão e mitigação de SO _x pelo motogerador e geração de eletricidade a partir de vinhaça (t/ano) |
| | Emissão de CO ₂ evitada a partir do uso de vinhaça para geração de eletricidade (tCO ₂ eq) |
| | Balanco de emissão e mitigação de NO _x pelo concentrador, transporte de vinhaça concentrada com Diesel S500, motogerador e geração de eletricidade a partir de vinhaça (t/ano) |
| | Balanco de emissão e mitigação de SO _x pelo concentrador, transporte de vinhaça concentrada com Diesel S500, motogerador e geração de eletricidade a partir de vinhaça (t/ano) |
| | Balanco de emissão e mitigação de CO ₂ eq pelo concentrador, transporte de vinhaça concentrada com Diesel S500 e geração de eletricidade a partir de vinhaça (t/ano) |
| Receita anual de venda de crédito de carbono (R\$) | |
| Variáveis moderadoras | DQO de vinhaça biodigerida (kg/m ³) |
| | Quantidade SOx por massa de Diesel (t/Kg de Diesel) |
| | Concentrador de H ₂ S no biogás (mg/m ³) |
| | Taxa de juros anual |
| | Turnos de trabalho |

Fonte: Adaptado de Oliveira (2004) e Nogueira et al. (2015).

4.4 Proposições

De acordo com os objetivos de pesquisa, várias proposições podem ser levantadas. De acordo com Cooper e Schindler²⁸ (2003, apud OLIVEIRA, 2004, p. 57) as proposições “são

²⁸ COOPER, D. R.; SCHINDLER, P. S. **Métodos de pesquisa em administração**. 7. ed. Porto Alegre: Bookman, 2003. 640 p.

declarações sobre conceitos que podem ser julgados como verdadeiros ou falsos caso se refiram a fenômenos observáveis”. Nesse sentido, as proposições da presente pesquisa são:

- É viável economicamente a utilização de biodigestores anaeróbios de circulação interna, concentrador de vinhaça e o conjugado de ambos;
- A utilização de biodigestores anaeróbios de circulação interna, concentrador de vinhaça e o conjugado de ambos estão em consonância com a dimensão ambiental sustentabilidade;
- Ante a sua elevada carga de material orgânico, baixo pH, elevada corrosividade e altos índices de demanda bioquímica e química de oxigênio, a vinhaça deve ser também utilizada com propósitos energéticos;
- Os leilões de energia elétrica realizado para Agência Nacional de Energia Elétrica, como também a atual legislação sobre vinhaça são desfavoráveis economicamente para utilização da vinhaça.

4.5 Análises realizadas

Para a execução da presente pesquisa, foi considerada uma faixa de produção de 500 até 4.000 metros cúbicos de etanol por dia, como também, para a produção de etanol por estado brasileiro na safra 2015/2016, de acordo com UNICA (2017). Aonde a base para as análises econômica, ambiental e energética, são apresentados na tabela 10.

Tabela 10 – Dados de safra e insumos agroindustriais

| Dados | Valores | Fonte |
|--------------------------------------------------------|----------|----------------------|
| Dias de safra | 200,00 | Citrotec (2017) |
| Período de safra (meses) | 7,00 | Citrotec (2017) |
| Horas de funcionamento do concentrador/ horas de safra | 4.800,00 | Cálculo |
| Produção de etanol/dia (m ³) | - | Dado a inserir |
| Produção de vinhaça/dia (m ³) | - | Moraes et al. (2014) |
| Produção de etanol/ano (m ³) | - | Cálculo |
| Produção de vinhaça/ano (m ³) | - | Moraes et al. (2014) |
| DQO de vinhaça (kg/m ³) | 21,00 | Moraes et al. (2014) |

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Citrotec (2017) e Moraes et al. (2014).

Para o cálculo de horas de funcionamento do concentrador e de safra, multiplica o valor dos dias de safra pelas 24 horas do dia, como também para a produção de etanol/ano, foi multiplicado a produção de etanol/dia pelos dias de safra.

No que se refere a produção de vinhaça/dia, a mesma foi encontrada multiplicando a produção de etanol/dia por dez, com base em Moraes et al. (2014), como também o valor de DQO de vinhaça, característico de plantas autônomas, ou seja, com produção exclusiva de etanol. Nesse sentido, os ferramentais para elaboração dos cálculos de viabilidade econômica, análise energética e ambiental para o concentrador de vinhaça, biodigestor de circulação interna e o conjugado de ambos são detalhados nos subcapítulos a seguir.

4.6 Concentrador de vinhaça

4.6.1 Análise de viabilidade econômica do concentrador de vinhaça

Para o cálculo de viabilidade econômica do concentrador de vinhaça, foram levados em consideração os dados obtidos na empresa Citrotec, do modelo de concentrador Ecovin JL, patenteadado por essa mesma organização.

Segundo o fabricante, esse concentrador, com capacidade de processamento de 200 m³/h de vinhaça, custa em torno de R\$ 20.000.000,00, ele processa 24 h por dia, com uma parada de duas horas semanais para limpeza interna do concentrador. No que se refere ao custo operacional, de forma geral, o mesmo consome cerca de 400 cv de eletricidade e não consome energia térmica adicional da planta, pois se utiliza a energia de condensação do vapor alcoólico da destilaria. Além disso, cerca de 30 m³/semana de soda a 3% para limpeza interna do concentrador, no que se refere a manutenção, foi considerado pelo fabricante o valor médio de R\$ 200.000,00 anuais.

Nesse sentido, com base nas informações supracitadas, a capacidade anual de processamento do concentrador de vinhaça é de 1.751.896 m³, aonde esse resíduo é reduzido em dez vezes, aonde obtemos a capacidade anual de produção de vinhaça concentrada no valor de 175.189,6 m³. Com base na produção anual de vinhaça e na capacidade de processamento anual do concentrador, na divisão do primeiro pelo segundo, obtem-se o número de concentradores necessários para o processamento de toda vinhaça gerada na usina.

Obtido o valor de investimento, como também de operação e manutenção do concentrador, para a confecção dos indicadores de viabilidade econômica financeira: valor presente líquido, taxa interna de retorno, *payback* e *payback* descontado, foram levados em consideração para a dimensão receita: economia obtida a partir da diferença de custos com transporte de vinhaça *in natura* e concentrada, ausência de multas ambientais, economia com água e obtenção de fertilizantes. No que se refere a dimensão custo foram levados em

consideração: manutenção e operação, já discorrido anteriormente, consumo de eletricidade e soda cáustica.

O detalhamento de cada uma das variáveis supracitadas são dissertados nos subcapítulos a seguir.

4.6.1.1 *Economia com transporte de vinhaça in natura*

Para o cálculo dos custos referentes com transporte de vinhaça *in natura* e vinhaça concentrada, foram utilizados os métodos elaborados por Macedo et al. (2004), Poveda (2014) e Silva et al. (2015), a fim de se obter os custos referentes a mão de obra dos camioneiros, número de caminhões necessários para o transporte, consumo de Diesel dos mesmos como também o valor de depreciação.

Uma vez obtida o custo com logística de vinhaça *in natura* e concentrada, pode-se obter o valor referente a economia com transporte.

4.6.1.1.1 *Custo referente ao transporte de vinhaça in natura*

Dado uma determinada produção de vinhaça *in natura*/dia, 5% é distribuído a partir de caminhão 2318, com tanque de 15 m³; 24% a partir de caminhão Volvo rodotrem, com dois tanques de 30m³ cada conjugado com motor MB OM 352 160 CV e bomba EQ 9048 140 m³/h para aspersão de vinhaça e 71% transportado exclusivamente por motor MB OM 352 160 CV e bomba EQ 9048 140 m³/h (MACEDO et al., 2004; POVEDA, 2014).

Com base nos valores de transporte de vinhaça *in natura* transportado por dia em cada modal, juntamente com os valores referentes a distância média percorrida por dia para fertirrigação, velocidade média do veículo, tempo de carga e descarga de vinhaça.

Conforme consta na tabela 11, pode-se encontrar os valores referentes ao consumo de Diesel de cada modal logístico, número de caminhões 2318 e Volvo rodotrem necessários para o transporte de vinhaça, como também o número de camioneiros, com base em três turnos de trabalho no dia.

Tabela 11 – Dados referentes aos modais de transporte de vinhaça *in natura*

| Sistema de transporte e aplicação | Máquina | % de volume de vinhaça a ser transportado | Distância média percorrida para fertirrigação (km) | Velocidade média percorrida pelo caminhão (km/h) | Tempo médio de aplicação e recarga de vinhaça (horas) |
|-------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| Caminhão aplicando diretamente | Caminhão 2318 com tanque de 15 m ³ | 5% | 7,00 | 35 | 0,3 |
| Caminhão com aspersão combinado com motobomba | Caminhão Volvo rodotrem com dois tanques de 30 m ³ cada e motobomba | 24% | 12,00 | 20 | 1,2 |
| Motobomba em canal com montagem direta ou rolão | Motor MB OM 352 160 CV e Bomba EQ 9048 140 m ³ /h | 71% | 63,00 | ND | ND |

Fonte: Adaptado de Macedo et al. (2004) e Poveda (2014).

Para o cálculo de viagens realizadas por dia caminhões 2318, necessários para o transporte de vinhaça, pode ser encontrada a partir da equação (1), adaptado de Macedo et al. (2004) e Poveda (2014).

$$NV_{2318/\text{dia}} = VV_{\text{dia}/2318} \div 15 \quad (1)$$

Aonde:

| | |
|------------------------|------------------------------------------------------------------|
| $NV_{2318/\text{dia}}$ | Número de viagens realizadas pelos caminhões 2318 por dia; |
| $VV_{2318/\text{dia}}$ | Volume de vinhaça a ser transportado pelo caminhão 2318 por dia; |
| 15 | Número de viagens realizadas pelo caminhão 2318. |

O cálculo de viagens realizadas por ano pelos caminhões 2318 para o transporte de vinhaça pode ser encontrado a partir da equação (2), adaptado de Macedo et al. (2004) e Poveda (2014).

$$NV_{2318/\text{ano}} = NV_{2318/\text{dia}} \times \text{Dias de safra} \quad (2)$$

Aonde:

| | |
|------------------------|------------------------------------------------------------|
| $NV_{2318/\text{ano}}$ | Número de viagens realizadas pelos caminhões 2318 por ano; |
| $NV_{2318/\text{dia}}$ | Número de viagens realizadas pelos caminhões 2318 por dia; |
| Dias de safra | Dias de safra no ano. |

Para o cálculo do número de caminhões 2318, necessários para o transporte de vinhaça por dia, pode ser encontrado a partir da equação (3), adaptado de Macedo et al. (2004) e Poveda (2014).

$$NC_{2318} = VV_{\text{dia}/2318} \div 360 \quad (3)$$

Aonde:

| | |
|------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| NC_{2318} | Número de caminhões 2318; |
| $VV_{\text{dia}/2318}$ | Volume de vinhaça transportado pelo caminhão 2318 por dia (m^3/dia); |
| 360 | Volume máximo de vinhaça transportado por um caminhão 2318 em um dia (m^3/dia). |

Para o cálculo do número de viagens realizadas por dia pelos caminhões Volvo rodotrem, necessários para o transporte de vinhaça, pode ser encontrado a partir da equação (4), adaptado de Macedo et al. (2004) e Poveda (2014).

$$NV_{\text{vr}/\text{dia}} = VV_{\text{dia}/\text{vr}} \div 60 \quad (4)$$

Aonde:

| | |
|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| $NV_{\text{vr}/\text{dia}}$ | Número de viagens realizadas pelos caminhões Volvo rodotrem; |
| $VV_{\text{dia}/\text{vr}}$ | Volume de vinhaça transportado pelo caminhão Volvo rodotrem por dia (m^3/dia); |
| 60 | Volume transportado por um caminhão Volvo rodotrem (m^3). |

Para o cálculo do número de viagens anuais realizadas pelos caminhões Volvo rodotrem, necessários para o transporte de vinhaça, pode ser encontrado a partir da equação (5), adaptado de Macedo et al. (2004) e Poveda (2014).

$$NV_{\text{vr}/\text{ano}} = NV_{\text{vr}/\text{dia}} \times \text{Dias de safra} \quad (5)$$

Aonde:

| | |
|-----------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| $NV_{\text{vr}/\text{ano}}$ | Número de viagens realizadas pelos caminhões Volvo rodotrem por |
|-----------------------------|-----------------------------------------------------------------|

| | |
|---------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| | ano; |
| $NV_{vr/dia}$ | Volume de vinhaça transportado pelo caminhão Volvo rodotrem por dia (m^3/dia); |
| Dias de safra | Dias de safra no período. |

Para o cálculo do número de caminhões Volvo rodotrem, necessários para o transporte de vinhaça por dia, pode ser encontrado a partir da equação (6), adaptado de Macedo et al. (2004) e Poveda (2014).

$$NC_{vr} = VV_{dia/vr} \div 600 \quad (6)$$

Aonde:

| | |
|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| NC_{vr} | Número de caminhões Volvo rodotrem; |
| $VV_{dia/vr}$ | Volume de vinhaça transportado pelos caminhões Volvo rodotrem por dia (m^3/dia); |
| 600 | Volume máximo de vinhaça transportado por um caminhão Volvo rodotrem em 24 horas (m^3). |

Uma vez conhecido o número de caminhões 2318 e Volvo rodotrens para o transporte de vinhaça em um dia em três turnos de trabalho, é possível calcular o número de colaboradores necessário para execução do trabalho. Para a frota de caminhões 2318, o número de camioneiros, é encontrado na equação (7), de acordo com Silva (2015).

$$NCA_{caminhão/2318} = NC_{2318} \times 3 \quad (7)$$

Aonde:

| | |
|-----------------------|-----------------------------------------|
| $NCA_{caminhão/2318}$ | Número de camioneiros no caminhão 2318; |
| NC_{2318} | Número de caminhões 2318; |
| 3 | Turnos de trabalho. |

No que se refere a frota de caminhões Volvo rodotrens para o transporte de vinhaça em um dia em três turnos de trabalho, o número de camioneiros é encontrado a partir da equação (8), de acordo com Silva (2015).

$$NCA_{\text{caminhão/VR}} = NC_{\text{vr}} \times 3 \quad (8)$$

Aonde:

| | |
|----------------------------|---------------------------------------------------|
| $NCA_{\text{caminhão/VR}}$ | Número de camioneiros no caminhão Volvo rodotrem; |
| NC_{vr} | Número de caminhões Volvo rodotrem; |
| 3 | Turnos de trabalho. |

O custo de mão de obra no transporte de vinhaça *in natura* se da pela equação (9), de acordo com Silva (2015).

$$MDO_{\text{camioneiros/ano}} = ((NCA_{\text{caminhão/2318}} + NCA_{\text{caminhão/VR}}) \times S_{\text{camioneiro}}) \times \text{Meses de safra} \quad (9)$$

Aonde:

| | |
|--------------------------------|---------------------------------------------------|
| $MDO_{\text{camioneiros/ano}}$ | Custo de mão de obra dos camioneiros (R\$/ano); |
| $NCA_{\text{caminhão/2318}}$ | Número de camioneiros no caminhão 2318; |
| $NCA_{\text{caminhão/vr}}$ | Número de camioneiros no caminhão Volvo rodotrem; |
| $S_{\text{camioneiro/mês}}$ | Salário dos camioneiros mensal (R\$/mês); |
| Meses de safra | Período de safra em meses. |

Para o cálculo do consumo de Diesel, para os três modais de transporte de vinhaça, é dado pela equação (10), adaptado de Macedo et al. (2004) e Poveda (2014).

$$\text{Cons}_{\text{Diesel/ano/vin}} = ((VV_{\text{dia/MB}} \div 7,5) + ((NV_{2318} \times 6,36) + (NV_{\text{VR}} \times 18,46) + (VV_{\text{dia/VR}} \div 7,5)) \times \text{Dias de safra} \quad (10)$$

Aonde:

| | |
|---------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\text{Cons}_{\text{Diesel/ano/vin}}$ | Consumo anual de Diesel no transporte de vinhaça <i>in natura</i> (litros/ano); |
| $VV_{\text{dia/MB}}$ | Volume de vinhaça transportado por dia por moto bomba (m^3/dia); |
| 7,5 | Volume de vinhaça bombeada em m^3 por consumo de um litro de Diesel de Motor MB OM 352 160 CV e Bomba EQ 9048 (m^3); |
| NV_{2318} | Número de viagens realizadas pelo caminhão 2318 por dia; |
| 6,36 | Volume de Diesel consumido pelo caminhão 2318 em uma viagem |

| | |
|----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | no transporte de vinhaça concentrada (litros/viagem); |
| NV_{VR} | Número de viagens realizadas pelos caminhões Volvo rodotrem por dia; |
| 18,46 | Volume de Diesel consumido pelo caminhão Volvo rodotrem em uma viagem no transporte de vinhaça concentrada (litros/viagem); |
| $VV_{\text{dia/vr}}$ | Volume de vinhaça transportado pelo caminhão Volvo rodotrem em um dia (m^3/dia); |
| Dias de safra | Dias de safra no ano. |

Consequentemente, o custo do consumo de Diesel anual dar-se-a a partir da equação (11), adaptado de Macedo et al. (2004) e Poveda (2014).

$$C_{\text{Diesel/ano/vin}} = P_{\text{Diesel}} \times \text{Cons}_{\text{Diesel/ano/vin}} \quad (11)$$

Aonde:

| | |
|---------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| $C_{\text{Diesel/ano/vin}}$ | Custo anual com Diesel no transporte de vinhaça <i>in natura</i> (R\$/ano); |
| P_{Diesel} | Preço do Diesel (R\$); |
| $\text{Cons}_{\text{Diesel/ano/vin}}$ | Consumo anual de Diesel no transporte de vinhaça <i>in natura</i> (litros/ano). |

No que se refere à depreciação, operação e manutenção dos veículos, de acordo com Silva (2015), em valores atualizados estão em R\$ 6.000,00. Logo, a depreciação, operação e manutenção de toda frota pode ser descrita pela equação (12), de acordo com Silva (2015).

$$C_{\text{depr/O\&M/cam/ano}} = (NC_{vr} + NC_{2318}) \times R\$ 6.000,00 \times \text{Meses de safra} \quad (12)$$

Aonde:

| | |
|--------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $C_{\text{depr/O\&M/cam/ano}}$ | Custo com depreciação, operação e manutenção da frota de caminhões 2318 e Volvo rodotrens por ano (R\$/ano); |
| NC_{vr} | Número de caminhões Volvo rodotrens; |
| NC_{2318} | Número de caminhões 2318; |
| R\$ 6.000,00 | Custo de depreciação por safra da frota de caminhões 2318 e Volvo |

rodotrem mensal (R\$/mês);

Meses de safra Período de safra em meses.

Portanto, dado as despesas supracitadas, o custo com transporte de vinhaça *in natura* pode ser encontrado a partir da equação (13), de acordo com Silva (2015), Macedo et al. (2004) e Poveda (2014).

$$C_{\text{transporte/vin/ano}} = \text{MDO}_{\text{camioneiros}} + C_{\text{Diesel/anoal/vin}} + C_{\text{depr/O\&M/cam2318/ano}} \quad (13)$$

Aonde:

$C_{\text{transporte/vin/ano}}$ Custo anual com transporte de vinhaça *in natura* (R\$/ano);

$\text{MDO}_{\text{camioneiros}}$ Custo de mão de obra anual dos camioneiros (R\$/ano);

$C_{\text{Diesel/anoal/vin}}$ Custo de consumo de Diesel anual no transporte de vinhaça *in natura* (R\$/ano);

4.6.1.2 Custo anual no transporte de vinhaça concentrada

No que se refere ao custo de transporte de vinhaça concentrada, de acordo com GEA²⁹ (2007, apud Poveda, 2014), a vinhaça concentrada somente pode ser transportada por caminhões 2318, dado seu grau de viscosidade, portanto excluindo a possibilidade de transporte a partir dos caminhões Volvo rodotrem e moto bombas. Nesse sentido 100% de vinhaça concentrada é distribuído nos canaviais a partir de caminhão 2318 com tanque de 15 m³.

Nesse sentido, de acordo com Macedo et al. (2004), Poveda (2014) e Silva et al. (2015) o volume de transporte de vinhaça concentrada transportada por dia, juntamente com os valores referentes a distância média percorrida por dia para fertirrigação, velocidade média do veículo, tempo de carga e descarga de vinhaça, conforme consta na tabela 12 pode-se encontrar os valores referente ao consumo de Diesel, número de caminhões 2318 necessários para o transporte do subproduto concentrado, como também o número de camioneiros, com três turnos no dia.

Tabela 12 – Dados referentes aos modais de transporte de vinhaça concentrada

²⁹ GEA. Wiegand GmbH. *Evaporators for Stillage Concentration Evaporation for Stillage Concentration*. Ettlingen, 2007.

| Sistema de transporte e aplicação | Máquina | % de volume de vinhaça a ser transportado | Distância média percorrida para fertirrigação (km) | Velocidade média percorrida pelo caminhão (km/h) | Tempo médio de aplicação e recarga de vinhaça (horas) |
|-----------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| Caminhão aplicando diretamente | Caminhão 2318 com tanque de 15 m ³ | 100% | 7,00 | 35 | 0,3 |

Fonte: Adaptado de Macedo et al. (2004) e Poveda (2014).

Para o cálculo do número de viagens diárias realizadas pelos caminhões 2318 para o transporte de vinhaça concentrada, pode ser encontrado a partir da equação (14), adaptado de Macedo et al. (2004) e Poveda (2014).

$$NV_{2318/vc} = VVC_{dia/2318} \div 15 \quad (14)$$

Aonde:

$NV_{2318/vc/dia}$ Número de viagens realizada pelos caminhões 2318 para o transporte de vinhaça concentrada;

$VVC_{dia/2318}$ Volume de vinhaça concentrada transportada por dia pelo caminhão 2318 (m³);

15 Volume de vinhaça transportado pelo caminhão 2318 (m³).

O cálculo do número de viagens anuais realizadas pelos caminhões 2318, para o transporte de vinhaça concentrada, pode ser encontrado a partir da equação (15), adaptado de Macedo et al. (2004) e Poveda (2014).

$$NV_{2318/vc/ano} = NV_{2318/vc/dia} \times \text{Dias de safra} \quad (15)$$

Aonde:

$NV_{2318/vc/ano}$ Número anual de viagens realizada pelos caminhões 2318 para o transporte de vinhaça concentrada;

$NV_{2318/vc/dia}$ Volume de vinhaça concentrada transportada por dia pelo caminhão 2318 (m³);

Dias de safra Dias de safra no período.

Para o cálculo do número de caminhões 2318, necessários para o transporte de vinhaça concentrada por dia, pode ser encontrado a partir da equação (16), adaptado de Macedo et al. (2004) e Poveda (2014).

$$NC_{2318/vc} = VVC_{dia/2318} \div 360 \quad (16)$$

Aonde:

| | |
|------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| $NC_{2318/vc}$ | Número de caminhões 2318 para o transporte de vinhaça concentrada; |
| $VVC_{dia/2318}$ | Volume de vinhaça concentrada transportada por dia pelo caminhão 2318 (m ³); |
| 3 | Turnos de trabalho. |

Conhecido o número de caminhões 2318 para o transporte de vinhaça concentrada por dia, em três turnos de trabalho, é possível calcular o número de colaboradores necessário para execução do trabalho, aonde é encontrado na equação (17), de acordo com Silva (2015).

$$NCA_{caminhões/2318} = NC_{2318/vc} \times 3 \quad (17)$$

Aonde:

| | |
|------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| $NCA_{caminhões/2318}$ | Número de camioneiros nos caminhões 2318 para o transporte de vinhaça concentrada; |
| $NC_{2318/vc}$ | Número de caminhões 2318 para o transporte de vinhaça concentrada; |
| 3 | Turnos de trabalho. |

O custo de mão de obra no transporte de vinhaça *in natura* se da a partir da equação (18), de acordo com Silva (2015).

$$MDO_{camioneiros/vc} = NCA_{caminhão2318/vc} \times S_{camioneiro} \times Meses\ de\ safra \quad (18)$$

Aonde:

| | |
|------------------------|---------------------------------------------------------------|
| $MDO_{camioneiros/vc}$ | Custo de mão de obra dos camioneiros no transporte de vinhaça |
|------------------------|---------------------------------------------------------------|

| | |
|------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| | concentrada (R\$/ano); |
| NCA _{caminhão/2318} | Número de caminhoneiros no caminhão 2318 no transporte de vinhaça concentrada; |
| S _{camioneiro/mês} | Salário dos caminhoneiros mensal (R\$/mês); |
| Meses de safra | Período de safra em meses. |

Para o cálculo do consumo de Diesel, para o caminhão 2318, transportador de vinhaça concentrada, é dado pela equação (19), adaptado de Macedo et al. (2004) e Poveda (2014).

$$\text{Cons}_{\text{Diesel/ano/vc}} = (\text{NV}_{2318/\text{vc}/\text{dia}} \times 6,32) \times \text{Dias de safra} \quad (19)$$

Aonde:

| | |
|-------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Cons _{Diesel/ano/vc} | Consumo anual de Diesel no transporte de vinhaça concentrada (litros/ano); |
| NV _{2318/vc/dia} | Número de viagens realizada pelos caminhões de 2318 no transporte de vinhaça concentrada; |
| 6,32 | Volume de Diesel consumido pelo caminhão 2318 em uma viagem no transporte de vinhaça concentrada (litros); |
| Dias de safra | Dias de safra no ano. |

O custo do consumo de Diesel anual no transporte de vinhaça concentrada, dar-se-a partir da equação (20), adaptado de Macedo et al. (2004) e Poveda (2014).

$$C_{\text{Diesel/anual/vc}} = P_{\text{Diesel}} \times \text{Cons}_{\text{Diesel/ano/vc}} \quad (20)$$

Aonde:

| | |
|-------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| C _{Diesel/anual/vc} | Custo anual com Diesel no transporte de vinhaça concentrada (R\$/ano); |
| P _{Diesel} | Preço do Diesel (R\$); |
| Cons _{Diesel/ano/vc} | Consumo anual de Diesel no transporte de vinhaça concentrada (litros/ano). |

No que descreve a depreciação, operação e manutenção dos veículos, de acordo com Silva et al. (2015), em valores atualizados estão em R\$ 6.000,00. Logo, a depreciação,

operação e manutenção da frota de caminhões 2318 pode ser descrita pela equação (21), de acordo com Macedo et al. (2004), Poveda (2014) e Silva (2015).

$$C_{\text{depr/O\&M/cam2318/ano}} = NC_{2318/vc} \times R\$ 6.000,00 \times \text{Meses de safra} \quad (21)$$

Aonde:

| | |
|------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $C_{\text{depr/O\&M/cam2318/ano}}$ | Custo com depreciação, operação e manutenção da frota de caminhões 2318 no transporte de vinhaça concentrada (R\$/mês); |
| $NC_{2318/vc}$ | Número de caminhões 2318 no transporte de vinhaça concentrada; |
| R\$ 6.000,00 | Custo de depreciação por safra da frota de caminhões 2318 (R\$/mês); |
| Meses de safra | Período de safra em meses. |

Sendo assim, dado as despesas supracitadas, o custo com transporte de vinhaça concentrada pode ser encontrado a partir da equação (22), de acordo com Macedo et al. (2004), Poveda (2014) e Silva (2015).

$$C_{\text{transporte/vc/ano}} = MDO_{\text{camioneiros}} + C_{\text{Diesel/anoal/vc}} + C_{\text{depr/O\&M/cam2318/ano}} \quad (22)$$

Aonde:

| | |
|------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $C_{\text{transporte/vc/ano}}$ | Custo anual com transporte de vinhaça concentrada (R\$/ano); |
| $MDO_{\text{camioneiros}}$ | Custo de mão de obra anual dos camioneiros (R\$/ano); |
| $C_{\text{Diesel/anoal/vc}}$ | Custo de consumo de Diesel anual no transporte de vinhaça concentrada (R\$/ano); |
| $C_{\text{depr/O\&M/cam2318/ano}}$ | Custo anual com depreciação, operação e manutenção com a frota de caminhões no transporte de vinhaça concentrada (R\$/ano). |

Portanto, a economia com transporte de vinhaça se dá pela subtração dos custos logísticos no transporte de vinhaça *in natura* pelos custos de transporte de vinhaça concentrada, a partir da equação (23), de acordo com Macedo et al. (2004), Poveda (2014) e Silva (2015).

$$E_{\text{transporte/vc/ano}} = C_{\text{transporte/vin/ano}} - C_{\text{transporte/vc/ano}} \quad (23)$$

Aonde:

| | |
|---------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| $E_{\text{transporte/vc/ano}}$ | Economia anual no transporte de vinhaça concentrada (R\$/ano); |
| $C_{\text{transporte/vin/ano}}$ | Custo anual no transporte de vinhaça <i>in natura</i> (R\$/ano); |
| $C_{\text{transporte/vc/ano}}$ | Custo anual no transporte de vinhaça concentrada (R\$/ano). |

4.6.1.3 Ausência de multas ambientais por descarte inadequado de vinhaça *in natura*

De acordo com Simões, Sena e Campos (2004), a economia por ausência de multa, pelo não descarte de vinhaça *in natura* no solo, em valores atualizados, é de R\$ 1.810,00 por ano.

4.6.1.4 Água permeada recuperada

Ainda de acordo com Simões, Sena e Campos (2004), a partir da concentração de vinhaça e conseqüente condensação de água, o seu reaproveitamento chega a 90%. Considerando, de acordo com Poveda (2014), para cada metro cúbico de água recuperada é economizado um real, tem-se a equação (24) para o valor de água permeada recuperada, de acordo com Simões, Sena e Campos (2004).

$$E_{\text{água permeada}} = (VV_{\text{in/ano}} - VV_{\text{conc/ano}}) \times \text{R\$ } 1,00 \quad (24)$$

Aonde:

| | |
|----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| $E_{\text{água permeada}}$ | Economia anual com água permeada recuperada (R\$/ano); |
| $VV_{\text{in/ano}}$ | Volume anual de vinhaça <i>in natura</i> produzido (m^3/ano); |
| $VV_{\text{conc/ano}}$ | Volume anual de vinhaça concentrada produzido (m^3/ano); |
| R\$ 1,00 | Economia por metro cúbico de água não captado. |

4.6.1.5 Produção de fertilizantes

De acordo com Simões, Sena e Campos (2004), a vinhaça concentrada, pode atuar como fertilizante, substituindo os produtos comercializados para nutrição vegetal. Dado a composição desse subproduto, a redução de seu volume em dez vezes a partir de rendimento de 75% do processo de concentração e o preço do comercial da uréia, superfosfato triplo e o cloreto de potássio no mercado internacional, obtem-se o valor comercial para vinhaça concentrada.

Para tanto, deve-se, primeiramente, obter o preço dos fertilizantes em vinhaça *in natura*, o preço da uréia é dada pela seguinte relação matemática (25), de acordo com Simões, Sena e Campos (2004).

$$P_{\text{uréia/vin}} = 0,615 \times P_{\text{uréia/fert}} \quad (25)$$

Aonde:

| | |
|-------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| $P_{\text{uréia/vin}}$ | Preço da uréia em vinhaça <i>in natura</i> (R\$); |
| 0,615 | kilograma de uréia em um metro cúbico de vinhaça <i>in natura</i> (kg); |
| $P_{\text{uréia/fert}}$ | Preço da uréia no mercado internacional de fertilizantes (R\$/t). |

No que se refere ao superfosfato triplo em vinhaça *in natura*, é dado pela seguinte equação (26) de acordo com Simões, Sena e Campos (2004).

$$P_{\text{superfosfato triplo/vin}} = 0.435 \times P_{\text{superfosfato triplo/fert}} \quad (26)$$

Aonde:

| | |
|---------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| $P_{\text{superfosfato triplo/vin}}$ | Preço do superfosfato triplo em vinhaça <i>in natura</i> (R\$); |
| 0.435 | kilograma de superfosfato triplo em um metro cúbico de vinhaça <i>in natura</i> (kg); |
| $P_{\text{superfosfato triplo/fert}}$ | Preço do superfosfato triplo no mercado internacional de fertilizantes (R\$/t). |

O cloreto de potássio, também em vinhaça *in natura*, é dado pela relação matemática (27), de acordo com Simões, Sena e Campos (2004).

$$P_{\text{cloreto de potássio/vin}} = 2,45 \times P_{\text{cloreto de potássio/fert}} \quad (27)$$

Aonde:

| | |
|---------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| $P_{\text{cloreto de potássio/vin}}$ | Preço do cloreto de potássio em vinhaça <i>in natura</i> (R\$); |
| 2,45 | kilograma de cloreto de potássio em um metro cúbico de vinhaça <i>in natura</i> (kg); |
| $P_{\text{cloreto de potássio/fert}}$ | Preço do cloreto de potássio no mercado internacional de fertilizantes |

(R\$/t).

Por fim, para o cálculo do preço da vinhaça *in natura* como fertilizante, é dado pela soma dos valores da uréia, superfosfato triplo e o cloreto de potássio nela diluídos, conforme ilustra a equação (28), de acordo com Simões, Sena e Campos (2004).

$$P_{\text{vin}} = P_{\text{ureia/vin}} + P_{\text{superfosfato triplo/vin}} + P_{\text{cloreto de potássio/vin}} \quad (28)$$

Aonde:

| | |
|--------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| P_{vin} | Preço da vinhaça <i>in natura</i> (R\$); |
| $P_{\text{uréia /vin}}$ | Preço da uréia em vinhaça <i>in natura</i> (R\$); |
| $P_{\text{superfosfato triplo/vin}}$ | Preço do superfosfato triplo em vinhaça <i>in natura</i> (R\$); |
| $P_{\text{cloreto de potássio/vin}}$ | Preço do cloreto de potássio em vinhaça <i>in natura</i> (R\$). |

Obtido o preço da vinhaça *in natura*, para encontrar o preço da vinhaça concentrada como fertilizante, multiplicamos o mesmo pelo grau de concentração e rendimento do processo, conforme define a equação (29), de acordo com Simões, Sena e Campos (2004).

$$P_{\text{vc}} = P_{\text{vin}} \times 10 \quad (29)$$

Aonde:

| | |
|------------------|------------------------------------------------------------------|
| P_{vc} | Preço da vinhaça concentrada (R\$); |
| P_{vin} | Preço da vinhaça <i>in natura</i> (R\$); |
| 10 | Volume de redução da vinhaça <i>in natura</i> (m ³); |

Para a obtenção do faturamento de venda de vinhaça concentrada como fertilizante, multiplica-se o preço da mesma pelo volume de vinhaça concentrada, produzida no período de safra, como pode ser observado pela equação (30), de acordo com Simões, Sena e Campos (2004).

$$F_{\text{venda/vc/ano}} = V_{\text{vc/ano}} \times P_{\text{vc}} \quad (30)$$

Aonde:

| | |
|---------------------------|-------------------------------------------------------------|
| $F_{\text{venda/vc/ano}}$ | Faturamento com venda de vinhaça concentrada por ano (R\$); |
| $V_{\text{vc/ano}}$ | Volume de vinhaça concentrada por ano (m^3); |
| P_{vc} | Preço de vinhaça concentrada (R\$). |

Para o pagamento de impostos referente a comercialização de fertilizantes de vinhaça concentrada, foi levado em consideração os imposto sobre circulação de mercadorias e serviços (ICMS), aonde no Estado de São de Paulo, é isenta, de acordo com o Ministério da Fazenda (2011), como também, a contribuição social sobre o lucro líquido (CSLL), em 9% e o imposto de renda (IR) em 25%. Como pode ser ilustrado na equação (31) elaborada pelo autor.

$$I_{\text{venda/fert/vc/ano}} = F_{\text{venda/vc/ano}} \times 9\% \times 25\% \quad (31)$$

Aonde:

| | |
|--------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| $I_{\text{venda/fert/vc/ano}}$ | Imposto sobre a venda de fertilizantes de vinhaça concentrada por ano (R\$); |
| $F_{\text{venda/vc/ano}}$ | Faturamento com venda de vinhaça concentrada por ano (R\$); |
| 9% | Alíquota de contribuição social sobre o lucro líquido (CSLL); |
| 25% | Alíquota de imposto de renda (IR). |

4.6.1.6 *Custo de eletricidade e soda cáustica do concentrador de vinhaça*

Para o cálculo do custo com eletricidade do concentrador, multiplica-se a potência do concentrador pelo número de concentradores da usina, horas de safra e o preço do MWh, como pode ser observado na equação (32), elaborado pelo autor.

$$C_{\text{eletricidade/concentrador}} = \text{Pot}_{\text{concentrador}} \times N_{\text{concentradores}} \times \text{Horas de safra} \times P_{\text{MWh}} \quad (32)$$

Aonde:

| | |
|----------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| $C_{\text{eletricidade/concentrador}}$ | Custo anual de eletricidade do concentrador (R\$/MWh); |
| $\text{Pot}_{\text{concentrador}}$ | Potência elétrica do concentrador (MW); |
| $N_{\text{concentradores}}$ | Número de concentradores; |
| Horas de safra | Horas de safra no período (h); |

P_{MWh} Preço do MWh no ACR (R\$/MWh).

No que tange ao custo de soda cáustica, para limpeza interna do concentrador, usa-se 30 m³/semana de soda a 3%, o custo desse insumo é calculado pela equação (33), elaborada pelo autor.

$$C_{\text{sodacáustica/ano}} = 30 \times N_{\text{semana/ano}} \times N_{\text{concentradores}} \times P_{\text{sodacáustica}} \quad (33)$$

Aonde:

| | |
|-------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| $C_{\text{sodacáustica/ano}}$ | Custo anual de soda cáustica (R\$/ano); |
| 30 | Volume semanal de soda cáustica para limpeza (m ³ /semana); |
| $N_{\text{semana/ano}}$ | Número de semanas no ano; |
| $N_{\text{concentradores}}$ | Número de concentradores na usina; |
| $P_{\text{sodacáustica}}$ | Preço da soda cáustica no mercado (R\$). |

Por fim, para elaboração dos indicadores financeiros, considerou um tempo de vida útil do projeto em 20 anos, preço do MWh em R\$ 251,00, soda cáustica em R\$170,41 e uma taxa de atratividade mínima de 15% ao ano (UNICA, 2014; POVEDA, 2014).

4.6.2 Análise energética concentrador de vinhaça

A análise energética do concentrador de vinhaça foi realizado com base nas equações apresentados por Poveda (2014) e Moraes et al. (2014), com o objetivo de construir o indicador energético deste cenário, a partir do consumo de Diesel anual com o transporte de vinhaça concentrada, balanço de energia consumida pelo Diesel por ano, balanço de geração e consumo de eletricidade e equivalente populacional de geração de eletricidade de vinhaça biodigerida, para uma faixa de produção de 500 até 4.000 metros cúbicos de etanol por dia.

Nesse sentido, as equações utilizadas na presente dissertação, para construção dos indicadores e posterior comparação são indicados a seguir.

A energia consumida pelo Diesel, em terajoules anuais, na operacionalização transporte de vinhaça concentrada, pelos caminhões 2318, é dado pela equação (34) de acordo com Poveda (2014).

$$Q_{\text{Diesel/ano}} = C_{\text{Diesel/ano/vc}} \times PCI_{\text{Diesel}} \quad (34)$$

Aonde:

| | |
|------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| $Q_{\text{Diesel/ano}}$ | Energia consumida do Diesel por ano (TJ/ano); |
| $C_{\text{Diesel/ano/vc}}$ | Consumo de Diesel anual com transporte de vinhaça concentrada (m^3); |
| $\text{PCI}_{\text{Diesel}}$ | Poder Calorífico inferior do Diesel (kJ/litro). |

No que se refere ao consumo anual de energia elétrica pelo concentrador de vinhaça, em MWh, é dado pela equação (35), de acordo com Citrotec (2017).

$$C_{\text{MWh concentradores/ano}} = N_{\text{concentradores}} \times P_{\text{concentrador}} \times \text{Horas de safra} \quad (35)$$

Aonde:

| | |
|-------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| $C_{\text{MWh concentradores/ano}}$ | Consumo anual de eletricidade do concentrador (MWh/ano); |
| $N_{\text{concentradores}}$ | Número de concentradores; |
| $P_{\text{concentrador}}$ | Potência do concentrador (MW); |
| Horas de safra | Horas de safra (h). |

4.6.3 Análise ambiental do concentrador de vinhaça

A análise ambiental do concentrador de vinhaça foi realizado com base nas equações apresentadas por Poveda (2014) e Moraes et al. (2014), com o objetivo de construir indicadores ambientais deste cenário: equivalente populacional após a concentração de vinhaça, balanço de emissão e mitigação de NO_x , SO_x e CO_2 eq. pelo concentrador e transporte de vinhaça concentrada com Diesel S 500 (t/ano). Nesse sentido, as equações utilizadas na presente dissertação, para construção dos indicadores para uma faixa de produção de 500 até 4.000 metros cúbicos de etanol por dia são apresentados a seguir.

O equivalente populacional, é um parâmetro utilizado para poder comparar a capacidade de poluição de vinhaça com o esgoto gerado nos centros urbanos, a partir de seu número de habitantes. No que se refere ao equivalente populacional, referente a vinhaça concentrada, pode ser encontrada a partir da equação (36), de acordo com Moraes et al. (2014).

$$\text{EP}_{\text{vc}} = (F_{\text{vc}} \times \text{DQO}_{\text{vc}}) \div (\text{DQO}_{\text{esgoto}} \times \text{MC}_{\text{habitante}} \times C_{\text{pce}}) \quad (36)$$

Aonde:

| | |
|------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| EP_{vc} | Equivalente populacional após a concentração de vinhaça (habitantes); |
| F_{vc} | Fluxo de vinhaça pós concentração (litros/dia); |
| DQO_{vc} | DQO de vinhaça (kg/m^3); |
| DQO_{esgoto} | DQO de água de esgoto (kg/m^3); |
| $MC_{habitante}$ | Média de consumo de água por habitante (litros/ habitante); |
| C_{pce} | Contribuição per capita de esgoto. |

No que se refere a emissão anual de óxidos de nitrogênio, em toneladas, pelo concentrador de vinhaça em sua operacionalização ao ano, é dado pela equação (37), de acordo com Poveda (2014).

$$NO_{x \text{ concentrador/ano}} = F_{NOX} \times C_{MWh \text{ concentradores/ano}} \quad (37)$$

Aonde:

| | |
|--------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| $NO_{x \text{ concentrador/ano}}$ | Emissão de NO_x pelo concentrador (t/ano); |
| F_{NOX} | Fator de emissão de NO_x por consumo de eletricidade (g/MWh); |
| $C_{MWh \text{ concentradores/ano}}$ | Consumo de eletricidade pelo concentrador (MWh/ano). |

A emissão anual de óxidos de nitrogênio, em toneladas, no transporte de vinhaça concentrada da usina até os locais de aplicação pelos caminhões 2318, com Diesel S 500 é dado pela equação (38), de acordo com Poveda (2014).

$$NO_{x \text{ transporte vc/ano}} = F_{NOX/km} \times km_{ano/caminhão 2318} \quad (38)$$

Aonde:

| | |
|----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| $NO_{x \text{ transporte vc/ano}}$ | Emissão de NO_x transporte de vinhaça concentrada com Diesel S500 (t/ano); |
| $F_{NOX/km}$ | Fator de emissão de NO_x por kilometro percorrido (g/km); |
| $km_{ano/frota \text{ caminhão 2318}}$ | kilometragem total percorrida pela frota de caminhões 2318 no ano (km). |

No balanço de emissão e mitigação de NO_x pelo concentrador e transporte de vinhaça concentrada com Diesel S 500 (t/ano), não há mitigação da emissão de NO_x , nesse sentido, as emissões dos óxidos de nitrogênio, seja pelo concentrador, como também, pelos caminhões 2318, é dado pela equação (39) de acordo com Poveda (2014).

$$\text{Balanço}_{\text{NO}_x \text{ concentrador/ano}} = \text{NO}_x \text{ concentrador} + \text{NO}_x \text{ transporte vc} \quad (39)$$

Aonde:

| | |
|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\text{Balanço}_{\text{NO}_x \text{ concentrador/ano}}$ | Balanço de emissão e mitigação de NO_x pelo concentrador e transporte de vinhaça concentrada com Diesel S 500 (t/ano); |
| $\text{NO}_x \text{ concentrador}$ | Emissão de NO_x pelo concentrador (t/ano); |
| $\text{NO}_x \text{ transporte vc}$ | Emissão de NO_x transporte de vinhaça concentrada com Diesel S500 (t/ano). |

A emissão anual, em toneladas de óxidos de enxofre, pelo concentrador de vinhaça, é dada pela equação (40), de acordo com Poveda (2014).

$$\text{SO}_x \text{ concentrador/ano} = F_{\text{SO}_x} \times C_{\text{MWh concentradores/ano}} \quad (40)$$

Aonde:

| | |
|----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| $\text{SO}_x \text{ concentrador/ano}$ | Emissão de SO_x pelo concentrador (t/ano); |
| F_{SO_x} | Fator de emissão de SO_x por consumo de eletricidade (g/MWh); |
| $C_{\text{MWh concentradores/ano}}$ | Consumo de eletricidade pelo concentrador (MWh/ano). |

A emissão anual de óxidos de enxofre, em toneladas, no transporte de vinhaça concentrada pelos caminhões 2318, com Diesel S 500 é descrito na equação (41), de acordo com Poveda (2014).

$$\text{SO}_x \text{ transporte vc/ano} = D_{\text{Diesel}} \times S_{\text{Diesel}} \times C_{\text{Diesel/ano/vc}} \quad (41)$$

Aonde:

| | |
|-----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| $\text{SO}_x \text{ transporte vc/ano}$ | Emissão de SO_x no transporte de vinhaça concentrada com Diesel S500 (t/ano); |
|-----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|

| | |
|----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| D_{Diesel} | Densidade do Diesel (kg/m^3); |
| S_{Diesel} | Quantidade SO_x por massa de Diesel (t/kg de Diesel); |
| $C_{\text{Diesel/ano/vc}}$ | Consumo de Diesel anual com transporte de vinhaça concentrada (m^3). |

No que se refere ao balanço de emissão e mitigação de SO_x pelo concentrador e transporte de vinhaça concentrada, com Diesel S 500 (t/ano), não há mitigação da emissão desse gás, nesse sentido, o volume das emissões anuais, dos óxidos de enxofre, seja pelo concentrador, como também, pelos caminhões 2318 com Diesel S 500 é dado pela equação (42), de acordo com Poveda (2014).

$$\text{Balanço } \text{SO}_x \text{ concentrador/anual} = \text{SO}_x \text{ concentrador} + \text{SO}_x \text{ transporte vc} \quad (42)$$

Aonde:

| | |
|----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\text{Balanço } \text{SO}_x \text{ concentrador/anual}$ | Balanço de emissão e mitigação de SO_x pelo concentrador e transporte de vinhaça concentrada com Diesel S 500 (t/ano); |
| $\text{SO}_x \text{ concentrador}$ | Emissão de SO_x pelo concentrador (t/ano); |
| $\text{SO}_x \text{ transporte vc}$ | Emissão de SO_x transporte de vinhaça concentrada com Diesel S500 (t/ano). |

As emissões anuais de dióxido de carbono, em toneladas equivalentes, pelo concentrador de vinhaça, é fornecida pela equação (43), de acordo com Poveda (2014).

$$\text{CO}_2 \text{ eq. concentrador/ano} = F_{\text{CO}_2 \text{ eq.}} \times C_{\text{MWh concentradores/ano}} \quad (43)$$

Aonde:

| | |
|---------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| $\text{CO}_{2\text{eq}} \text{ concentrador/ano}$ | Emissão de $\text{CO}_2 \text{ eq.}$ pelo concentrador (t/ano); |
| $F_{\text{CO}_2\text{eq}}$ | Fator de emissão de $\text{CO}_2 \text{ eq.}$ por consumo de eletricidade (g/MWh); |
| $C_{\text{MWh concentradores/ano}}$ | Consumo de eletricidade pelo concentrador (MWh/ano). |

As emissões anuais equivalentes em toneladas de dióxido de carbono no transporte de vinhaça concentrada com Diesel S 500 é dada pela equação (44), de acordo com Poveda (2014).

$$\text{CO}_2 \text{ eq. transporte vc/ano} = D_{\text{Diesel}} \times \text{CO}_2 \text{ eq. Diesel} \times C_{\text{Diesel/ano/vc}} \quad (44)$$

Aonde:

| | |
|---------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\text{CO}_2 \text{ eq./transporte vc/ano}$ | Emissão de $\text{CO}_2 \text{ eq.}$ no transporte de vinhaça concentrada com Diesel S500 (t/ano); |
| D_{Diesel} | Densidade do Diesel (kg/m^3); |
| $\text{CO}_2 \text{ eq. Diesel}$ | Quantidade $\text{CO}_2 \text{ eq. Diesel}$ por massa de Diesel (t/kg de Diesel); |
| $C_{\text{Diesel/ano/vc}}$ | Consumo de Diesel anual com transporte de vinhaça concentrada (m^3). |

Logo, o balanço de emissão e mitigação de $\text{CO}_2 \text{ eq.}$ pelo concentrador e transporte de vinhaça concentrada, com Diesel S 500 (t/ano), não há mitigação da emissão de CO_2 equivalente, nesse sentido, o volume das emissões anuais do dióxido de carbono equivalente, seja pelo concentrador, como também pelos caminhões 2318, com Diesel S 500 é dado pela equação (45), de acordo com Poveda (2014).

$$\text{Balanço } \text{CO}_2 \text{ eq. concentrador/ano} = \text{CO}_2 \text{ eq. concentrador} + \text{CO}_2 \text{ eq. transporte vc} \quad (45)$$

Aonde:

| | |
|-------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Balanço $\text{CO}_2 \text{ eq.}$ concentrador/ano | Balanço de emissão e mitigação de $\text{CO}_2 \text{ eq.}$ pelo concentrador e transporte de vinhaça concentrada com Diesel S 500 (t/ano); |
| $\text{CO}_2 \text{ eq. concentrador}$ | Emissão de $\text{CO}_2 \text{ eq.}$ pelo concentrador (t/ano); |
| $\text{CO}_2 \text{ eq. transporte vc}$ | Emissão de $\text{CO}_2 \text{ eq.}$ no transporte de vinhaça concentrada com Diesel S500 (t/ano). |

4.7 Biodigestor anaeróbio de circulação interna

4.7.1 Análise de viabilidade econômica do biodigestor de vinhaça

Para o cálculo da análise de viabilidade econômica financeira do biodigestor de vinhaça, foi elaborado com base em Procknor (2009), Moraes et al. (2014) e Poveda (2014), aonde foi utilizado como base digestores anaeróbios de circulação interna, conjugados com o sistema de dessulfurificador, de acordo com os autores supracitados, ambos os processos custam de R\$ 85,00 por kg de DQO aplicada por dia.

No que se refere aos geradores de eletricidade, foi utilizado motor de combustão interna, com eficiência de 38% na geração de eletricidade, de acordo com Procknor (2009), Moraes et al. (2014) e Poveda (2014), custam R\$ 1.700,00/kW instalado, inclusive com o complexo de resfriamento de água.

Os custos de operação e manutenção dos digestores anaeróbios estão estimados entre R\$ 0,016 por kg de DQO aplicada, no que se refere aos motores de combustão interna esta em torno em R\$ 40,00 por MWh (PROCKNOR, 2009; MORAES et al., 2014; POVEDA, 2014).

Obtido o valor de investimento, operação e manutenção do biodigestor, desulfurificador e motogerador, para obtenção dos valores de viabilidade econômica financeira: valor presente líquido, taxa interna de retorno, *payback* e *payback* descontado, foram levados em consideração para a dimensão receita: venda de eletricidade no ambiente de contratação regulado, venda de crédito de carbono, ausência de multas ambientais, obtenção de fertilizantes. No que se refere a vinhaça biodigerida dimensão custo foram levados em consideração: operação e manutenção do biodigestor e motogerador, já dissertado, e imposto sobre a venda de eletricidade.

4.7.1.1 Venda de eletricidade no ambiente de contratação regulado

Para a venda de eletricidade, o preço do MWh foi estimado com base no preço teto do ultimo leilão de eletricidade no ambiente de contratação regulado, realizado pela Agência Nacional de Energia Elétrica, em R\$ 251,00 (UNICA, 2014). Portanto, para o cálculo da receita de venda de eletricidade, dar-se-á pela equação (46), de acordo com Poveda (2014).

$$R_{\text{eletricidade/ano}} = P_{\text{eletricidade}} \times \text{Pot}_{\text{biodigestor}} \times \text{horas de safra} \quad (46)$$

Aonde:

| | |
|-----------------------------------|----------------------------------------------------------|
| $R_{\text{eletricidade/ano}}$ | Receita anual de venda de eletricidade no ACR (R\$/ano); |
| $P_{\text{eletricidade}}$ | Preço de eletricidade no ACR em MWh (R\$/MWh); |
| $\text{Pot}_{\text{biodigestor}}$ | Potência elétrica do biodigestor (MW); |
| horas de safra | Horas de safra no período (h). |

4.7.1.2 Receita no mercado de créditos de carbono

A receita de créditos de carbono foi elaborado com base na soma de dióxido de carbono equivalente não emitido pelo biodigestor, em toneladas por ano, juntamente com os

equivalentes em dióxido de carbono dos óxidos de nitrogênio não emitidos, também em toneladas por ano. Encontrada a somatória, multiplica-se o resultado pelo preço da tonelada de CO₂ no mercado futuro. Sendo assim, o mesmo pode ser encontrado pela equação (47), de acordo com Poveda (2014).

$$R_{\text{crédito de carbono}} = (\text{CO}_2 \text{ equivalente} + \text{NO}_x \text{ equivalente em CO}_2) \times P_{\text{CO}_2 \text{ equivalente}} \quad (47)$$

Aonde:

| | |
|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| R crédito de carbono/ano | Receita anual de crédito de carbono (R\$/ano); |
| CO ₂ equivalente | Emissões de dióxido de carbono equivalentes não emitidos (t/ano); |
| NO _x equivalente em CO ₂ | Emissões de óxidos de Nitrogênio equivalente em dióxido de carbono não emitido (t/ano); |
| P CO ₂ equivalente | Preço da tonelada de CO ₂ eq. no mercado futuro (R\$). |

4.7.1.3 Produção de fertilizantes

De acordo com Simões, Sena e Campos (2004), a vinhaça pode atuar como fertilizante substituindo os produtos comercializados para nutrição vegetal, o superfosfato triplo, uréia e cloreto de potássio. O cálculo do preço do fertilizante da vinhaça *in natura* já foi discorrido no subcapítulo 4.6.1.5 referente ao preço de fertilizante em vinhaça concentrada.

4.7.1.4 Receita por ausência de multas

De acordo com Simões, Sena e Campos (2004), a multa para o descarte inadequado de vinhaça *in natura* no solo, em valores atualizados, esta em R\$ 1.800,00, porém, na medida em que a vinhaça sofreu processo biodigestão seu índice de DQO caiu, eliminando, conseqüentemente, os riscos de poluição e destruição do solo e da coleção de águas, logo, podemos computar anualmente como crédito ausência de multas ambientais, referentes ao de descarte inadequado desse subproduto.

4.7.1.5 Impostos sobre venda de eletricidade

Como despesa além, da operação e manutenção dos biodigestores e motogeradores supracitados, é necessário computar a alíquota de imposto sobre a venda de eletricidade, aonde de acordo com Nogueira et al. (2015), esta em 6%, como pode ser exemplificado a partir da equação (48).

$$I_{\text{venda de eletricidade/ano}} = R_{\text{venda de eletricidade/ano}} \times 6\% \quad (48)$$

Aonde:

| | |
|----------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| $I_{\text{venda de eletricidade/ano}}$ | Imposto anual sobre a venda de eletricidade (R\$/ano); |
| $R_{\text{venda de eletricidade/ano}}$ | Receita anual sobre a venda de eletricidade (R\$/ano); |
| 6% | Alíquota sobre a venda de eletricidade. |

4.7.1.6 Impostos sobre a venda de fertilizantes

Para o pagamento de impostos, referente a comercialização de fertilizantes de vinhaça concentrada, foi levado em consideração o imposto sobre circulação de mercadorias e serviços (ICMS), onde no Estado de São de Paulo, é isenta, de acordo com o Ministério da Fazenda (2011), como também a contribuição social sobre o lucro líquido (CSLL), em 9% e o imposto de renda (IR) em 25%. Como pode ser ilustrado na equação (49), elaborada pelo autor.

$$I_{\text{venda/fert/vc/ano}} = F_{\text{venda/vc/ano}} \times 9\% \times 25\% \quad (49)$$

Aonde:

| | |
|--------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| $I_{\text{venda/fert/vc/ano}}$ | Imposto sobre a venda de fertilizantes de vinhaça concentrada (R\$); |
| $F_{\text{venda/vc/ano}}$ | Faturamento com venda de vinhaça concentrada por ano (R\$); |
| 9% | Alíquota de contribuição social sobre o lucro líquido; |
| 25% | Alíquota de imposto de renda. |

4.7.2 Análise energética do biodigestor de vinhaça

Para análise energética biodigestor de circulação interna de vinhaça, foi realizado com base nas equações apresentados por Procknor (2008), Poveda (2014) e Moraes et al. (2014), com o objetivo de construir o indicador energético deste cenário, a partir do consumo de Diesel anual com transporte de vinhaça biodigerida, balanço de energia gerada pelo biogás por ano, balanço de geração e consumo de eletricidade e equivalente populacional de geração de eletricidade de vinhaça biodigerida, capacidade de substituição de combustíveis como Diesel, gasolina e etanol no transporte de vinhaça biodigerida, como também na quantidade de bagaço que pode ser destinado para produção de etanol celulósico, para uma faixa de

produção de 500 até 4.000 metros cúbicos de etanol por dia, como também para a produção de etanol por estado brasileiro na safra 2015/2016, de acordo com UNICA (2017).

Nesse sentido, as equações utilizadas na presente dissertação para construção dos indicadores e posterior comparação estão indicados a seguir.

Para o cálculo do consumo de Diesel, para os três modais de transporte de vinhaça, é dado pela equação (50), adaptado de Macedo et al. (2004) e Poveda (2014).

$$\text{Cons}_{\text{Diesel/ano/vin}} = ((\text{VV}_{\text{dia/MB}} \div 7,5) + ((\text{NV}_{2318} \times 6,36) + (\text{NV}_{\text{VR}} \times 18,46) + (\text{VV}_{\text{dia/VR}} \div 7,5)) \times \text{Dias de safra} \quad (50)$$

Aonde:

| | |
|---------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\text{Cons}_{\text{Diesel/ano/vin}}$ | Consumo anual de Diesel no transporte de vinhaça <i>in natura</i> (litros/ano); |
| $\text{VV}_{\text{dia/MB}}$ | Volume de vinhaça transportado por dia por moto bomba (m^3/dia); |
| 7,5 | Volume de vinhaça bombeada em m^3 por consumo de um litro de Diesel de Motor MB OM 352 160 CV e Bomba EQ 9048 (m^3); |
| NV_{2318} | Número de viagens realizadas pelo caminhão 2318 por dia; |
| 6,36 | Volume de Diesel consumido pelo caminhão 2318 em uma viagem no transporte de vinhaça concentrada (litros/viagem); |
| NV_{VR} | Número de viagens realizadas pelos caminhões Volvo rodotrem por dia; |
| 18,46 | Volume de Diesel consumido pelo caminhão Volvo rodotrem em uma viagem no transporte de vinhaça concentrada (litros/viagem); |
| $\text{VV}_{\text{dia/vr}}$ | Volume de vinhaça transportado pelo caminhão Volvo rodotrem em um dia (m^3/dia); |
| Dias de safra | Dias de safra no ano. |

Conhecido a quantidade de Diesel consumida no transporte de vinhaça biodigerida, a energia consumida pelo Diesel, em terajoules anuais, na operacionalização do transporte pelos caminhões 2318, caminhões rodotrens e pela motobomba com canal direto é dado pela equação (51), de acordo com Poveda (2014).

$$Q_{\text{Diesel/ano}} = C_{\text{Diesel/ano/vb}} \times \text{PCI}_{\text{Diesel}} \quad (51)$$

Aonde:

| | |
|------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| $Q_{\text{Diesel/ano}}$ | Energia proveniente consumida do Diesel por ano (TJ/ano); |
| $C_{\text{Diesel/ano/vc}}$ | Consumo de Diesel anual com transporte de vinhaça biodigerida (m^3); |
| $\text{PCI}_{\text{Diesel}}$ | Poder Calorífico Inferior do Diesel (kJ/litro). |

No que se refere ao consumo anual de energia elétrica do biodigestor de circulação interna, de acordo com Procknor (2008), está em torno de 10% da eletricidade gerada pelo motogerador, a partir da relação multiplicativa entre potência do biodigestor e os dias de safra. O mesmo é descrito na equação (52), de acordo com Procknor (2008), Moraes et al. (2014) e Poveda (2014).

$$C_{\text{MWh/ano biodigestor}} = P_{\text{biodigestor}} \times \text{Dias de safra} \quad (52)$$

Aonde:

| | |
|----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| $C_{\text{MWh/ano biodigestor}}$ | Consumo anual de eletricidade na biodigestão (MWh/ano); |
| $P_{\text{biodigestor}}$ | Potência elétrica do biodigestor (200 kW para cada 4.000 m^3 de vinhaça); |
| Dias de safra | Dias de safra. |

O volume de biogás produzido, em metros cúbicos por ano, pelo biodigestor IC com vinhaça é dado pela equação (53) de acordo com Poveda (2014).

$$V_{\text{biogás/ano}} = V_{\text{vinhaça/ano}} \times V_{\text{biogás/vinhaça}} \quad (53)$$

Aonde:

| | |
|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| $V_{\text{biogás/ano}}$ | Volume de biogás produzido (m^3/ano); |
| $V_{\text{vinhaça/ano}}$ | Volume de vinhaça produzida por ano (m^3/ano); |
| $V_{\text{biogás/vinhaça}}$ | Volume de biogás produzido por m^3 de vinhaça (Nm^3/m^3). |

A energia térmica anual gerada pela queima do biogás, em terajoules anuais, para geração de eletricidade, debitado o volume de biogás vazado do sistema biodigestor IC e motogerador, é dado pela equação (54), de acordo com Poveda (2014).

$$Q_{\text{biogás/ano}} = V_{\text{biogás/ano}} \times (1 - V_{\text{biogás/ano vazado}}) \times \text{PCI}_{\text{biogás}} \quad (54)$$

Aonde:

| | |
|--------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| $Q_{\text{biogás/ano}}$ | Energia térmica produzida pelo biogás ano (TJ/ano); |
| $V_{\text{biogás/ano}}$ | Volume de biogás produzido (m^3/ano); |
| $V_{\text{biogás/ano vazado}}$ | Porcentagem de volume de biogás vazado; |
| $\text{PCI}_{\text{biogás}}$ | Poder Calorífico Inferior do biogás (kJ/Nm^3). |

A eletricidade anual fornecida pelo sistema biodigestor IC e motogerador, em MWh, é dado pela geração de eletricidade do sistema subtraído pelo consumo anual de energia elétrica no processo de biodigestão, o mesmo é dado pela equação (55), de acordo com Poveda (2014).

$$EE_{\text{exp/ano}} = (Q_{\text{biogás/ano}} \times \eta_{\text{motor}}) - C_{\text{eletricidade/biodigestor}} \quad (55)$$

Aonde:

| | |
|---------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| $EE_{\text{exp/ano}}$ | Energia elétrica exportada por ano (MWh/ano); |
| $Q_{\text{biogás/ano}}$ | Energia térmica produzida pelo biogás (MWh); |
| η_{motor} | Rendimento termoelétrico do motor; |
| $C_{\text{eletricidade/biodigestor}}$ | Consumo anual de eletricidade na biodigestão (MWh/ano). |

A potência elétrica necessária do motogerador, utilizado na geração de eletricidade a partir de vinhaça, é dado pela equação (56), de acordo com Poveda (2014).

$$P_{\text{eletrico instalado}} = (Q_{\text{biogás/ano}} \times \eta_{\text{motor}}) \div \text{Horas de safra} \quad (56)$$

Aonde:

| | |
|---------------------------------|----------------------------------------------|
| $P_{\text{eletrico instalado}}$ | Potência elétrica de geração instalada (MW); |
| $Q_{\text{biogás/ano}}$ | Energia térmica produzida pelo biogás (MWh); |
| η_{motor} | Rendimento termoelétrico do motor; |
| Horas de safra | Horas de safra (h). |

O equivalente populacional na geração de eletricidade dimensiona o número de habitantes de uma cidade no qual o sistema biodigestor IC e motogerador pode fornecer

eletricidade por um ano, a partir do consumo per capita por habitante. Nesse sentido, o equivalente populacional de geração de energia elétrica a partir de vinhaça, é dado pela equação (57), de acordo com Moraes et al. (2014).

$$EP_{vb} = EE_{exp/ano} \times CE_{per\ capita} \quad (57)$$

Aonde:

| | |
|--------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| EP_{vb} | Equivalente populacional de geração de eletricidade de vinhaça biodigerida (habitantes); |
| $EE_{exp/ano}$ | Energia elétrica exportada por ano (MWh/ano); |
| $CE_{per\ capita}$ | Consumo de eletricidade residencial per capita anual no Brasil (MWh/ano). |

Para o cálculo da potencialidade de substituição do bagaço, a partir da energia elétrica gerada pelo biogás de vinhaça, e consequente, destinação do bagaço para aumento produção de etanol celulósico, de acordo com Alves (2006), pode ser calculado a partir da seguinte equação (58).

$$Q_{bs} = EE_{exp/ano} \times 6,5 \quad (58)$$

Aonde:

| | |
|----------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| Q_{bs} | Quantidade de bagaço substituído pela eletricidade gerada por biogás de vinhaça (t/ano); |
| $EE_{exp/ano}$ | Energia elétrica exportada por ano (MWh/ano); |
| 6,5 | Quantidade de bagaço em toneladas para geração de 1 MWh. |

No que se refere a produção de etanol de segunda geração, a partir da quantidade de bagaço substituída pela eletricidade gerada pelo biogás de vinhaça, de acordo com Santos (2012) pode ser calculada a partir da seguinte (59).

$$Q_{ecp} = Q_{bs} \times 0,227 \quad (59)$$

Aonde:

| | |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| Q_{ecp} | Quantidade de etanol celulósico produzido a partir de biomassa substituída (m^3); |
| Q_{bs} | Quantidade de bagaço substituído pela eletricidade gerada por biogás de vinhaça (t/ano); |
| 0,227 | Quantidade de etanol celulósico produzido a partir de 1 tonelada de bagaço. |

No que se refere ao potencial substituição do Diesel, gasolina e etanol, a partir do biogás de vinhaça, de acordo com Moraes et al. (2014) se da a partir das seguintes equações:

$$Q_{ds} = V_{\text{biogás/ano}} \times 0,00055 \quad (60)$$

Aonde:

| | |
|-------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Q_{ds} | Quantidade de Diesel substituído (m^3 /ano); |
| $V_{\text{biogás/ano}}$ | Volume de biogás produzido (m^3 /ano); |
| 0,00055 | Quantidade equivalente de energia de Diesel, em metros cúbicos, para 1 metro cúbico de biogás. |

Logo, no que se refere a quantidade de caminhões médios que o biogás pode abastecer em substituição ao Diesel, pode ser encontrado a partir da equação (61), de acordo com Moraes et al. (2014).

$$Q_{cm} = Q_{ds} \times 12,085 \quad (61)$$

Aonde:

| | |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Q_{cm} | Quantidade caminhões médios abastecidos por biogás por ano; |
| Q_{ds} | Quantidade de Diesel substituído (m^3 /ano); |
| 12,085 | Consumo de Diesel por um caminhão médio com eficiência de 5,6 km por litro de Diesel, com média de uso de 188 km por dia em 360 dias. |

No que se refere a gasolina, de acordo com Moraes et al. (2014), se da a partir da equação (62).

$$Q_{gs} = V_{\text{biogás/ano}} \times 0,00061 \quad (62)$$

Aonde:

| | |
|-------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Q_{gs} | Quantidade de gasolina substituída (m ³ /ano); |
| $V_{\text{biogás/ano}}$ | Volume de biogás produzido (m ³ /ano); |
| 0,00061 | Quantidade equivalente de energia de gasolina em metros cúbicos para 1 metro cúbico de biogás. |

Logo, no que se refere a quantidade de carros que o biogás pode abastecer em substituição a gasolina, pode ser encontrado a partir da equação (63), de acordo com Moraes et al. (2014).

$$Q_c = Q_{gs} \times 1,5 \quad (63)$$

Aonde:

| | |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Q_c | Quantidade de carros flex abastecidos por biogás por ano; |
| Q_{gs} | Quantidade de gasolina substituída (m ³ /ano); |
| 1,5 | Consumo de gasolina por um carro flex com eficiência de 12 km por litro de gasolina, com média de uso de 50 km por dia em 360 dias. |

No que se refere ao etanol, de acordo com Moraes et al. (2014), se da a partir da equação (64).

$$Q_{es} = V_{\text{biogás/ano}} \times 0,00079 \quad (64)$$

Aonde:

| | |
|-------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| Q_{es} | Quantidade de etanol substituído (m ³ /ano); |
| $V_{\text{biogás/ano}}$ | Volume de biogás produzido (m ³ /ano); |
| 0,00079 | Quantidade equivalente de energia de etanol, em metros cúbicos para 1 metro cúbico de biogás. |

Logo, no que se refere a quantidade de carros flex que o biogás pode abastecer, em substituição ao etanol, pode ser encontrado a partir da equação (65), de acordo com Moraes et al. (2014).

$$Q_c = Q_{es} \times 2,25 \quad (65)$$

Aonde:

| | |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Q_c | Quantidade carros flex abastecidos por biogás por ano; |
| Q_{es} | Quantidade de etanol substituído (m^3 /ano); |
| 2,25 | Consumo de etanol por um carro flex com eficiência de 8,0 km por litro de etanol, com média de uso de 50 km por dia em 360 dias. |

A eletricidade anual fornecida pelo sistema biodigestor IC e motogerador em MWh, com completa substituição de Diesel no transporte de vinhaça biodigerida, é dado pela equação (66), de acordo com Poveda (2014).

$$EE_{exp/ano} = ((Q_{biogás/ano} - Q_{biogás/Diesel/transp\ vb}) \times \eta_{motor}) - C_{eletricidade/biodigestor} \quad (66)$$

Aonde:

| | |
|--------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $EE_{exp/ano}$ | Energia elétrica exportada por ano (MWh/ano); |
| $Q_{biogás/ano}$ | Energia térmica produzida pelo biogás (MWh); |
| $Q_{biogás/Diesel/transp\ vb}$ | Energia térmica de biogás destinada à substituição do no transporte de vinhaça biodigerida (MWh); |
| η_{motor} | Rendimento termoelétrico do motor; |
| $C_{eletricidade/biodigestor}$ | Consumo anual de eletricidade na biodigestão (MWh/ano). |

4.7.3 Análise Ambiental do biodigestor de vinhaça

Para análise ambiental do biodigestor de circulação interna de vinhaça foi realizado com base nas equações apresentados por Poveda (2014) e Moraes et al. (2014), com o objetivo de construir o indicadores ambientais deste cenário, equivalente populacional de vinhaça biodigerida, balanço de emissão e mitigação de NO_x , SO_x e CO_2 eq. pelo motogerador, balanço de emissão e mitigação de SO_x pelo motogerador para faixa de produção de 500 até 4.000 metros cúbicos de etanol por dia, como também a mitigação de emissão de SO_x para a produção de etanol por estado brasileiro na safra 2015/2016, de acordo com UNICA (2017).

Nesse sentido, as equações utilizadas na presente dissertação para construção dos indicadores supracitados e posterior comparação são indicados a seguir.

Para Moraes et al. (2014), o equivalente de poluição potencial gerado a partir de vinhaça, pelas usinas sucroenergéticas, e o número de habitantes que um centro urbano que produzem a mesma quantidade de carga orgânica, a demanda química de oxigênio. No que se refere ao equivalente populacional de vinhaça biodigerida, pode ser encontrada a partir da equação (67).

$$EP_{vb} = (F_{vb} \times DQO_{vb}) \div (DQO_{esgoto} \times MC_{habitante} \times C_{pce}) \quad (67)$$

Aonde:

| | |
|------------------|----------------------------------------------------------------------|
| EP_{vc} | Equivalente populacional após a biodigestão de vinhaça (habitantes); |
| F_{vb} | Fluxo de vinhaça após a biodigestão de vinhaça (litros/dia); |
| DQO_{vb} | DQO de vinhaça (kg/m^3); |
| DQO_{esgoto} | DQO de água de esgoto (kg/m^3); |
| $MC_{habitante}$ | Média de consumo de água por habitante (litros/ habitante); |
| C_{pce} | Contribuição per capita de esgoto. |

A emissão anual de óxidos de nitrogênio, em toneladas, no transporte de vinhaça biodigerida da usina até os locais de aplicação pelos caminhões 2318, Volvo rodotrens e pela motobomba com canal de montagem direta, com Diesel S 500, é dada pela equação (68), adaptado de Macedo et al. (2004) e Poveda (2014).

$$NO_{x \text{ transporte vc/ano}} = (F_{NOX/km} \times km_{ano/caminhão 2318}) + (F_{NOX/km} \times km_{ano/caminhão vr}) + (Pot_{mb} \times F_{NOX/Pot}) \quad (68)$$

Aonde:

| | |
|------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| $NO_{x \text{ transporte vc/ano}}$ | Emissão de NO_x transporte de vinhaça concentrada, com Diesel S500 (t/ano); |
| $F_{NOX/km/2318}$ | Fator de emissão de NO_x , por kilometro percorrido pelos caminhões 2318 (g/km); |
| $km_{ano/2318}$ | Kilometragem total percorrida pela frota de caminhões 2318 no ano (km); |
| $F_{NOX/km/vr}$ | Fator de emissão de NO_x , por kilometro percorrido pelos caminhões Volvo rodotrem (g/km); |

| | |
|-----------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| $Km_{ano/2318}$ | Kilometragem total percorrida pela frota de caminhões Volvo rodorens no ano (km); |
| Pot_{mb} | Potência da motobomba com canal de montagem direta (kWh); |
| $F_{NOX/Pot}$ | Fator de emissão de NO_x por kilowatt hora, consumido pelos pela moto bomba (g/kWh). |

A emissão de NO_x , por ano, no motogerador de biogás (tNO_x/ano) em sua operacionalização para geração de eletricidade, o mesmo emite óxidos de nitrogênio no processo de queima do biogás, sua quantificação é dada pela equação (69), de acordo com Poveda (2014).

$$NO_x \text{ motogerador/ano} = F_{NOX} \times Q_{\text{biogás/ano}} \quad (69)$$

Aonde:

| | |
|--------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| $NO_x \text{ motogerador/ano}$ | Emissão de NO_x pelo motogerador (t/ano); |
| F_{NOX} | Fator de emissão NO_x do motogrador de biogás (kg NO_x/TJ); |
| $Q_{\text{biogás/ano}}$ | Energia térmica produzido pelo biogás por ano (TJ/ano). |

No que se refere quantidade anual de óxidos de nitrogênio evitados, em toneladas anuais, a partir a utilização de vinhaça para produção de biogás, no biodigestor IC, e posterior geração de eletricidade pelo motogerador, é fornecido pela equação (70) de acordo com Poveda (2014).

$$NO_x \text{ evitado} = F_{NOx \text{ evitado}} \times GE_{MWh/ano} \quad (70)$$

Aonde:

| | |
|---------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $NO_x \text{ evitado}$ | Emissão de NO_x evitada a partir do uso de vinhaça para geração de eletricidade (tNO_x/ano); |
| $F_{NOx \text{ evitado}}$ | Fator de NO_x evitado a partir da geração de eletricidade (g/MWh); |
| $GE_{MWh/ano}$ | Geração de eletricidade (MWh/ano). |

No que se refere a emissão de NO_x , evitada a partir do uso de vinhaça, para geração de eletricidade equivalente em CO_2 ($\text{tCO}_{2\text{eq}}/\text{ano}$), para posterior cálculo de crédito de carbono é exemplificada pela equação (71), de acordo com Poveda (2014).

$$\text{CO}_{2\text{ eq. NOx}} = \text{NO}_{x\text{ evitado}} \times 296 \quad (71)$$

Aonde:

| | |
|--------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\text{CO}_{2\text{ eq. NOx}}$ | Emissão de NO_x evitada a partir do uso de vinhaça para geração de eletricidade equivalente em CO_2 ($\text{tCO}_{2\text{eq}}/\text{ano}$); |
| $\text{NO}_{x\text{ evitado}}$ | Emissão de NO_x evitada a partir do uso de vinhaça para geração de eletricidade (tNO_x/ano); |
| 296 | Equivalente de CO_2 para 1 tonelada de NO_x . |

O balanço de emissão e mitigação de óxidos de nitrogênio, em toneladas por ano, no sistema biodigestor e motogerador se deu pela subtração da emissão de NO_x , pela queima do biogás, pelos óxidos de nitrogênio não emitidos no processo de geração de eletricidade a partir de vinhaça. O mesmo é calculado a partir da equação (72), de acordo com Poveda (2014).

$$\text{Balanço NOx biodigestor} = (\text{NO}_{x\text{ motogerador}} + \text{NO}_{x\text{ transporte/vb}}) - \text{NO}_{x\text{ evitado}} \quad (72)$$

Aonde:

| | |
|--------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\text{Balanço NOx biodigestor}$ | Balanço de emissão e mitigação de NO_x pelo motogerador e geração de eletricidade a partir de vinhaça (t/ano); |
| $\text{NO}_{x\text{ motogerador}}$ | Emissão de NO_x pelo motogerador (t/ano); |
| $\text{NO}_{x\text{ transporte/vb}}$ | Emissão de NO_x no transporte de vinhaça biodigerida (t/ano) |
| $\text{NO}_{x\text{ evitado}}$ | Emissão de NO_x evitada a partir do uso de vinhaça para geração de eletricidade (TNO_x/ano). |

A emissão anual de óxidos de enxofre, em toneladas por ano, no transporte de vinhaça biodigerida pelos caminhões 2318, Volvo rodotrens e pela motobomba com canal de montagem direta, com Diesel S 500, é descrito na equação (73), de acordo com Poveda (2014).

$$SO_x \text{ transporte vb/ano} = D_{\text{Diesel}} \times S_{\text{Diesel}} \times C_{\text{Diesel/ano/vb}} \quad (73)$$

Aonde:

| | |
|----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| $SO_x \text{ transporte vb/ano}$ | Emissão de SO_x no transporte de vinhaça biodigerida com Diesel S500 (t/ano); |
| D_{Diesel} | Densidade do Diesel (kg/m^3); |
| S_{Diesel} | Quantidade SO_x por massa de Diesel (t/kg de Diesel); |
| $C_{\text{Diesel/ano/vc}}$ | Consumo de Diesel anual com transporte de vinhaça concentrada (m^3). |

A quantificação da emissão anual de óxidos de enxofre, no processo de queima do biogás, pelo motogerador em (tSO_2 /ano) para geração de eletricidade, é dado pela equação (74), de acordo com Poveda (2014).

$$SO_x \text{ motogerador} = V_{\text{biogás/ano}} \times (1 - V_{\text{biogás/ano vazado}}) \times [H_2S] \times (M_{SO_2} \div M_{H_2S}) \quad (74)$$

Aonde:

| | |
|--------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| $SO_x \text{ motogerador}$ | Emissão de SO_x por ano no motogerador de biogás (tSO_2 /ano); |
| $V_{\text{biogás/ano}}$ | Volume de biogás produzido por ano (m^3 /ano); |
| $V_{\text{biogás/ano vazado}}$ | Porcentagem de volume de biogás vazado; |
| $[H_2S]$ | Concentrador de H_2S no biogás (mg/m^3); |
| M_{SO_2} | Massa molecular do H_2S (g/M); |
| M_{H_2S} | Massa molecular do SO_2 (g/M). |

A emissão de SO_x (tSO_2 /ano) evitada, a partir do uso de vinhaça, para geração de eletricidade a partir do biodigestor de circulação interna e posterior geração de eletricidade pelo motogerador, é fornecido pela equação (75), de acordo com Poveda (2014).

$$SO_x \text{ evitado} = F_{SO_x \text{ evitado}} \times GE_{\text{MWh/ano}} \quad (75)$$

Aonde:

| | |
|------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $SO_x \text{ evitado}$ | Emissão de SO_x evitada a partir do uso de vinhaça para geração de eletricidade (tSO_x /ano); |
|------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|

| | |
|----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| $F_{SO_x \text{ evitado}}$ | Fator de SO_x evitado a partir do uso de vinhaça para geração de eletricidade (g/MWh); |
| $GE_{MWh/ano}$ | Geração de eletricidade (MWh/ano). |

No balanço de emissão e mitigação de SO_x (tSO_2/ano), pelo motogerador e geração de eletricidade a partir de vinhaça, se deu pela subtração da emissão de SO_x , da queima do biogás, pelos óxidos de enxofre não emitidos no processo de geração de eletricidade a partir de vinhaça. O mesmo é calculado a partir da equação (76), de acordo com Poveda (2014).

$$\text{Balanço } SO_x \text{ biodigestor} = (SO_x \text{ motogerador} + SO_x \text{ transporte vb/ano}) - SO_x \text{ evitado} \quad (76)$$

Aonde:

| | |
|----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Balanço SO_x biodigestor | Balanço de emissão e mitigação de SO_x pelo motogerador e geração de eletricidade a partir de vinhaça (t/ano); |
| SO_x motogerador | Emissão de SO_x pelo motogerador (t/ano); |
| SO_x transporte vb/ano | Emissão de SO_x no transporte de vinhaça biodigerida (t/ano); |
| SO_x evitado | Emissão de SO_x evitada a partir do uso de vinhaça para geração de eletricidade (tSO_x/ano). |

As emissões anuais equivalentes, em toneladas de dióxido de carbono, no transporte de vinhaça biodigerida, com Diesel S 500, é dada pela equação (77), de acordo com Poveda (2014).

$$CO_2 \text{ eq. transporte vb/ano} = D_{\text{Diesel}} \times CO_2 \text{ eq. Diesel} \times C_{\text{Diesel/ano/vb}} \quad (77)$$

Aonde:

| | |
|--------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| $CO_{2eq/transporte \text{ vb/ano}}$ | Emissão de CO_2 eq. no transporte de vinhaça biodigerida com Diesel S500 (t/ano); |
| D_{Diesel} | Densidade do Diesel (kg/m^3); |
| $CO_2 \text{ eq. Diesel}$ | Quantidade CO_2 eq. Diesel por massa de Diesel (t/kg de Diesel); |
| $C_{\text{Diesel/ano/vb}}$ | Consumo de Diesel anual no transporte de vinhaça biodigerida (m^3). |

No que se refere a emissão de CO_{2eq} ($tCO_2 \text{ eq./ano}$) evitada a partir do uso de vinhaça para geração de eletricidade, o dióxido de carbono equivalente mitigado pela geração de

eletricidade a partir de vinhaça pelo sistema biodigestor e motogerador é dado pela equação (78), de acordo com Poveda (2014).

$$\text{CO}_2 \text{ eq. evitado/ano} = F_{\text{CO}_2 \text{ eq. evitado}} \times \text{GE}_{\text{MWh/ano}} \quad (78)$$

Aonde:

| | |
|---------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\text{CO}_2 \text{ eq. evitado/ano}$ | Emissão de CO_2 evitada a partir do uso de vinhaça para geração de eletricidade ($\text{tCO}_{2\text{eq}}/\text{ano}$); |
| $F_{\text{CO}_2 \text{ eq. evitado}}$ | Fator de CO_2 eq. evitado a partir do uso de vinhaça para geração de eletricidade ($\text{tCO}_{2 \text{ eq.}}/\text{MWh}$); |
| $\text{GE}_{\text{MWh/ano}}$ | Geração de eletricidade (MWh/ano). |

Logo, o balanço de emissão e mitigação de CO_2 eq. pelo biodigestor e transporte de vinhaça biodigerida, com Diesel S 500 (t/ano), é dado pela equação (79), de acordo com Poveda (2014).

$$\text{Balanço } \text{CO}_2 \text{ eq. biodigestor/ano} = \text{CO}_2 \text{ eq. transporte vb} - \text{CO}_2 \text{ eq. evitado/ano} \quad (79)$$

Aonde:

| | |
|------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\text{Balanço } \text{CO}_2 \text{ eq. concentrador/ano}$ | Balanço de emissão e mitigação de CO_2 eq. pelo concentrador e transporte de vinhaça concentrada, com Diesel S 500 (t/ano); |
| $\text{CO}_2 \text{ eq. evitado/ano}$ | Emissão de CO_2 evitada a partir do uso de vinhaça para geração de eletricidade ($\text{tCO}_{2\text{eq}}/\text{ano}$); |
| $\text{CO}_2 \text{ eq. transporte /vb}$ | Emissão de CO_2 eq. no transporte de vinhaça biodigerida, com Diesel S500 (t/ano). |

4.8 Conjugado biodigestor IC mais concentrador de vinhaça

4.8.1 Análise de viabilidade econômica do biodigestor mais concentrador

Para o cálculo da viabilidade econômico e financeiro do conjugado biodigestor mais concentrador, foram utilizados os mesmos métodos para obtenção de receita e despesa supracitados nos subcapítulos referentes ao concentrador e biodigestor para a composição dos indicadores de taxa interna de retorno, valor presente líquido e *payback* e *payback* descontado.

4.8.2 Análise energética do biodigestor de vinhaça mais concentrador

Para análise energética biodigestor de circulação interna de vinhaça conjugado com o concentrador de vinhaça, foi realizado com base nas equações apresentados por Poveda (2014) e Moraes et al. (2014), com o objetivo de construir o indicadores energéticos deste cenário, a partir do: consumo de Diesel anual com transporte de vinhaça concentrada, balanço de energia consumida pelo Diesel e gerada pelo biogás por ano, balanço de geração e consumo de eletricidade e equivalente populacional de geração de eletricidade de vinhaça biodigerida, para uma faixa de produção de 500 até 4.000 metros cúbicos de etanol por dia.

Nesse sentido, as equações utilizadas na presente dissertação, para construção dos indicadores e posterior comparação, estão indicados a seguir.

O consumo anual de energia elétrica do biodigestor de circulação interna, de acordo com Procknor (2008), está em torno de 10% da eletricidade gerada pelo motogerador, a partir da relação multiplicativa entre potência do biodigestor e os dias de safra. O mesmo, é descrito na equação (80), de acordo com Procknor (2008), Moraes et al. (2014) e Poveda (2014).

$$C_{\text{MWh/ano biodigestor}} = P_{\text{biodigestor}} \times \text{Dias de safra} \quad (80)$$

Aonde:

| | |
|----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| $C_{\text{MWh/ano biodigestor}}$ | Consumo anual de eletricidade na biodigestão (MWh/ano); |
| $P_{\text{biodigestor}}$ | Potência elétrica do biodigestor (200 kW para cada 4.000 m ³ de vinhaça); |
| Dias de safra | Dias de safra. |

No que se refere ao consumo anual de energia elétrica pelo concentrador de vinhaça, em MWh, é dado pela equação (81), de acordo com Citrotec (2017).

$$C_{\text{MWh concentradores/ano}} = N_{\text{concentradores}} \times P_{\text{concentrador}} \times \text{Horas de safra} \quad (81)$$

Aonde:

| | |
|-------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| $C_{\text{MWh concentradores/ano}}$ | Consumo anual de eletricidade do concentrador (MWh/ano); |
| $N_{\text{concentradores}}$ | Número de concentradores; |
| $P_{\text{concentrador}}$ | Potência do concentrador (MW); |
| Horas de safra | Horas de safra (h). |

O volume de biogás produzido, em metros cúbicos, por ano pelo biodigestor IC com vinhaça é dado pela equação (82), de acordo com Poveda (2014).

$$V_{\text{biogás/ano}} = V_{\text{vinhaça/ano}} \times V_{\text{biogás/vinhaça}} \quad (82)$$

Aonde:

| | |
|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| $V_{\text{biogás/ano}}$ | Volume de biogás produzido (m^3/ano); |
| $V_{\text{vinhaça/ano}}$ | Volume de vinhaça produzida por ano (m^3/ano); |
| $V_{\text{biogás/vinhaça}}$ | Volume de biogás produzido por m^3 de vinhaça (Nm^3/m^3). |

A energia térmica anual, gerada pela queima do biogás, em terajoule anuais, para geração de eletricidade, debitado o volume de biogás vazado do sistema biodigestor IC e motogerador, é dada pela equação (83), de acordo com Poveda (2014).

$$Q_{\text{biogás/ano}} = V_{\text{biogás/ano}} \times (1 - V_{\text{biogás/ano vazado}}) \times \text{PCI}_{\text{biogás}} \quad (83)$$

Aonde:

| | |
|--------------------------------|------------------------------------------------------------|
| $Q_{\text{biogás/ano}}$ | Energia térmica produzida pelo biogás ano (TJ/ano); |
| $V_{\text{biogás/ano}}$ | Volume de biogás produzido (m^3/ano); |
| $V_{\text{biogás/ano vazado}}$ | Porcentagem de volume de biogás vazado; |
| $\text{PCI}_{\text{biogás}}$ | Poder Calorífico Inferior do biogás (kJ/N m^3). |

A eletricidade anual fornecida pelo sistema biodigestor IC e motogerador, em MWh, é dado pela geração de eletricidade do sistema, subtraído pelo consumo anual de energia elétrica no processo de biodigestão mais o consumo do concentrador, o mesmo é dado pela equação (84), de acordo com Poveda (2014).

$$EE_{\text{exp/ano}} = (Q_{\text{biogás/ano}} \times \eta_{\text{motor}}) - (C_{\text{eletricidade/biodigestor}} - C_{\text{MWh concentradores/ano}}) \quad (84)$$

Aonde:

| | |
|-------------------------|-----------------------------------------------|
| $EE_{\text{exp/ano}}$ | Energia elétrica exportada por ano (MWh/ano); |
| $Q_{\text{biogás/ano}}$ | Energia térmica produzida pelo biogás (MWh); |
| η_{motor} | Rendimento termoelétrico do motor; |

| | |
|---------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| $C_{\text{eletricidade/biodigestor}}$ | Consumo anual de eletricidade na biodigestão (MWh); |
| $C_{\text{MWh concentradores/ano}}$ | Consumo anual de eletricidade do concentrador. |

A energia consumida pelo Diesel, em terajoules anuais, na operacionalização transporte de vinhaça concentrada pelos caminhões 2318, é dado pela equação (85), de acordo com Poveda (2014).

$$Q_{\text{Diesel/ano}} = C_{\text{Diesel/ano/vc}} \times \text{PCI}_{\text{Diesel}} \quad (85)$$

Aonde:

| | |
|------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| $Q_{\text{Diesel/ano}}$ | Energia proveniente consumida do Diesel por ano (TJ/ano); |
| $C_{\text{Diesel/ano/vc}}$ | Consumo de Diesel anual com transporte de vinhaça concentrada (m^3/ano); |
| $\text{PCI}_{\text{Diesel}}$ | Poder Calorífico Inferior do Diesel (kJ/litro). |

Portanto, o balanço de energia consumida pelo Diesel, no transporte de vinhaça concentrada pelos caminhões 2318, e gerada pelo biogás, na biodigestão de vinhaça para produção de eletricidade, pelo motogerador em terajoules anuais é dado pela equação (86), de acordo com Poveda (2014).

$$\text{Balanço}_{\text{Energético concentrador + biodigestor}} = Q_{\text{biogás/ano}} - Q_{\text{Diesel/ano}} \quad (86)$$

Aonde:

| | |
|-----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| $\text{Balanço}_{\text{Energético concentrador + biodigestor}}$ | Balanço de energia consumida pelo Diesel e gerada pelo biogás por ano (TJ/ano); |
| $Q_{\text{biogás/ano}}$ | Energia térmica produzida pelo biogás ano (TJ/ano); |
| $Q_{\text{Diesel/ano}}$ | Energia proveniente consumida do Diesel por ano (TJ/ano). |

O equivalente populacional na geração de eletricidade dimensiona o número de habitantes de uma cidade no qual o sistema biodigestor IC e motogerador pode fornecer eletricidade por um ano, a partir do consumo per capita por habitante. Nesse sentido, o equivalente populacional de geração de energia elétrica, a partir do processo de vinhaça concentrada e biodigerida, é dado pela equação (87), de acordo com Moraes et al.(2014).

$$EP_{vb} = EE_{\text{exp/ano}} \times CE_{\text{per capita}} \quad (87)$$

Aonde:

| | |
|--------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| EP_{vb} | Equivalente populacional de geração de eletricidade de vinhaça biodigerida (habitantes); |
| $EE_{\text{exp/ano}}$ | Energia elétrica exportada por ano (MWh/ano); |
| $CE_{\text{per capita}}$ | Consumo de eletricidade residencial per capita anual no Brasil (MWh/ano). |

4.8.3 Análise ambiental do biodigestor de vinhaça mais concentrador

Para análise ambiental, do biodigestor de circulação interna mais o concentrador de vinhaça, foi realizado com base nas equações apresentados por Poveda (2014) e Moraes et al. (2014), com o objetivo de construir os indicadores ambientais deste cenário; equivalente populacional de vinhaça biodigerida concentrada; balanço de emissão e mitigação de NO_x pelo concentrador; transporte de vinhaça concentrada com Diesel S500, motogerador e geração de eletricidade a partir de vinhaça; balanço de emissão e mitigação de SO_x e CO_2 eq. pelo concentrador, transporte de vinhaça concentrada com Diesel S500, motogerador e geração de eletricidade a partir de vinhaça e geração de eletricidade a partir de vinhaça (t/ano) para uma faixa de produção de 500 até 4.000 metros cúbicos de etanol por dia, como também a mitigação de CO_2 eq para a produção de etanol por estado brasileiro na safra 2015/2016, de acordo com UNICA (2017), como também seu potencial geração de créditos de carbono.

Nesse sentido, as equações utilizadas na presente dissertação para construção dos indicadores e posterior comparação estão indicados a seguir.

Para Moraes et al. (2014), o equivalente de poluição potencial gerado a partir de vinhaça pelas usinas sucroenergéticas e o número de habitantes que um centro urbano que produzem a mesma quantidade de carga orgânica, a demanda química de oxigênio. No que se refere ao equivalente populacional, referente a vinhaça biodigerida concentrada, pode ser encontrada a partir da equação (88), de acordo com Moraes et al (2014).

$$EP_{vb} = (F_{vc} \times DQO_{vb}) \div (DQO_{\text{esgoto}} \times MC_{\text{habitante}} \times C_{pce}) \quad (88)$$

Aonde:

| | |
|-----------|----------------------------------------------------------------------|
| EP_{vc} | Equivalente populacional após a biodigestão de vinhaça (habitantes); |
|-----------|----------------------------------------------------------------------|

| | |
|------------------|------------------------------------------------------------|
| F_{vc} | Fluxo de vinhaça após a concentração (litros/dia); |
| DQO_{vb} | DQO de vinhaça (kg/m^3); |
| DQO_{esgoto} | DQO de água de esgoto (kg/m^3); |
| $MC_{habitante}$ | Média de consumo de água por habitante (litros/habitante); |
| C_{pce} | Contribuição per capita de esgoto. |

No que se refere a emissão anual de óxidos de nitrogênio, em toneladas, pelo concentrador de vinhaça em sua operacionalização anual é dado pela equação (89), de acordo com Poveda (2014).

$$NO_{x \text{ concentrador}} = F_{NOX} \times C_{MWh \text{ concentradores/ano}} \quad (89)$$

Aonde:

| | |
|-------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| $NO_{x \text{ concentrador}}$ | Emissão de NO_x pelo concentrador (t/ano); |
| F_{NOX} | Fator de emissão de NO_x por consumo de eletricidade (g/MWh); |
| C_{MWh} | Consumo de eletricidade pelo concentrador (MWh/ano). |
| | concentradores/ano |

A emissão anual de óxidos de nitrogênio, em toneladas, no transporte de vinhaça concentrada da usina até os locais de aplicação, pelos caminhões 2318, com Diesel S 500 é dado pela equação (90), de acordo com Poveda (2014).

$$NO_{x \text{ transporte vc}} = F_{NOX/km} \times km_{\text{ano/caminhão 2318}} \quad (90)$$

Aonde:

| | |
|---------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| $NO_{x \text{ transporte vc}}$ | Emissão de NO_x transporte de vinhaça concentrada com Diesel S500 (t/ano); |
| $F_{NOX/km}$ | Fator de emissão de NO_x por kilometro percorrido (g/km); |
| $km_{\text{ano/frota caminhão 2318}}$ | kilometragem total percorrida pela frota de caminhões 2318 no ano (km). |

Emissão anual de NO_x , por ano no motogerador de biogás (tNO_x/ano), em sua operacionalização para produção de eletricidade, o mesmo emite óxidos de nitrogênio no processo de queima do biogás, sua quantificação é dada pela equação (91), de acordo com Poveda (2014).

$$NO_{x \text{ motogerador}} = F_{NOX} \times Q_{\text{biogás/ano}} \quad (91)$$

Aonde:

| | |
|------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| $NO_{x \text{ motogerador}}$ | Emissão de NO_x pelo motogerador (t/ano); |
| F_{NOX} | Fator de emissão NO_x do motogrador de biogás (kg NO_x /TJ); |
| $Q_{\text{biogás/ano}}$ | Energia térmica produzido pelo biogás por ano (TJ/ano). |

No que se refere a emissão de NO_x , evitada a partir do uso de vinhaça para geração de eletricidade equivalente em CO_2 (tCO_{2eq}/ano), para posterior cálculo de créditos de carbono é exemplificada pela equação (92), de acordo com Poveda (2014).

$$NO_{x \text{ evitado}} = F_{NOx \text{ evitado}} \times GE_{MWh/ano} \quad (92)$$

Aonde:

| | |
|---------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $NO_{x \text{ evitado}}$ | Emissão de NO_x evitada a partir do uso de vinhaça para geração de eletricidade (tNO_x/ano); |
| $F_{NOx \text{ evitado}}$ | Fator de NO_x evitado a partir da geração de eletricidade (g/MWh); |
| $GE_{MWh/ano}$ | Geração de eletricidade (MWh/ano). |

No que se refere a emissão de NO_x , evitada a partir do uso de vinhaça para geração de eletricidade equivalente em CO_2 (tCO_{2eq}/ano), para posterior cálculo de créditos de carbono é exemplificada pela equação (93), de acordo com Poveda (2014).

$$CO_{2 \text{ eq. } NOx} = NO_{x \text{ evitado}} \times 296 \quad (93)$$

Aonde:

| | |
|---------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $CO_{2 \text{ eq. } NOx}$ | Emissão de NO_x evitada a partir do uso de vinhaça para geração de eletricidade equivalente em CO_2 (tCO_{2eq}/ano); |
| $NO_{x \text{ evitado}}$ | Emissão de NO_x evitada a partir do uso de vinhaça para geração de eletricidade (tNO_x/ano); |
| 296 | Equivalente de CO_2 para 1 tonelada de NO_x . |

Portanto, o balanço de emissão e mitigação dos óxidos de nitrogênio, em toneladas ano, e dado pela soma da emissão do concentrador, transporte de vinhaça concentrada com Diesel S500 e motogerador pela subtração da mitigação desse gás pela geração de eletricidade

a partir de vinhaça, aonde sua quantificação é ilustrada na equação (94), de acordo com Poveda (2014).

$$\text{Balanço NO}_x \text{ concentrador + biodigestor} = (\text{NO}_x \text{ concentrador} + \text{NO}_x \text{ transporte vc} + \text{NO}_x \text{ motogerador}) - \text{NO}_x \text{ evitado} \quad (94)$$

Aonde:

| | |
|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Balanço NO_x concentrador + biodigestor | Balanço de emissão e mitigação de NO_x pelo concentrador transporte de vinhaça concentrada com Diesel S500, motogerador e geração de eletricidade a partir de vinhaça (t/ano); |
| NO_x concentrador | Emissão de NO_x pelo concentrador (t/ano); |
| NO_x transporte vc | Emissão de NO_x transporte de vinhaça concentrada com Diesel S500 (t/ano); |
| NO_x motogerador | Emissão de NO_x pelo motogerador (t/ano); |
| NO_x evitado | Emissão de NO_x evitada a partir do uso de vinhaça para geração de eletricidade (t NO_x /ano). |

A emissão anual, em toneladas de óxidos de enxofre, pelo concentrador de vinhaça, é dada pela equação (95), de acordo com Poveda (2014).

$$\text{SO}_x \text{ concentrador} = F_{\text{SOX}} \times C_{\text{MWh concentradores/ano}} \quad (95)$$

Aonde:

| | |
|-------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| SO_x concentrador | Emissão de SO_x pelo concentrador (t/ano); |
| F_{SOX} | Fator de emissão de SO_x por consumo de eletricidade (g/MWh); |
| $C_{\text{MWh concentradores/ano}}$ | Consumo de eletricidade pelo concentrador (MWh/ano). |

A emissão anual de óxidos de enxofre, em toneladas, no transporte de vinhaça concentrada pelos caminhões 2318, com Diesel S 500, é descrito na equação (96), de acordo com Poveda (2014).

$$\text{SO}_x \text{ transporte vc} = D_{\text{Diesel}} \times S_{\text{Diesel}} \times C_{\text{Diesel/ano/vc}} \quad (96)$$

Aonde:

| | |
|----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| SO_x transporte vc | Emissão de SO_x no transporte de vinhaça concentrada com Diesel S500 (t/ano); |
| D_{Diesel} | Densidade do Diesel (kg/m^3); |
| S_{Diesel} | Quantidade SO_x por massa de Diesel (t/kg de Diesel); |
| $C_{\text{Diesel/ano/vc}}$ | Consumo de Diesel anual com transporte de vinhaça concentrada. |

A quantificação da emissão anual de óxidos de enxofre, no processo de queima do biogás pelo motogerador em (tSO_2 /ano), para geração de eletricidade, é dado pela equação (97), de acordo com Poveda (2014).

$$SO_x \text{ motogerador} = V_{\text{biogás/ano}} \times (1 - V_{\text{biogás/ano vazado}}) \times [H_2S] \times (M_{SO_2} \div M_{H_2S}) \quad (97)$$

Aonde:

| | |
|--------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| SO_x motogerador | Emissão de SO_x por ano no motogerador de biogás (tSO_2 /ano); |
| $V_{\text{biogás/ano}}$ | Volume de biogás produzido por ano (m^3 /ano); |
| $V_{\text{biogás/ano vazado}}$ | Porcentagem de volume de biogás vazado; |
| $[H_2S]$ | Concentrador de H_2S no biogás (mg/m^3); |
| M_{SO_2} | Massa molecular do H_2S (g/M); |
| M_{H_2S} | Massa molecular do SO_2 (g/M). |

A emissão de SO_x evitada, a partir do uso de vinhaça para geração de eletricidade (tSO_x /ano), a partir do biodigestor de circulação interna e posterior geração de eletricidade pelo motogerador, é fornecido pela equação (98), de acordo com Poveda (2014).

$$SO_x \text{ evitado} = F_{SO_x \text{ evitado}} \times GE_{\text{MWh/ano}} \quad (98)$$

Aonde:

| | |
|----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| SO_x evitado | Emissão de SO_x evitada a partir do uso de vinhaça para geração de eletricidade (tSO_x /ano); |
| $F_{SO_x \text{ evitado}}$ | Fator de SO_x evitado a partir do uso de vinhaça para geração de eletricidade (g/MWh); |
| $GE_{\text{MWh/ano}}$ | Geração de eletricidade (MWh/ano). |

Balanço de emissão e mitigação de SO_x , pelo concentrador no transporte de vinhaça concentrada, com Diesel S500, motogerador e geração de eletricidade a partir de vinhaça (t/ano), se deu pela soma da emissão de SO_x pela queima do biogás, transporte de vinhaça concentrada pelos caminhões 2318, como também, pela utilização do concentrador pela subtração dos óxidos de enxofre não emitidos no processo de geração de eletricidade, a partir de vinhaça. O mesmo é calculado a partir da equação (99), de acordo com Poveda (2014).

$$\text{Balanço } SO_x \text{ concentrador + biodigestor} = (SO_x \text{ concentrador} + SO_x \text{ transporte vc} + SO_x \text{ motogerador}) - SO_x \text{ evitado} \quad (99)$$

Aonde:

| | |
|-------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Balanço SO_x concentrador + biodigestor | Balanço de emissão e mitigação de SO_x pelo concentrador no transporte de vinhaça concentrada, com Diesel S500, motogerador e geração de eletricidade a partir de vinhaça (t/ano); |
| SO_x concentrador | Emissão de SO_x pelo concentrador (t/ano); |
| SO_x transporte vc | Emissão de SO_x transporte de vinhaça concentrada, com Diesel S500 (t/ano); |
| SO_x motogerador | Emissão de SO_x pelo motogerador (t/ano); |
| SO_x evitado | Emissão de SO_x evitada a partir do uso de vinhaça para geração de eletricidade (t SO_x /ano). |

As emissões anuais de dióxido de carbono, em toneladas equivalente, pelo concentrador de vinhaça é fornecidas pela equação (100), de acordo com Poveda (2014).

$$CO_{2 \text{ eq.}} \text{ concentrador} = F_{CO_{2 \text{ eq.}}} \times C_{MWh \text{ concentradores/ano}} \quad (100)$$

Aonde:

| | |
|-------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| $CO_{2 \text{ eq.}} \text{ concentrador}$ | Emissão de $CO_{2 \text{ eq.}}$ pelo concentrador (t/ano); |
| $F_{CO_{2 \text{ eq.}}}$ | Fator de emissão de $CO_{2 \text{ eq.}}$ por consumo de eletricidade (g/MWh); |
| $C_{MWh \text{ concentradores/ano}}$ | Consumo de eletricidade pelo concentrador (MWh/ano). |

As emissões anuais equivalentes, em toneladas de dióxido de carbono, no transporte de vinhaça concentrada, com Diesel S 500, é dada pela equação (101), de acordo com Poveda (2014).

$$CO_{2 \text{ eq. transporte vc}} = D_{\text{Diesel}} \times CO_{2 \text{ eq. Diesel}} \times C_{\text{Diesel/ano/vc}} \quad (101)$$

Aonde:

| | |
|------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $CO_{2 \text{ eq. transporte vc}}$ | Emissão de $CO_{2 \text{ eq.}}$ no transporte de vinhaça concentrada, com Diesel S500 (t/ano); |
| D_{Diesel} | Densidade do Diesel (kg/m^3); |
| $CO_{2 \text{ eq. Diesel}}$ | Quantidade $CO_{2 \text{ eq. Diesel}}$ por massa de Diesel (t/kg de Diesel); |
| $C_{\text{Diesel/ano/vc}}$ | Consumo de Diesel anual com transporte de vinhaça concentrada (m^3). |

No que se refere a emissão de CO_{2eq} evitada a partir do uso de vinhaça para geração de eletricidade ($tCO_{2eq.}$), o dióxido de carbono equivalente mitigado pela geração de eletricidade a partir de vinhaça pelo sistema biodigestor e motogerador, é dado pela equação (102), de acordo com Poveda (2014).

$$CO_{2 \text{ eq. evitado}} = F_{CO_{2 \text{ eq. evitado}}} \times GE_{MWh/ano} \quad (102)$$

Aonde:

| | |
|----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $CO_{2 \text{ eq. evitado}}$ | Emissão de CO_2 evitada a partir do uso de vinhaça para geração de eletricidade ($tCO_{2eq.}$); |
| $F_{CO_{2 \text{ eq. evitado}}}$ | Fator de $CO_2 \text{ eq.}$ Evitado a partir do uso de vinhaça para geração de eletricidade ($tCO_2 \text{ eq./MWh}$); |
| $GE_{MWh/ano}$ | Geração de eletricidade (MWh/ano). |

Portanto, o balanço de emissão e mitigação de $CO_{2eq.}$, em toneladas ano, é dado pela soma da emissão do concentrador, transporte de vinhaça concentrada com Diesel S500 e motogerador pela subtração da mitigação desse gás pela geração de eletricidade a partir de vinhaça, aonde sua quantificação é ilustrada na equação (103), de acordo com Poveda (2014).

$$\text{Balanço CO}_2 \text{ eq. concentrador + biodigestor} = (\text{CO}_{2\text{eq}} \text{ concentrador} + \text{CO}_{2\text{eq}} \text{ transporte vc}) - \text{CO}_{2\text{eq}} \text{ evitado} \quad (103)$$

Aonde:

Balanço CO₂ eq. concentrador +
biodigestor

Balanço de emissão e mitigação de CO₂eq. pelo concentrador transporte de vinhaça concentrada, com Diesel S500, motogerador e geração de eletricidade a partir de vinhaça (t/ano);

CO₂eq concentrador

Emissão de CO₂eq pelo concentrador (t/ano);

CO₂eq transporte vc

Emissão de CO₂eq transporte de vinhaça concentrada com Diesel S500 (t/ano);

CO₂eq evitado

Emissão de CO₂eq evitada a partir do uso de vinhaça para geração de eletricidade (t CO₂eq /ano).

Portanto a metodologia pode ser sintetizada de acordo com o quadro 9. Espera-se que a presente pesquisa possa se somar ao conhecimento já produzido na área energia renovável, reutilização de subprodutos e contribuir na materialização da utilização de vinhaça para geração de energia elétrica, créditos de carbono e fertilizantes em consonância com a dimensão ambiental e econômica da sustentabilidade.

Quadro 9 – Resumo de objetivos de trabalho, proposições, embasamento teórico, métodos de coleta e análises a serem realizadas

| Objetivos do trabalho | Proposições | Embasamento teórico | Métodos de coleta | Análises a serem realizadas |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Identificar o valor presente líquido, taxa interna de retorno, payback e payback descontado de biodigestores anaeróbios de circulação interna, concentrador de vinhaça e o conjugado de ambos | É viável economicamente a utilização de biodigestores anaeróbios de circulação interna, concentrador de vinhaça e o conjugado de ambos. | Poveda (2014); Moraes et al. (2014). | Survey, junto a ANP, Citrotec e STAB. Levantamento bibliográfico no embasamento teórico citado. | Análise de viabilidade econômica. |
| Identificar o equivalente populacional, dióxido de carbono equivalentes emitidos e mitigados, óxidos de nitrogênio e enxofre emitidos e mitigado de biodigestores anaeróbios de circulação interna, concentrador de vinhaça e o conjugado de ambos | A utilização de biodigestores anaeróbios IC, concentrador de vinhaça e o conjugado de ambos estão em consonância com a dimensão ambiental sustentabilidade. | Poveda (2014); Moraes et al. (2014). | Survey, junto a ANP, Citrotec e STAB. Levantamento bibliográfico no embasamento teórico citado. | Análise de balanço energético e ambiental a partir de emissões e mitigação de NOx, SOx e CO ₂ eq. |

Quadro 9 – Resumo de objetivos de trabalho, proposições, embasamento teórico, métodos de coleta e análises a serem realizadas

| Objetivos do trabalho | Proposições | Embasamento teórico | Métodos de coleta | Análises a serem realizadas |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|
| Fundamentar a importância da reutilização da vinhaça com propósitos energéticos ante sua capacidade poluidora. | Ante a sua elevada carga de material orgânico, baixo pH, elevada corrosividade e altos índices de demanda bioquímica de oxigênio e demanda química de oxigênio, a vinhaça deve ser também reutilizada com propósitos energéticos | Freire e Cortez (2000). Granatto e Silva (2002). Van Haadel ³⁰ (2003, apud REGO; HERNANDES, 2006). | Levantamento bibliográfico na base de dados da <i>Scielo</i> , <i>Web of Science</i> e nas Bibliotecas Digitais da USP, UNESP e UNICAMP. | Análise textual, Análise Indutiva |
| Identificar motivos de não reutilização da vinhaça para geração de energia elétrica junto aos produtores. | Os leilões de energia elétrica realizado para Agência Nacional de Energia Elétrica e a modalidade de venda direta, como também, a atual legislação sobre vinhaça são desfavoráveis economicamente | Castro e Dantas (2008) | Levantamento bibliográfico na base de dados da <i>Scielo</i> , <i>Web of Science</i> e nas Bibliotecas Digitais da USP, UNESP e UNICAMP. | Análise textual, Análise Indutiva |

Fonte: Elaborado pelo autor.

³⁰ VAN HAANDEL, A. Valorização de subprodutos gerados nas destilarias de álcool. 2003.

5 ANÁLISE ENERGÉTICA

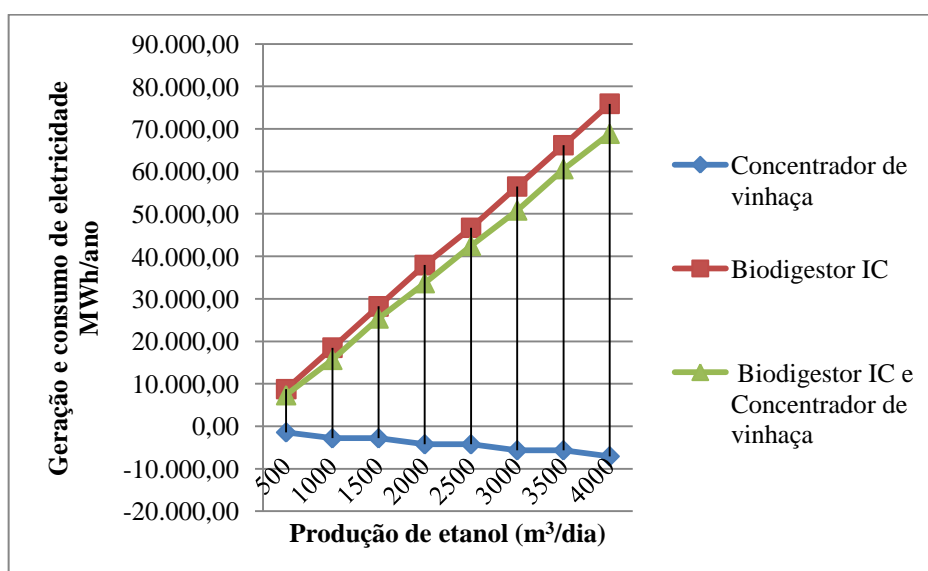
Com base na geração a partir da queima de biogás e consumo de eletricidade para as tecnologias estudadas: concentrador de vinhaça, biodigestor de circulação interna em conjunto com o motogerador e o conjugado de biodigestor IC e concentrador, pode-se identificar o balanço de geração e consumo de energia elétrica, para uma faixa de produção de etanol diária, entre 500 e 4.000 metros cúbicos, que pode ser identificado a partir da tabela 13 e a figura 6.

Tabela 13 – Balanço de geração e consumo de eletricidade (MWh/ano)

| Produção de etanol m ³ /dia | Concentrador de vinhaça | Biodigestor IC | Biodigestor IC e Concentrador de vinhaça |
|-------------------------------------------|-------------------------|----------------|---------------------------------------------|
| 500 | -1.411,20 | 8.768,62 | 7.357,42 |
| 1.000 | -2.822,40 | 18.497,23 | 15.674,83 |
| 1.500 | -2.822,40 | 28.225,85 | 25.403,45 |
| 2.000 | -4.233,60 | 37.954,47 | 33.720,87 |
| 2.500 | -4.233,60 | 46.723,08 | 42.489,48 |
| 3.000 | -5.644,80 | 56.451,70 | 50.806,90 |
| 3.500 | -5.644,80 | 66.180,32 | 60.535,52 |
| 4.000 | -7.056,00 | 75.908,94 | 68.852,94 |

Fonte : Elaborado pelo autor.

Figura 6 – Balanço de geração e consumo de eletricidade (MWh/ano)



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir da tabela 13 e da figura 6 pode-se constatar, dentro da avaliação balanço de geração e consumo de eletricidade, o biodigestor IC como melhor tecnologia para essa finalidade, geração de energia elétrica.

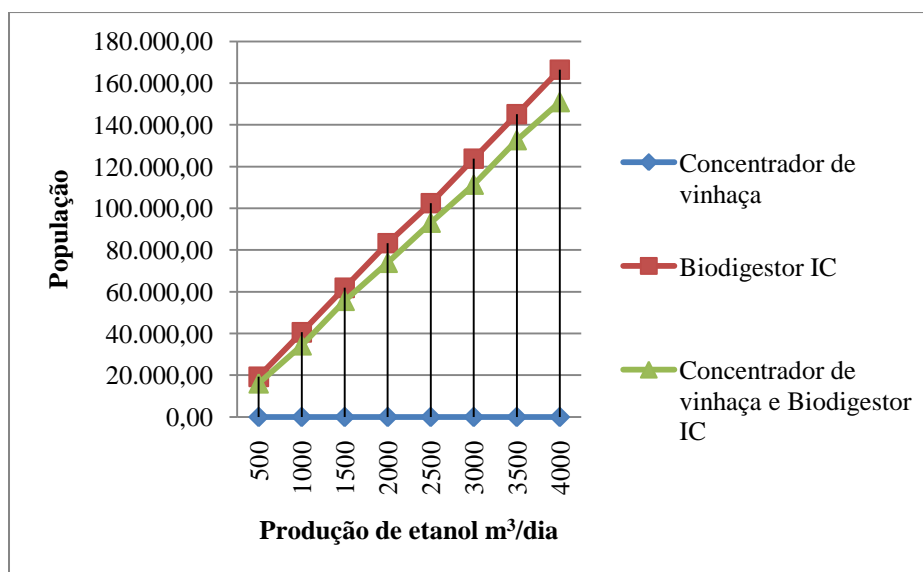
Nesse sentido, o equivalente populacional em eletricidade, de acordo com Moraes et al. (2014), é a quantidade de energia elétrica gerada que pode suprir a demanda de um determinado número de habitantes em uma cidade. Os resultados encontrados para a faixa de produção de etanol considerada nesse estudo para as tecnologias estudadas, pode ser constatados na tabela 14 e da figura 7.

Tabela 14 – Equivalente populacional (habitantes)

| Produção de etanol m ³ /dia | Concentrador de vinhaça | Biodigestor IC | Concentrador de vinhaça e Biodigestor IC |
|----------------------------------------|-------------------------|----------------|------------------------------------------|
| 500 | 0,00 | 19.229,42 | 16.134,69 |
| 1.000 | 0,00 | 40.564,11 | 34.374,64 |
| 1.500 | 0,00 | 61.898,80 | 55.709,32 |
| 2.000 | 0,00 | 83.233,48 | 73.949,27 |
| 2.500 | 0,00 | 102.462,90 | 93.178,69 |
| 3.000 | 0,00 | 123.797,59 | 111.418,64 |
| 3.500 | 0,00 | 145.132,28 | 132.753,33 |
| 4.000 | 0,00 | 166.466,96 | 150.993,28 |

Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 7 – Equivalente populacional (habitantes)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se constatar, a partir da tabela 14, como também da figura 7, que o biodigestor, para uma produção de etanol de 4.000 metro cúbicos por dia, poderia fornecer eletricidade para uma cidade com 166.466,96 habitantes, uma população equivalente a cidade Itapeirica da Serra, na região metropolitana de São Paulo. Se fosse levada em consideração a produção de etanol da safra 2015/2016, de acordo com a UNICA (2017) em 30 milhões e 232 mil metros cúbicos, o biodigestor IC mais o motogerador poderia fornecer 2.868.502,66 MWh, já debitado o consumo elétrico do do maquinário supracitado, aonde poderia fornecer

eletricidade para uma população de 6.290.576,00 habitantes, uma população equivalente a cidade do Rio de Janeiro.

Além disso, segundo a Empresa de Pesquisas Energeticas (2016), a geração de eletricidade a partir da biomassa (bagaço e lixo), em 2015, foi de 47.394 GWh, se toda a vinhaça gerada na safra 2015/2016 fosse utilizada na geração de energia elétrica, poderia ser incrementado mais 6% no sistema elétrico nacional oriunda de biomassa.

Tabela 15 – Potencial incremento de eletricidade e equivalente populacional por estado a partir de vinhaça

| Estado | Geração de eletricidade (MWh) | Equivalente populacional em eletricidade (habitantes) |
|---------------------|-------------------------------|-------------------------------------------------------|
| Acre | ND | ND |
| Alagoas | 35.602,97 | 78.076,69 |
| Amazonas | ND | ND |
| Bahia | 20.741,84 | 45.486,5 |
| Ceará | 643,29 | 1.410,73 |
| Espírito Santo | 14.219,81 | 31.183,80 |
| Goiás | 445.511,22 | 976.998,29 |
| Maranhão | 17.107,71 | 37.516,92 |
| Mato Grosso | 125.411,06 | 275.024,25 |
| Mato Grosso do Sul | 263.222,89 | 577.243,18 |
| Minas Gerais | 290.593,65 | 637.266,78 |
| Pará | 3.422,33 | 7.505,12 |
| Paraíba | 31.968,84 | 70.107,11 |
| Paraná | 149.038,83 | 326.839,54 |
| Pernambuco | 31.610,16 | 71.513,51 |
| Piauí | 2.567,24 | 5.629,92 |
| Rio de Janeiro | 5.346,28 | 11.724,331 |
| Rio Grande do Norte | 7.592,87 | 16.651,03 |
| Rio Grande do Sul | ND | ND |
| Rondônia | 429,52 | 941,93 |
| Sergipe | 10.051,25 | 22.042,22 |
| São Paulo | 1.382.399,68 | 3.031.578,25 |
| Tocantins | 19.886,75 | 43.611,30 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Além disso, de acordo com Alves (2006), 6,5 toneladas de bagaço são necessários para gerar 1 MWh de eletricidade, logo, o biogás de vinhaça, utilizado na geração de eletricidade, poderia substituir 186.452.672,9 toneladas de bagaço, que poderiam ser destinadas para outros propósitos, como: comercialização, fabricação de palets, incremento da produção de etanol de segunda geração integrada a produção de primeira geração. Além disso, a quantidade de eletricidade gerada a partir do biogás de vinhaça de segunda geração, uma maior quantidade

de bagaço poderia ser destinada para produção de etanol, incrementando o rendimento de usinas sucroenergéticas.

De acordo com Santos (2012), 1 tonelada de bagaço de cana-de-açúcar produz 0,227 metros cúbicos de etanol celulósico, logo, para a faixa de produção de etanol diária, utilizada nesse estudo, especificamente no que se refere a geração de energia elétrica pelo biodigestor de circulação interna, tem-se a potencialidade de substituição do bagaço e produção de etanol celulósico, de acordo com a tabela 16.

Tabela 16 – Potencialidade de substituição do bagaço e produção de etanol celulósico

| Produção de etanol m ³ /dia | Geração de eletricidade pelo Biodigestor IC (MWh/ano) | Bagaço potencial destinado a produção de etanol de segunda geração (t/ano) | Potencial produção de etanol celulósico (m ³ /dia) |
|----------------------------------------|-------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| 500,00 | 8.768,62 | 56.996,03 | 64,73 |
| 1.000,00 | 18.497,23 | 120.232,00 | 136,54 |
| 1.500,00 | 28.225,85 | 183.468,03 | 208,35 |
| 2.000,00 | 37.954,47 | 246.704,06 | 280,16 |
| 2.500,00 | 46.723,08 | 303.700,02 | 344,89 |
| 3.000,00 | 56.451,70 | 366.936,05 | 416,70 |
| 3.500,00 | 66.180,32 | 430.172,08 | 488,51 |
| 4.000,00 | 75.908,94 | 493.408,11 | 560,33 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a produção de etanol celulósico por estado, com base geração de energia elétrica pelo biodigestor de circulação interna mais o motogerador, tem-se a potencialidade de substituição do bagaço e produção de etanol de segunda geração, de acordo com a tabela 17.

Tabela 17 – Potencialidade de substituição do bagaço e produção de etanol celulósico por estado brasileiro

| Estado | Potencial geração de eletricidade pelo Biodigestor IC a partir de vinhaça (MWh/ano) | Bagaço potencial destinado a produção de etanol de segunda geração (t/ano) | Potencial produção de etanol celulósico (m ³ /ano) |
|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| Acre | ND | ND | ND |
| Alagoas | 35.602,97 | 231.419,31 | 52.561,04 |
| Amazonas | ND | ND | ND |
| Bahia | 20.741,84 | 134.821,96 | 30.621,40 |
| Ceará | 643,29 | 4.181,39 | 949,70 |
| Espírito Santo | 14.219,81 | 92.428,77 | 20.992,86 |
| Goiás | 445.511,22 | 2.895.822,93 | 657.712,93 |
| Maranhão | 17.107,71 | 111.200,12 | 25.256,29 |
| Mato Grosso | 125.411,06 | 815.171,89 | 185.145,68 |
| Mato Grosso do Sul | 263.222,89 | 1.710.948,79 | 388.598,74 |
| Goiás | 445.511,22 | 2.895.822,93 | 657.712,93 |
| Maranhão | 17.107,71 | 111.200,12 | 25.256,29 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 17 – Potencialidade de substituição do bagaço e produção de etanol celulósico por estado brasileiro

| Estado | Potencial geração de eletricidade pelo Biodigestor IC a partir de vinhaça (MWh/ano) | Bagaço potencial destinado a produção de etanol de segunda geração (t/ano) | Potencial produção de etanol celulósico (m ³ /ano) |
|---------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| Mato Grosso | 125.411,06 | 815.171,89 | 185.145,68 |
| Mato Grosso do Sul | 263.222,89 | 1.710.948,79 | 388.598,74 |
| Minas Gerais | 290.593,65 | 1.888.858,73 | 429.006,48 |
| Goiás | 445.511,22 | 2.895.822,93 | 657.712,93 |
| Maranhão | 17.107,71 | 111.200,12 | 25.256,29 |
| Mato Grosso | 125.411,06 | 815.171,89 | 185.145,68 |
| Mato Grosso do Sul | 263.222,89 | 1.710.948,79 | 388.598,74 |
| Minas Gerais | 290.593,65 | 1.888.858,73 | 429.006,48 |
| Pará | 3.422,33 | 22.245,15 | 5.052,42 |
| Paraíba | 31.968,84 | 207.797,46 | 47.195,94 |
| Paraná | 149.038,83 | 968.752,40 | 220.027,60 |
| Pernambuco | 31.610,16 | 205.466,04 | 46.666,41 |
| Piauí | 2.567,24 | 16.687,06 | 3.790,04 |
| Rio de Janeiro | 5.346,28 | 34.750,82 | 7.892,77 |
| Rio Grande do Norte | 7.592,87 | 49.353,66 | 11.209,43 |
| Rio Grande do Sul | ND | ND | ND |
| Rondônia | 429,52 | 2.791,88 | 634,10 |
| Sergipe | 10.051,25 | 65.333,13 | 14.838,77 |
| São Paulo | 1.382.399,68 | 8.985.597,92 | 2.040.851,29 |
| Tocantins | 19.886,75 | 129.263,88 | 29.359,02 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

No que se refere a potencial substituição de combustíveis como o Diesel, gasolina e o etanol, na safra 2015/2016, a potencial produção de biogás seria de 1.813.920.000,00 metros cúbicos, o que significa uma substituição potencial de 997.656,00 m³ de Diesel, 1.106.491,20 m³ de gasolina e 1.432.996,80 m³ de etanol.

Para cada estado da União produtora de etanol, representaria um potencial de substituição de Diesel, gasolina e etanol e em suas respectivas frotas, conforme descrito na tabela 18.

Tabela 18 – Potencial incremento de substituição do Diesel, gasolina e etanol por estado a partir de vinhaça

| Estado | Potencial substituição do Diesel (m ³) | Número de caminhões médios abastecidos (360 dias/188 km/dia) | Potencial substituição da gasolina (m ³) | Número de veículos abastecidos por gasolina (360 dias/50 km/dia) | Potencial substituição do etanol (m ³) | Número de veículos abastecidos por etanol (360 dias/50 km/dia) |
|--------|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| Acre | 165,00 | 14,00 | 183,00 | 122,00 | 237,00 | 106,00 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 18 – Potencial incremento de substituição do Diesel, gasolina e etanol por estado a partir de vinhaça

| Estado | Potencial substituição do Diesel (m ³) | Número de caminhões médios abastecidos (360 dias/188 km/dia) | Potencial substituição da gasolina (m ³) | Número de veículos abastecidos por gasolina (360 dias/50 km/dia) | Potencial substituição do etanol (m ³) | Número de veículos abastecidos por etanol (360 dias/50 km/dia) |
|---------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| Alagoas | 12.474,00 | 1.033,00 | 13.834,80 | 9.224,00 | 17.917,20 | 7.964,00 |
| Amazonas | 198,00 | 17,00 | 219,60 | 147,00 | 284,40 | 127,00 |
| Bahia | 7.293,00 | 604,00 | 8.088,60 | 5.393,00 | 10.475,40 | 4.656,00 |
| Ceará | 495,00 | 41,00 | 549,00 | 366,00 | 711,00 | 316,00 |
| Goiás | 155.034,00 | 12.829,00 | 171.946,80 | 114.632,00 | 222.685,20 | 98.972,00 |
| Maranhão | 6.171,00 | 511,00 | 6.844,20 | 4.563,00 | 8.863,80 | 3.940,00 |
| Mato Grosso | 43.758,00 | 3.621,00 | 48.531,60 | 32.355,00 | 62.852,40 | 27.935,00 |
| Mato Grosso do Sul | 91.641,00 | 7.584,00 | 101.638,20 | 67.759,00 | 131.629,80 | 58.503,00 |
| Minas Gerais | 101.277,00 | 8.381,00 | 112.325,40 | 74.884,00 | 145.470,60 | 64.654,00 |
| Pará | 1.353,00 | 112,00 | 1.500,60 | 1.001,00 | 1.943,40 | 864,00 |
| Paraíba | 11.352,00 | 940,00 | 12.590,40 | 8.394,00 | 16.305,60 | 7.247,00 |
| Paraná | 51.942,00 | 4.299,00 | 57.608,40 | 38.406,00 | 74.607,60 | 33.159,00 |
| Pernambuco | 11.500,00 | 952,00 | 12.810,00 | 8.540,00 | 16.590,00 | 7.374,00 |
| Piauí | 1.089,00 | 91,00 | 1.207,80 | 806,00 | 1.564,20 | 696,00 |
| Rio de Janeiro | 1.947,00 | 162,00 | 2.159,40 | 1.440,00 | 2.796,60 | 1.243,00 |
| Rio Grande do Norte | 2.937,00 | 244,00 | 3.257,40 | 2.172,00 | 4.218,60 | 1.875,00 |
| Rio Grande do Sul | 132,00 | 11,00 | 146,40 | 98,00 | 189,60 | 85,00 |
| Rondônia | 429,00 | 36,00 | 475,80 | 318,00 | 616,20 | 274,00 |
| Sergipe | 3.696,00 | 306,00 | 4.099,20 | 2.733,00 | 5.308,80 | 2.360,00 |
| São Paulo | 481.041,00 | 39.805,00 | 533.518,20 | 355.679,00 | 690.949,80 | 307.089,00 |
| Tocantins | 7.029,00 | 582,00 | 7.795,80 | 5.198,00 | 10.096,20 | 4.488,00 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Dado a presente capacidade de substituição do biogás de vinhaça para o Diesel, gasolina e etanol, é importante constatar que nas usinas sucroenergéticas do país o transporte de vinhaça e do próprio etanol ainda é realizado a partir de combustíveis fosseis, contribuindo para um balanço energético desfavorável para o etanol, nesse sentido, buscar a auto-suficiência energética na logística sucroenergética é fundamental.

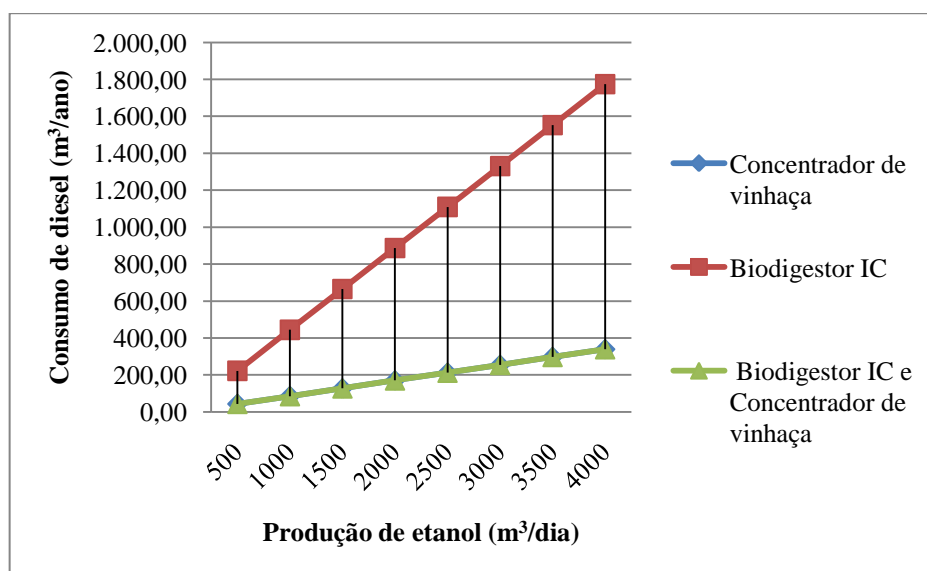
Pode se considerar, especificamente a logística de vinhaça *in natura* e biodigerida, realizada por caminhões 2318 e rodotrens, intensivo em consumo de Diesel, dado seu volume de produção e a necessidade de sua distribuição pelas lavouras de cana-de-açúcar, com pode ser constatado na tabela 19 e figura 8 para as tecnologias em avaliação nesta dissertação, para as faixas de produção de etanol diárias consideradas nesse estudo.

Tabela 19 – Consumo de Diesel anual com o transporte de vinhaça concentrada e biodigerida (m³/ano)

| Produção de etanol m ³ /dia | Concentrador de vinhaça | Biodigestor IC | Biodigestor IC e Concentrador de vinhaça |
|----------------------------------------|-------------------------|----------------|------------------------------------------|
| 500 | 43,25 | 222,13 | 43,25 |
| 1.000 | 85,22 | 444,26 | 85,22 |
| 1.500 | 127,20 | 665,12 | 127,20 |
| 2.000 | 170,45 | 887,25 | 170,45 |
| 2.500 | 212,42 | 1.109,38 | 212,42 |
| 3.000 | 254,40 | 1.330,24 | 254,40 |
| 3.500 | 297,65 | 1.552,37 | 297,65 |
| 4.000 | 339,62 | 1.774,50 | 339,62 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 8 – Consumo de Diesel anual com o transporte de vinhaça concentrada e biodigerida (m³/ano)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Porém, o biodigestor IC, pode utilizar parte ou totalidade de sua produção de biogás para substituição de Diesel em sua frota de caminhões 2318 e Volvo rodotrens para logística de vinhaça biodigerida, como pode ser observado na tabela 20.

Tabela 20 – Geração de eletricidade no biodigestor IC com completa substituição de Diesel no transporte de vinhaça biodigerida

| Produção de etanol m³/dia | Consumo de Diesel no transporte de vinhaça biodigerida (m³) | Biogás utilizado para substituição do Diesel (m³) | Produção de biogás (m³/ano) | Biogás utilizado para geração de eletricidade (m³) | Geração de eletricidade com total substituição do Diesel por biogás (MWh) |
|---------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| 500,00 | 222,13 | 403.872,73 | 6.000.000,00 | 5.596.127,27 | 8.049,14 |
| 1.000,00 | 444,26 | 807.745,45 | 12.000.000,00 | 11.192.254,55 | 17.058,29 |
| 1.500,00 | 665,12 | 1.209.309,09 | 18.000.000,00 | 16.790.690,91 | 26.071,54 |
| 2.000,00 | 887,25 | 1.613.181,82 | 24.000.000,00 | 22.386.818,18 | 35.080,69 |
| 2.500,00 | 1.109,38 | 2.017.054,55 | 30.000.000,00 | 27.982.945,45 | 43.129,83 |
| 3.000,00 | 1.330,24 | 2.418.618,18 | 36.000.000,00 | 33.581.381,82 | 52.143,09 |
| 3.500,00 | 1.552,37 | 2.822.490,91 | 42.000.000,00 | 39.177.509,09 | 61.152,23 |
| 4.000,00 | 1.774,50 | 3.226.363,64 | 48.000.000,00 | 44.773.636,36 | 70.161,37 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

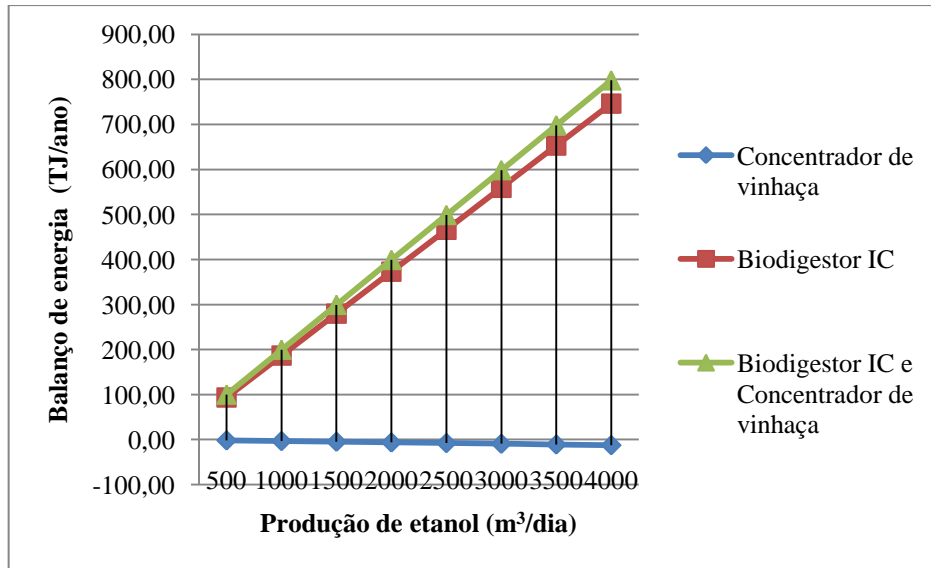
Por fim, o balanço energético, no que se refere a energia consumida no transporte de vinhaça concentrada e biodigerida e a geração da mesma a partir da queima de biogás, em terajoules por ano, pode ser observado na tabela 21, como na figura 9.

Tabela 21 – Balanço de energia gerada e consumida (TJ/ano)

| Produção de etanol m³/dia | Concentrador de vinhaça | Biodigestor IC | Biodigestor IC e Concentrador de vinhaça |
|---------------------------------------------|--------------------------------|-----------------------|-------------------------------------------------|
| 500 | -1,56 | 93,26 | 99,70 |
| 1.000 | -3,07 | 186,51 | 199,45 |
| 1.500 | -4,58 | 279,82 | 299,20 |
| 2.000 | -6,14 | 373,07 | 398,90 |
| 2.500 | -7,65 | 466,33 | 498,65 |
| 3.000 | -9,17 | 559,63 | 598,40 |
| 3.500 | -10,72 | 652,89 | 698,10 |
| 4.000 | -12,24 | 746,15 | 797,85 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 9 – Balanço de energia por ano (TJ/ano)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se observar que, o conjugado biodigestor IC e concentrador de vinhaça são os mais eficientes nessa dimensão de avaliação, devido:

- **Transporte de vinhaça concentrada:** Quando utilizando o concentrador, o transporte desse subproduto é reduzido, se comparado com o transporte de vinhaça *in natura* e biodigerida. Nesse sentido, o consumo de Diesel para uma produção de 4.000 metros cúbicos de etanol por dia é de 339,62 m³ de Diesel/ano para o concentrador e de 1.774,5 m³ de Diesel/ano para o biodigestor, cerca de 19% a menos;
- **Produção de biogás pelo biodigestor IC:** A partir do processo de biodigestão de vinhaça, se obtêm o biogás, pela decomposição da matéria orgânica de subproduto, aonde para uma produção de etanol de 4.000 metros cúbico por dia, há uma geração de 810,08 terajoules por ano.

Portanto, para cada indicador energético, uma tecnologia ou conjunto dela é mais eficiente que a outra, em outras palavras, não há melhor ou pior nessa análise, depende, essencialmente o que está se avaliando, o quadro 10 resume o desempenho de cada uma delas, com base nas avaliações realizadas.

Quadro 10 – Desempenho energético do concentrador, biodigestor IC e conjugado biodigestor e concentrador

| Dimensão de avaliação | Tecnologia mais apropriada |
|--------------------------------------------|----------------------------|
| Equivalente populacional | Biodigestor IC |
| Consumo de Diesel no transporte de vinhaça | Concentrador |

Fonte: Elaborado pelo autor.

**Quadro 10 – Desempenho energético do concentrador, biodigestor IC e conjugado
biodigestor e concentrador**

| Dimensão de avaliação | Tecnologia mais apropriada |
|----------------------------------------------|-----------------------------------|
| Balanço de energia | Biodigestor IC e Concentrador |
| Balanço de geração e consumo de eletricidade | Biodigestor IC |

Fonte: Elaborado pelo autor.

6 ANÁLISE AMBIENTAL

6.1 Equivalente populacional

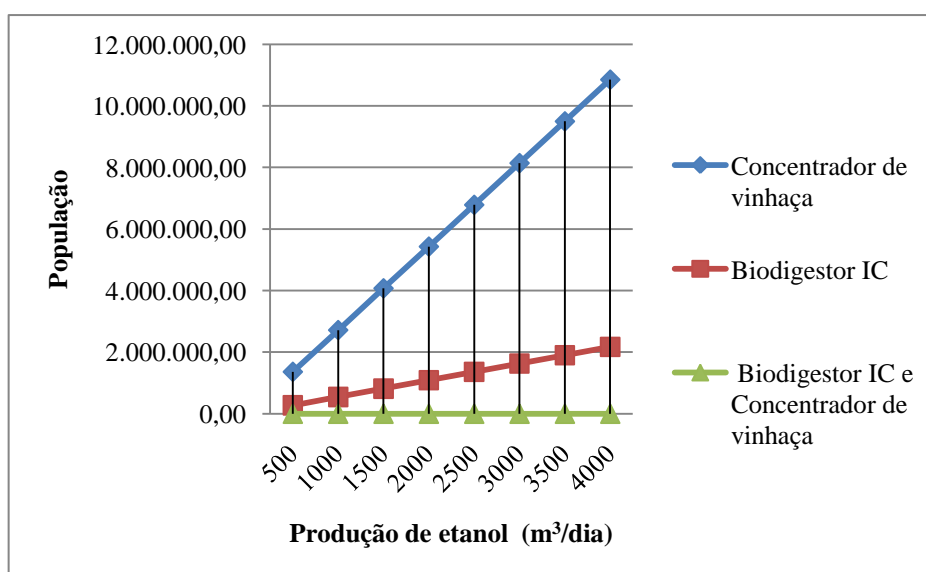
O equivalente populacional, de acordo com Moraes et al. (2014), é o equivalente de poluição potencial gerada por uma usina sucroenergética e uma população, que produz uma quantidade equivalente de carga poluidora, em termos de demanda química de oxigênio. Os resultados encontrados, para uma faixa de produção de etanol diária entre 500 e 4.000 metros cúbicos dia, com a utilização de concentrador de vinhaça, biodigestor de circulação interna e o conjunto concentrador de vinhaça e biodigestor de circulação interna, pode ser constatado na tabela 22 e na figura 10.

Tabela 22 – Equivalente populacional (habitantes)

| Produção de etanol m ³ /dia | Concentrador de vinhaça | Biodigestor IC | Biodigestor IC e Concentrador de vinhaça |
|-------------------------------------------|-------------------------|----------------|---------------------------------------------|
| 500 | 1.356.589,15 | 271.317,83 | 27,13 |
| 1.000 | 2.713.178,29 | 542.635,66 | 54,26 |
| 1.500 | 4.069.767,44 | 813.953,49 | 81,40 |
| 2.000 | 5.426.356,59 | 1.085.271,32 | 108,53 |
| 2.500 | 6.782.945,74 | 1.356.589,15 | 135,66 |
| 3.000 | 8.139.534,88 | 1.627.906,98 | 162,79 |
| 3.500 | 9.496.124,03 | 1.899.224,81 | 189,92 |
| 4.000 | 10.852.713,18 | 2.170.542,64 | 217,05 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 10 – Equivalente populacional (habitantes)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se constatar, a partir da tabela 22, como na figura 10, que a tecnologia com maior capacidade de redução de carga poluidora de vinhaça, em consonância com o indicador equivalência populacional, é o conjugado biodigestor e concentrador, na medida em que o biodigestor reduz a carga de demanda química de oxigênio da vinhaça e o concentrador reduz o fluxo de vinhaça, a partir da redução de seu volume. Se fosse levada em consideração a produção de etanol da safra 2015/2016, de acordo com a UNICA (2017) em 30 milhões e 232 mil metros cúbicos, o equivalente populacional de vinhaça, nessa produção, é de 410.124.031,01 habitantes, praticamente duas vezes a população brasileira (IBGE, 2017). Porém, se toda a vinhaça gerada da produção de etanol supracitada fosse tratada, por biodigestores e posteriormente por concentradores, o equivalente populacional seria de 8.202,48, população equivalente da cidade de Nova Europa, no interior de São Paulo

6.2 Análise do dióxido de carbono equivalentes emitidos e mitigados

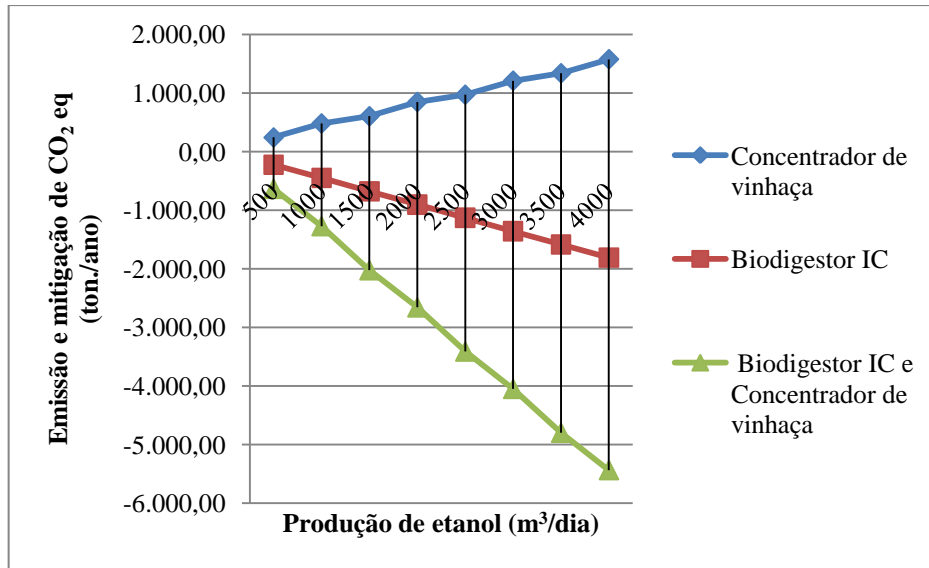
A quantidade de CO₂ eq emitidos e mitigados pelo concentrador de vinhaça, biodigestor IC e o conjunto biodigestor e concentrador, para uma faixa de produção de 500 a 4.000 metros cúbicos de etanos/dia, levando em consideração as variáveis citadas nos sub capítulos 4.6.3, 4.7.3 e 4.8.3 da metodologia dessa dissertação, pode ser observado pela tabela 23 e figura 11.

Tabela 23 – Balanço de emissão e mitigação de CO₂ eq (t/ano)

| Produção de etanol m ³ /dia | Concentrador de vinhaça | Biodigestor IC | Biodigestor IC e Concentrador de vinhaça |
|-------------------------------------------|-------------------------|----------------|---------------------------------------------|
| 500 | 242,50 | -225,27 | -633,96 |
| 1.000 | 481,28 | -450,54 | -1.271,65 |
| 1.500 | 604,34 | -679,53 | -2.025,06 |
| 2.000 | 846,84 | -904,80 | -2.659,03 |
| 2.500 | 969,90 | -1.130,07 | -3.412,44 |
| 3.000 | 1.208,67 | -1.359,07 | -4.050,13 |
| 3.500 | 1.335,46 | -1.584,34 | -4.799,81 |
| 4.000 | 1.574,23 | -1.809,60 | -5.437,50 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 11 – Balanço de emissão e mitigação de CO₂ eq (t/ano)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Novamente, a partir da tabela 23 e figura 11, pode observar que o conjugado biodigestor de circulação interna e concentrador de vinhaça é o mais eficiente no que se refere à mitigação de dióxido de carbono equivalente. Esse resultado é devido:

- **Transporte de vinhaça concentrada:** Quando utilizando o concentrador, o transporte desse subproduto é reduzido se comparado com o transporte de vinhaça *in natura* e biodigerida. Nesse sentido, o consumo de Diesel e, conseqüentemente, a emissão de CO₂ eq. para uma produção de 4.000 metros cúbicos de etanol por dia é de 995,64 t/ano para o concentrador e de 5.202,13 t/ano para o biodigestor.
- **Emissão evitada a partir da utilização de biogás de vinhaça para geração de eletricidade:** A partir da utilização do biodigestor de circulação interna em operação conjunta com um motogerador para geração de eletricidade consegue-se mitigar 0,082 toneladas de dióxido de carbono equivalente por ano para cada MWh gerado de eletricidade, logo, para a uma produção de 4.000 metros cúbicos de etanol/dia temos 7.011,73 tCO₂ eq não emitidos por ano.

Se toda a vinhaça da produção de etanol na safra 2015/2016 fosse tratada por biodigestores IC e posteriormente concentrada, a quantidade em toneladas CO₂ eq não emitida anualmente estaria na ordem de 207.373,28, considerando, de acordo com Moraes et al. (2014), o fator de emissão do transporte no Brasil em 0,8 t/CO₂ eq, as emissões mitigadas corresponderiam a emissão de transporte de uma cidade com 259.217 habitantes.

As emissões evitadas de dióxido de carbono por cada estado da União se toda produção de vinhaça fosse tratado pelo método supracitado, com o respectivo potencial ganho em crédito de carbono, pode ser constado na tabela 24.

Tabela 24 – Mitigação de emissão de CO₂ eq. (t/ano) pelo biodigestor e concentrador para cada estado da com potencial ganho no mercado de créditos de carbono

| Estado | Mitigação de emissão de CO ₂ eq pelo biodigestor e concentrador (t/ano) | Crédito de carbono (R\$/ano) |
|---------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|
| Acre | ND | ND |
| Alagoas | 2.496,04 | R\$ 43.381,18 |
| Amazonas | ND | ND |
| Bahia | 1.429,61 | R\$ 24.846,62 |
| Ceará | ND | ND |
| Espírito Santo | 1.017,57 | R\$ 17.685,37 |
| Goiás | 32.212,40 | R\$ 559.851,51 |
| Maranhão | 1.172,63 | R\$ 20.380,31 |
| Mato Grosso | 9.047,98 | R\$ 157.253,89 |
| Mato Grosso do Sul | 19.034,93 | R\$ 330.827,08 |
| Minas Gerais | 21.001,07 | R\$ 364.998,60 |
| Pará | 191,43 | R\$ 3.327,05 |
| Paraíba | 2.354,77 | R\$ 40.925,90 |
| Paraná | 10.796,40 | R\$ 187.641,43 |
| Pernambuco | 2.399,90 | R\$ 41.710,26 |
| Piauí | 132,50 | R\$ 2.302,85 |
| Rio de Janeiro | 326,82 | R\$ 5.680,13 |
| Rio Grande do Norte | 552,47 | R\$ 9.601,93 |
| Rio Grande do Sul | ND | ND |
| Rondônia | ND | ND |
| Sergipe | 724,22 | R\$ 12.586,94 |
| São Paulo | 99.923,00 | R\$ 1.736.661,74 |
| Tocantins | 1.370,68 | R\$ 23.822,42 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

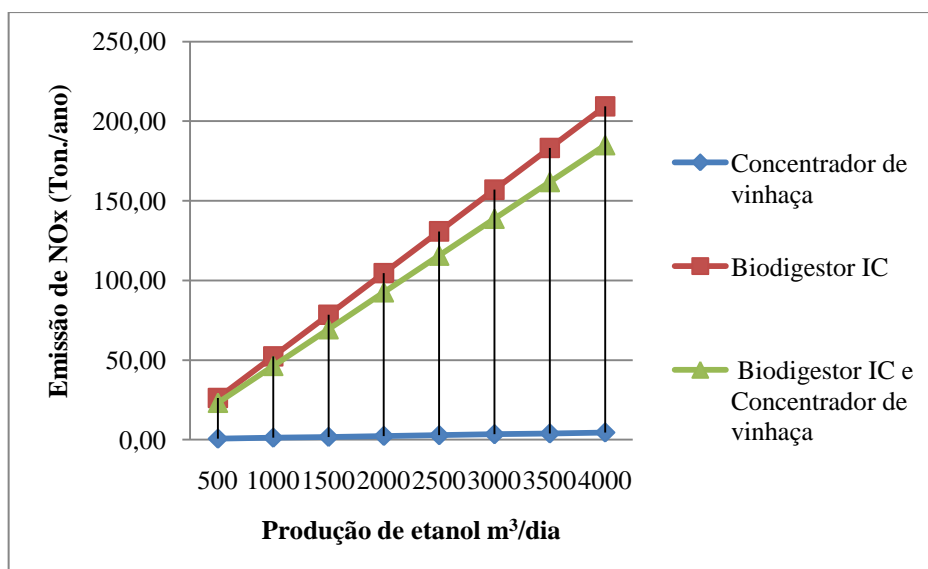
6.3 Análise dos óxidos de nitrogênio emitidos e mitigados

Primeiramente, no que se refere aos óxidos de nitrogênio emitidos e mitigados pelo concentrador de vinhaça, biodigestor IC e o conjunto biodigestor e concentrador, para uma faixa de produção de 500 a 4.000 metros cúbicos de etanos/dia, levando em consideração as variáveis citadas nos sub capítulos 4.6.3, 4.7.3 e 4.8.3 da metodologia dessa dissertação, pode ser observado pela tabela 25 e figura 12.

Tabela 25 – Balanço de emissão e mitigação de NO_x (t/ano)

| Produção de etanol m ³ /dia | Concentrador de vinhaça | Biodigestor IC | Biodigestor IC e Concentrador de vinhaça |
|-------------------------------------------|-------------------------|----------------|---------------------------------------------|
| 500 | 0,62 | 26,17 | 23,18 |
| 1.000 | 1,23 | 52,34 | 46,34 |
| 1.500 | 1,72 | 78,49 | 69,38 |
| 2.000 | 2,34 | 104,66 | 92,56 |
| 2.500 | 2,82 | 130,83 | 115,59 |
| 3.000 | 3,43 | 156,99 | 138,76 |
| 3.500 | 3,93 | 183,15 | 161,81 |
| 4.000 | 4,54 | 209,32 | 184,97 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 12 – Balanço de emissão e mitigação de NO_x (t/ano)

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir da tabela 25 e da figura 12, pode-se constatar que o concentrador de vinhaça é o menos intensivo em emissão de óxidos de nitrogênio, se comparado com as outras duas formas de utilização de vinhaça, devido:

- **Transporte de vinhaça concentrada:** No transporte de vinhaça concentrada, para a produção de 4.000 metros cúbicos de etanol/dia, há o consumo de 339,62 m³/ano de Diesel S500, para mesma produção de etanol é consumido 1.774,50 m³/ano do combustível supracitado no transporte de vinhaça biodigerida;
- **Emissão por motogerador:** Ao contrario do biodigestor, o concentrador de vinhaça não utiliza motogerador em sua operacionalização, na medida em que seu principio fim não é a geração de eletricidade, mas somente a concentração do subproduto. O fator de emissão NO_x do motogerador de biogás é de 232,16 kg NO_x por terajoule.

Portanto, é esse elevado fator de emissão que impede maior eficiência do biodigestor na mitigação de emissão de óxidos de nitrogênio.

Se toda a produção de etanol na safra 2015/2016 fosse tratada por concentrador de vinhaça, a emissão de NO_x seria na ordem de 169,38 toneladas anuais. Nesse estudo, não foi computado a emissão de óxidos de nitrogênio no solo a partir da aplicação de vinhaça *in natura* no solo.

6.4 Análise dos óxidos de enxofre emitidos e mitigados

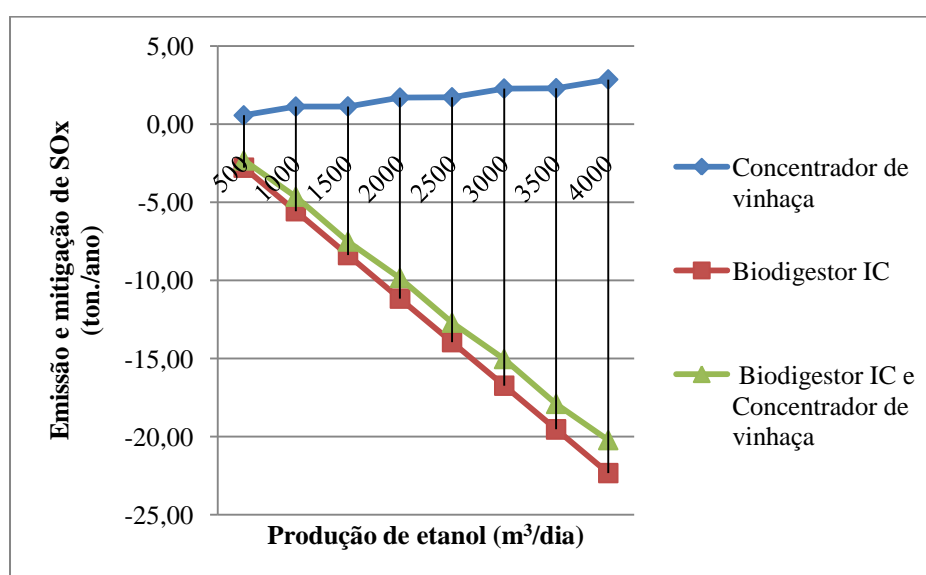
Já no que se refere aos óxidos de enxofre emitidos e mitigados, levando em consideração o mesmo cenário supracitado, as variáveis citadas nos sub capítulos 4.6.3, 4.7.3 e 4.8.3 da metodologia dessa dissertação, pode ser observado pela tabela 26 e figura 13.

Tabela 26 – Balanço de emissão e mitigação de SO_x (t/ano)

| Produção de etanol m^3/dia | Concentrador de vinhaça | Biodigestor IC | Biodigestor IC e Concentrador de vinhaça |
|-----------------------------------------------|-------------------------|----------------|---------------------------------------------|
| 500 | 0,56 | -2,79 | -2,33 |
| 1.000 | 1,12 | -5,58 | -4,65 |
| 1.500 | 1,13 | -8,38 | -7,52 |
| 2.000 | 1,69 | -11,17 | -9,85 |
| 2.500 | 1,71 | -13,96 | -12,71 |
| 3.000 | 2,27 | -16,75 | -15,04 |
| 3.500 | 2,29 | -19,54 | -17,91 |
| 4.000 | 2,85 | -22,33 | -20,23 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 13 – Balanço de emissão e mitigação de SO_x (t/ano)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se constatar tanto na tabela 26, quanto na figura 13, que o mais eficiente no que tange a mitigação de SO_x é o biodigestor de circulação interna, devido a fator de óxidos de enxofre não emitidos a partir do uso de biogás de vinhaça, para geração de eletricidade, em 383,17 g de SO_x/MWh. Mesmo com o elevado consumo de Diesel no transporte de vinhaça biodigerida, o fator de emissão SO_x por massa de Diesel é de 0,0000005 t/kg de Diesel.

Nesse sentido, se toda a vinhaça produzida da safra de etanol 2015/2016 fosse tratada com biodigestores IC, a mitigação de óxidos de enxofre seria da ordem de 843,99 toneladas por ano.

As emissões evitadas de óxidos de enxofre, por cada estado da união, se toda produção de vinhaça fosse tratado pelo método supracitado, pode ser constado na tabela 27.

Tabela 27 – Mitigação de emissão de SO_x pelo biodigestor IC por estado da união (t/ano)

| Estado | Mitigação de emissão de SO _x pelo biodigestor IC (t/ano) |
|---------------------|---------------------------------------------------------------------|
| Acre | 0,14 |
| Alagoas | 10,55 |
| Amazonas | 0,17 |
| Bahia | 6,17 |
| Ceará | 0,42 |
| Espírito Santo | 4,21 |
| Goiás | 131,15 |
| Maranhão | 5,22 |
| Mato Grosso | 37,02 |
| Mato Grosso do Sul | 77,53 |
| Minas Gerais | 85,68 |
| Pará | 1,14 |
| Paraíba | 9,60 |
| Paraná | 43,94 |
| Pernambuco | 9,77 |
| Piauí | 0,92 |
| Rio de Janeiro | 1,65 |
| Rio Grande do Norte | 2,48 |
| Rio Grande do Sul | 0,11 |
| Rondônia | 0,36 |
| Sergipe | 3,13 |
| São Paulo | 406,95 |
| Tocantins | 5,95 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

6.5 Análise dos resultados

Para cada indicador ambiental, uma tecnologia ou conjunto dela é mais eficiente que a outra, em outras palavras, não há melhor ou pior nessa análise, depende, essencialmente o

que esta se avaliando, quadro 11 resume o desempenho de cada uma delas, com base nas avaliações realizadas.

**Quadro 11 – Desempenho ambiental do concentrador, biodigestor IC e conjugado
biodigestor e concentrador**

| Dimensão de avaliação | Tecnologia mais apropriada |
|------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| Equivalente populacional | Biodigestor e concentrador |
| Dióxido de carbono equivalentes emitidos e mitigados | Biodigestor e concentrador |
| Óxidos de nitrogênio emitidos e mitigado | Concentrador |
| Óxidos de enxofre emitidos e mitigado | Biodigestor |

Fonte: Elaborado pelo autor.

7 ANÁLISE ECONÔMICA

7.1 Análise econômica do cenário I: produção de fertilizantes, eletricidade, créditos de carbono e economia com transporte de vinhaça concentrada

Para a realização da análise de viabilidade econômica financeira do concentrador de vinhaça, biodigestor de circulação interna e o conjugado de ambos, foram calculados a taxa interna de retorno, *payback*, valor presente líquido e o *payback* descontado, com uma taxa mínima de atratividade de 15% ao ano para uma faixa de produção de etanol diária entre 500 e 4.000 metros cúbicos.

No cenário supracitado, para o concentrador de vinhaça, foi levado em consideração na receita: venda de fertilizantes, e economia com águas recuperadas, ausência de multas ambientais e economia com transporte de vinhaça *in natura*, no que refere aos custos e despesas foram em consideração: consumo de eletricidade, soda cáustica, manutenção e impostos sobre a venda de fertilizante em 25% sobre a renda e 9% de contribuição social sobre o lucro líquido. Além disso, essa tecnologia foi dimensionada de maneira unitária, com uma capacidade máxima de operação.

No que se refere ao biodigestor IC em conjunto com o motogerador, foi levado em consideração na dimensão receita: venda de fertilizantes, venda de eletricidade no ambiente de contratação regulado e créditos de carbono no mercado de mecanismo de desenvolvimento limpo, como também economia com ausência de multas ambientais. Como despesas e custos foram apontados: operação e manutenção dos biodigestores, dessulfurificador e motogerador, como também impostos sobre venda de eletricidade em 6%, imposto de renda em 25% e contribuições sociais em 9% tanto para eletricidade quanto para os fertilizantes, aonde é isento de ICMS no estado de São Paulo, de acordo com o Ministério da Fazenda (2011). Para o dimensionamento do biodigestor, foi adequado ao volume de vinhaça a ser biodigerida, não havendo, portanto, ociosidade e potencial de crescimento.

No que se refere ao conjugado biodigestor e concentrador de vinhaça, tanto para dimensão receita e despesa, foram as mesmas variáveis utilizados para o concentrador e o biodigestor IC.

Nesse sentido, o valor presente líquido, para Assaf Neto (2002), avalia se um determinado projeto, descontada a taxa de juros, nesse estudo considerado em 15% ao ano, é ou não atrativo ao investidor. De acordo com este método, calcula-se o valor atual do fluxo de caixa com o uso da taxa mínima de atratividade; se esse valor for positivo, a proposta de investimento é atrativa.

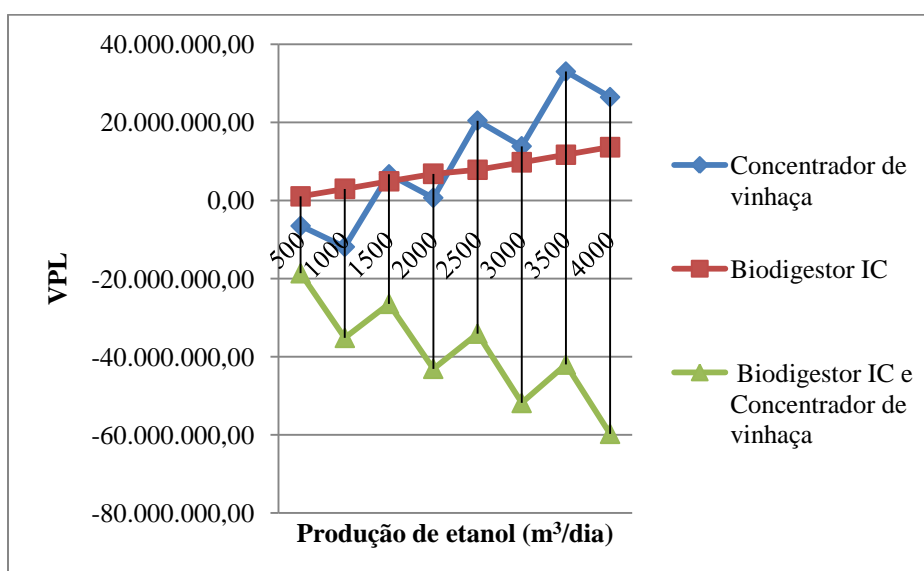
Logo, o VPL, para a faixa de produção de etanol considerada nessa dissertação, para um horizonte de 20 anos, pode ser identificado a partir da tabela 28 e figura 14.

Tabela 28 – Valor presente líquido do cenário I

| Produção de etanol m ³ /dia | Concentrador de vinhaça | Biodigestor IC | Biodigestor IC e Concentrador de vinhaça |
|----------------------------------------|-------------------------|----------------|------------------------------------------|
| 500 | -6.531.821,43 | 1.034.706,41 | -18.617.921,42 |
| 1.000 | -11.900.831,28 | 2.963.031,54 | -35.168.082,15 |
| 1.500 | 6.666.843,63 | 4.891.358,67 | -26.451.282,95 |
| 2.000 | 653.109,34 | 6.819.684,80 | -43.093.547,17 |
| 2.500 | 20.416.971,63 | 7.843.061,83 | -34.085.509,69 |
| 3.000 | 13.851.774,39 | 9.771.387,96 | -51.831.857,80 |
| 3.500 | 32.970.912,25 | 11.699.714,09 | -42.010.974,70 |
| 4.000 | 26.427.761,43 | 13.628.040,22 | -59.735.276,41 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 14 – Valor presente líquido do cenário I



Fonte: Elaborado pelo autor.

No que tange ao concentrador de vinhaça, esse apresenta um valor presente líquido positivo, a partir de 1.500 metros cúbicos de etanol dia, a oscilações em seu VPL é dado a uma determinada ociosidade, sempre positivas, com o aumento de produção a partir da produção supracitada. Nesse sentido, pode-se concluir, quanto maior o volume de vinhaça a ser tratada e menor for a ociosidade do concentrador maior será seu valor presente líquido.

Pode-se constatar que o VPL, para o biodigestor IC, na faixa de produção supracitada, sempre se mostrou positiva e crescente com a produção de etanol. No dimensionamento dessa tecnologia, não há ociosidade, portanto, não apresenta oscilação no cálculo do VPL.

No que se refere ao conjugado biodigestor IC e concentrador de vinhaça, o valor presente líquido se mostrou inviável para todas as faixas de produção de etanol, mostrando-se não ser uma opção econômica para investimento.

No que se refere à Taxa Interna de Retorno (TIR), de acordo com Assaf Neto (2002), representa a taxa de desconto que iguala, em um determinado tempo T, as entradas e saídas previstas no fluxo de caixa. Com base no resultado, o projeto é definido se a Taxa Interna de Retorno for maior do que o retorno mínimo exigido. As vantagens na utilização da TIR, por estar intimamente relacionada com o Valor Presente Líquido, corroboram para uma decisão de investimento convergente.

Para Assaf Neto (2002), a TIR é comparada com a taxa mínima de atratividade para o investidor verificar o desempenho do projeto, aonde a TIR:

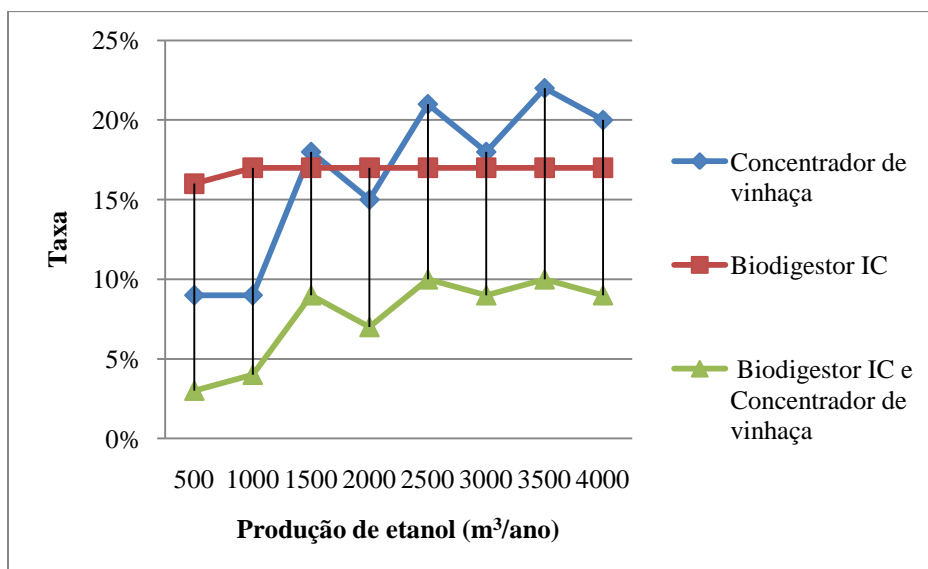
- Maior do que a TMA: investimento é economicamente atrativo;
- Igual à TMA: o investimento é indiferente;
- Menor do que a TMA: o investimento não é economicamente atrativo.

Logo, o VPL, para a faixa de produção de etanol considerada nessa dissertação, para um horizonte de 20 anos, pode ser identificado a partir da tabela 29 e figura 15.

Tabela 29 – Taxa interna de retorno do cenário I

| Produção de etanol m³/dia | Concentrador de vinhaça | Biodigestor IC | Biodigestor IC e Concentrador de vinhaça |
|---------------------------------------------|--------------------------------|-----------------------|-------------------------------------------------|
| 500 | 9% | 16% | 3% |
| 1.000 | 9% | 17% | 4% |
| 1.500 | 18% | 17% | 9% |
| 2.000 | 15% | 17% | 7% |
| 2.500 | 21% | 17% | 10% |
| 3.000 | 18% | 17% | 9% |
| 3.500 | 22% | 17% | 10% |
| 4.000 | 20% | 17% | 9% |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 15 – Taxa interna de retorno do cenário I

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o concentrador de vinhaça, de acordo com a taxa interna de retorno, o mesmo se apresenta viável a partir de uma produção de 1.500 metros cúbicos de etanol por dia, aonde, a sua TIR se iguala à taxa mínima de atratividade de 15%. Pode-se, também, observar variações na taxa interna de retorno devido a potencial ociosidade do concentrador.

No que se refere ao biodigestor de circulação interna, o mesmo apresenta uma taxa interna de retorno superior a taxa mínima de atratividade de 15%, para todas as faixas de produção de etanol, apresentando-se, portanto, como uma opção de investimento.

Já o conjugado biodigestor IC e concentrador de vinhaça, apresentam taxas internas de retorno aquém da taxa mínima de atratividade, para todas as faixas de produção de etanol analisadas nessa dissertação, logo, não se caracterizando-se como uma opção investimento.

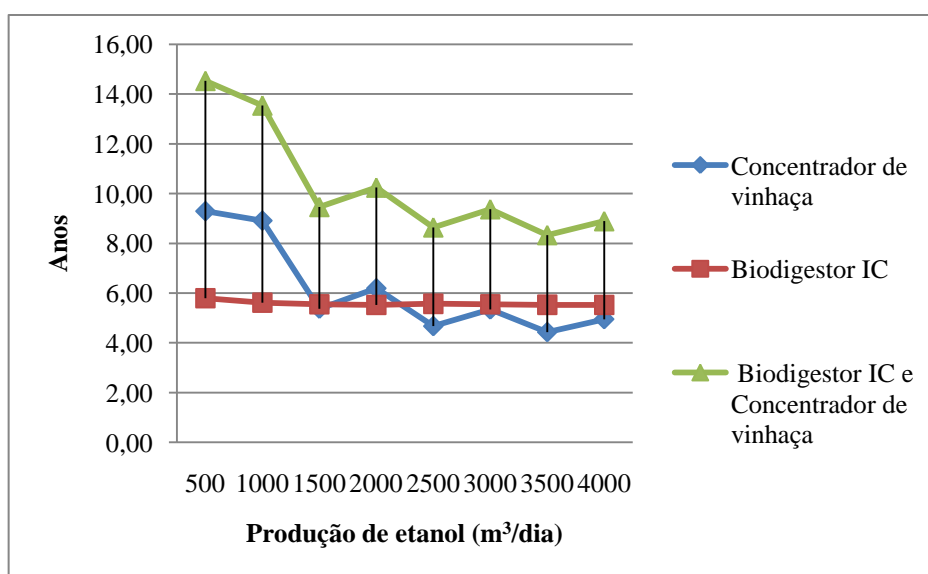
No que se refere ao *payback*, segundo Assaf Neto (2002), define como a determinação do tempo necessário para que o dispêndio de capital seja recuperado por meio de fluxos de caixa promovidos pelo investimento. É interpretado como um importante indicador do nível de risco de um projeto de investimento.

Logo, o *payback*, para a faixa de produção de etanol considerada nessa dissertação, para um horizonte de 20 anos, pode ser identificado a partir da tabela 30 e figura 16.

Tabela 30 – *Payback* do cenário I

| Produção de etanol m ³ /dia | Concentrador de vinhaça (anos) | Biodigestor IC (anos) | Biodigestor IC e Concentrador de vinhaça (anos) |
|----------------------------------------|--------------------------------|-----------------------|-------------------------------------------------|
| 500 | 9,29 | 5,79 | 14,53 |
| 1.000 | 8,91 | 5,61 | 13,54 |
| 1.500 | 5,37 | 5,55 | 9,46 |
| 2.000 | 6,19 | 5,52 | 10,24 |
| 2.500 | 4,67 | 5,57 | 8,64 |
| 3.000 | 5,34 | 5,55 | 9,37 |
| 3.500 | 4,43 | 5,53 | 8,33 |
| 4.000 | 4,95 | 5,52 | 8,89 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 16 – *Payback* do cenário I

Fonte: Elaborado pelo autor.

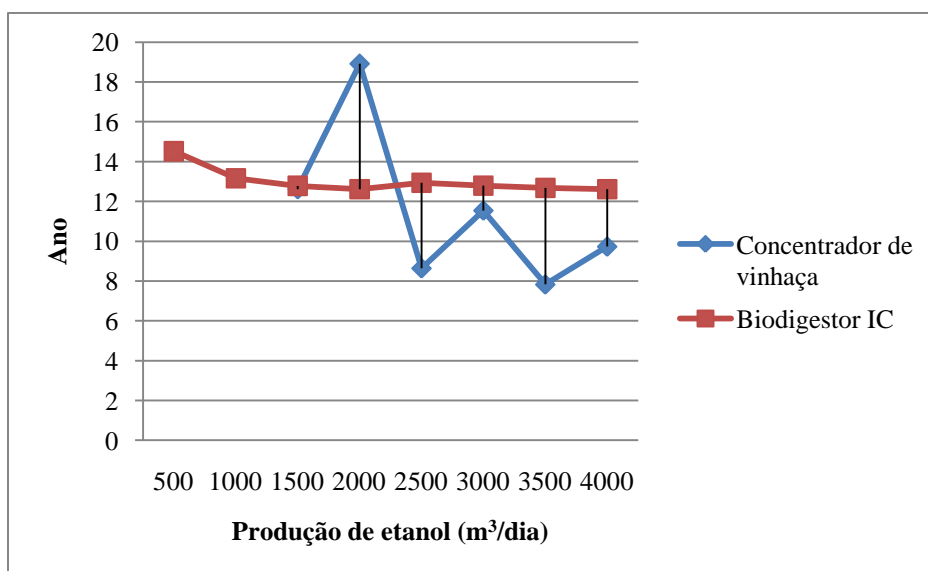
Dentro dessa dimensão de avaliação, a tecnologia de que se apresentou com menor *payback* foi o concentrador de vinhaça para uma produção de 3.500 metros cúbicos de etanol por dia, dado sua operacionalização máxima, ponto ótimo de receita com a venda de fertilizantes e economia com transporte de vinhaça concentrada.

No que se refere ao *payback* descontado, de acordo com Assaf Neto (2002), é o período de tempo necessário para recuperar o investimento, avaliando-se os fluxos de caixa descontados, ou seja, considerando-se o valor do dinheiro no tempo. Portanto, o *payback* descontado, para a faixa de produção de etanol considerada nessa dissertação, para um horizonte de 20 anos, pode ser identificado a partir da tabela 31 e figura 17.

Tabela 31 - *Payback* descontado do cenário I

| Produção de etanol m ³ /dia | Concentrador de vinhaça (anos) | Biodigestor IC (anos) | Biodigestor IC e Concentrador de vinhaça (anos) |
|----------------------------------------|--------------------------------|-----------------------|-------------------------------------------------|
| 500 | ND | 14,52 | ND |
| 1.000 | ND | 13,16 | ND |
| 1.500 | 12,61 | 12,78 | ND |
| 2.000 | 18,91 | 12,61 | ND |
| 2.500 | 8,64 | 12,93 | ND |
| 3.000 | 11,54 | 12,79 | ND |
| 3.500 | 7,83 | 12,68 | ND |
| 4.000 | 9,73 | 12,61 | ND |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 17 – *Payback* descontado do cenário I

Fonte: Elaborado pelo autor.

Novamente, o concentrador de vinhaça apresentou com menor *payback* descontado, também, para uma produção de 3.500 metros cúbicos de etanol por dia, dado sua operacionalização máxima, maximização de receita com a venda de fertilizantes e economia com transporte de vinhaça concentrada.

7.2 Análise econômica do cenário II: geração de eletricidade, créditos de carbono e economia com transporte de vinhaça concentrada

Neste cenário, não foi computado como receita a venda de fertilizantes, oriundo de vinhaça concentrada e biodigerida, no cenário aonde a mesma foi levada em consideração, ela representa cerca 63,3% da receita referente ao concentrador; 50,4% da receita do biodigestor IC e 42,1% do biodigestor e concentrador de vinhaça.

No cenário supracitado, para o concentrador de vinhaça, foi levado em consideração as mesmas receitas, custos e despesas do subcapítulo 7.1, exceto a receita com fertilizantes e os impostos sobre os mesmos, sendo o mesmo método empregado para o biodigestor de circulação interna o conjugado biodigestor IC e concentrador de vinhaça.

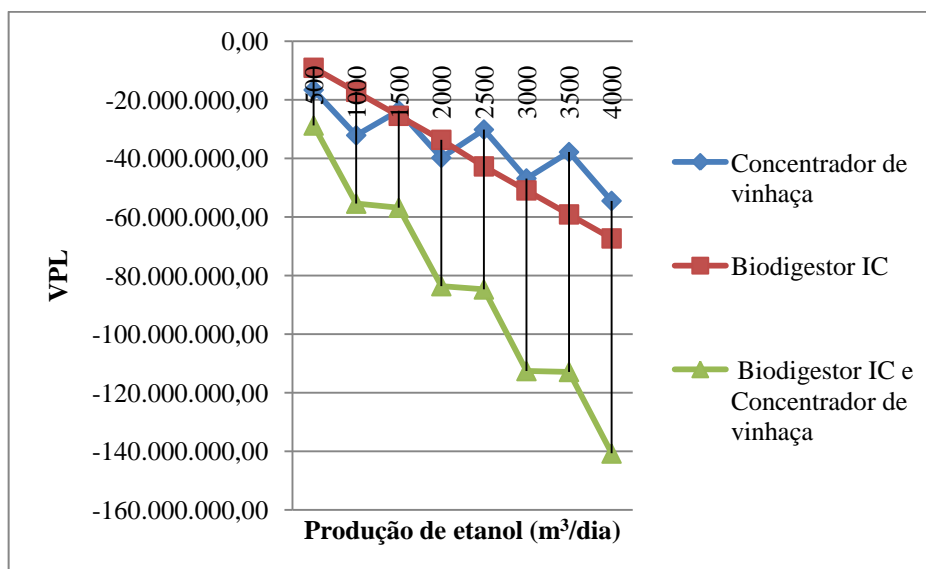
Logo, o VPL, para a faixa de produção de etanol considerada nessa dissertação, para um horizonte de 20 anos e taxa mínima de atratividade de 15% ao ano, pode ser identificado a partir da tabela 32 e figura 18.

Tabela 32 – Valor presente líquido do cenário II

| Produção de etanol m ³ /dia | Concentrador de vinhaça | Biodigestor IC | Biodigestor IC e Concentrador de vinhaça |
|----------------------------------------|-------------------------|----------------|------------------------------------------|
| 500 | -16.653.160,42 | -9.086.632,58 | -28.739.260,41 |
| 1.000 | -32.143.509,26 | -17.279.645,44 | -55.410.760,14 |
| 1.500 | -23.697.173,35 | -25.472.658,31 | -56.815.299,92 |
| 2.000 | -39.832.246,63 | -33.665.671,17 | -83.578.903,14 |
| 2.500 | -30.189.723,34 | -42.763.633,14 | -84.692.204,65 |
| 3.000 | -46.876.259,56 | -50.956.646,00 | -112.559.891,76 |
| 3.500 | -37.878.460,70 | -59.149.658,87 | -112.860.347,66 |
| 4.000 | -54.542.950,51 | -67.342.671,73 | -140.705.988,35 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 18 – Valor presente líquido do cenário II



Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se observar, para todas as tecnologias estudadas, como também para as faixas de produção de etanol referendadas nesta dissertação, não houve valor presente líquido positivo, nesse sentido, as tecnologias estudadas não são economicamente atrativas para investimento.

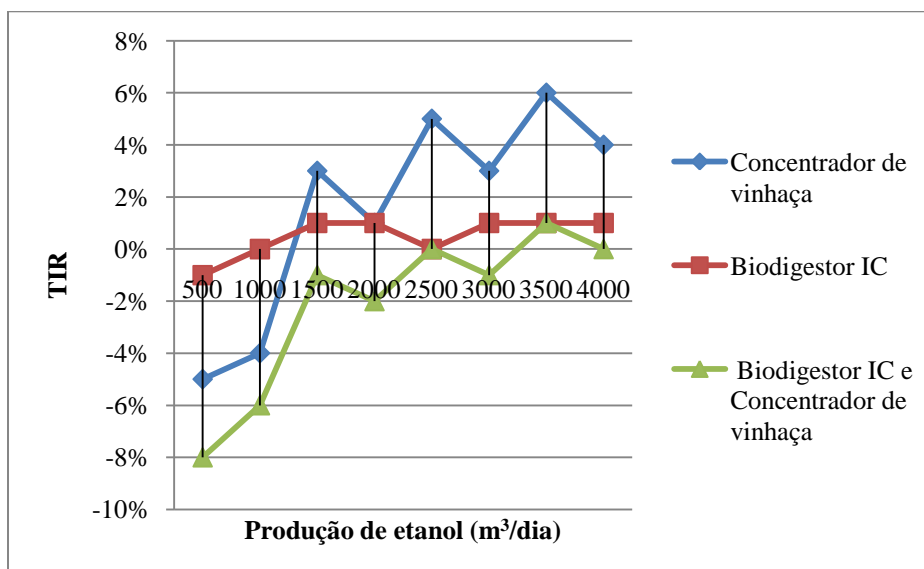
No que se refere a taxa interna de retorno, para um horizonte de 20 anos e taxa mínima de atratividade de 15% ao ano, pode ser identificado a partir da tabela 33 e figura 19.

Tabela 33 – Taxa interna de retorno do cenário II

| Produção de etanol m ³ /dia | Concentrador de vinhaça | Biodigestor IC | Biodigestor IC e Concentrador de vinhaça |
|----------------------------------------|-------------------------|----------------|------------------------------------------|
| 500 | -5% | -1% | -8% |
| 1.000 | -4% | 0% | -6% |
| 1.500 | 3% | 1% | -1% |
| 2.000 | 1% | 1% | -2% |
| 2.500 | 5% | 0% | 0% |
| 3.000 | 3% | 1% | -1% |
| 3.500 | 6% | 1% | 1% |
| 4.000 | 4% | 1% | 0% |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 19 – Taxa interna de retorno do cenário II



Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se constatar, para que para as tecnologias estudadas, como também para todas as faixas de produção de etanol diário, as taxas internas de retorno ficaram abaixo da taxa mínima de atratividade, a tecnologia e faixa de produção de mais se aproximou foi o concentrador de vinhaça, com uma produção de 3.500 metros cúbicos por dia, com uma TIR de 6%, ainda bem aquém de 15% de TMA, mostrando, portanto, a inviabilidade econômica.

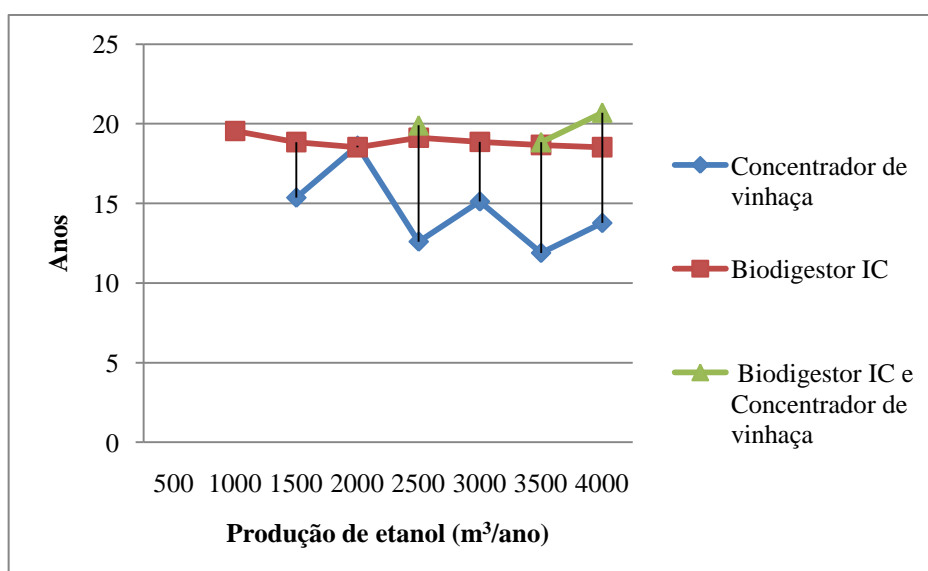
No que se refere ao *payback*, para um horizonte de 20 anos, pode ser identificado a partir da tabela 34 e da figura 20.

Tabela 34 – Payback do cenário II

| Produção de etanol m ³ /dia | Concentrador de vinhaça (anos) | Biodigestor IC (anos) | Biodigestor IC e Concentrador de vinhaça (anos) |
|----------------------------------------|--------------------------------|-----------------------|-------------------------------------------------|
| 500 | ND | ND | ND |
| 1.000 | ND | 19,54 | ND |
| 1.500 | 15,36 | 18,85 | ND |
| 2.000 | 18,62 | 18,53 | ND |
| 2.500 | 12,60 | 19,13 | 19,90 |
| 3.000 | 15,12 | 18,86 | ND |
| 3.500 | 11,89 | 18,67 | 18,85 |
| 4.000 | 13,77 | 18,53 | 20,70 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 20- Payback do cenário II



Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se constatar também, a partir do *payback*, que as tecnologias estudadas, como também para todas as faixas de produção de etanol diário, o tempo de retorno sobre os investimentos se mostraram inadequados, a tecnologia e faixa de produção que apresentou melhor resultado foi o concentrador de vinhaça, com uma produção de 3.500 metros cúbicos por dia, aonde apresentou retorno de 11 anos, considerado longo demais para o método de *payback* simples.

Pode-se concluir a partir de valores presentes líquidos negativos, baixas taxas internas de retorno e longos *paybacks* que os concentradores de vinhaça, biodigestores de circulação interna e o conjugado de ambos são inviáveis economicamente sem a venda de fertilizantes para cenários econômicos sem incentivos ao investimento, como baixa taxa real de juros no mercado e isenções tributárias para tais empreendimentos. Justamente esse cenário de taxa

mínima de atratividade de 11% e completa isenção tributária na geração de eletricidade é analisado no subcapítulo 7.3

7.3 **Análise econômica do cenário III: geração de eletricidade, créditos de carbono e economia com transporte de vinhaça concentrada com taxa mínima de atratividade de 11% e isenção fiscal**

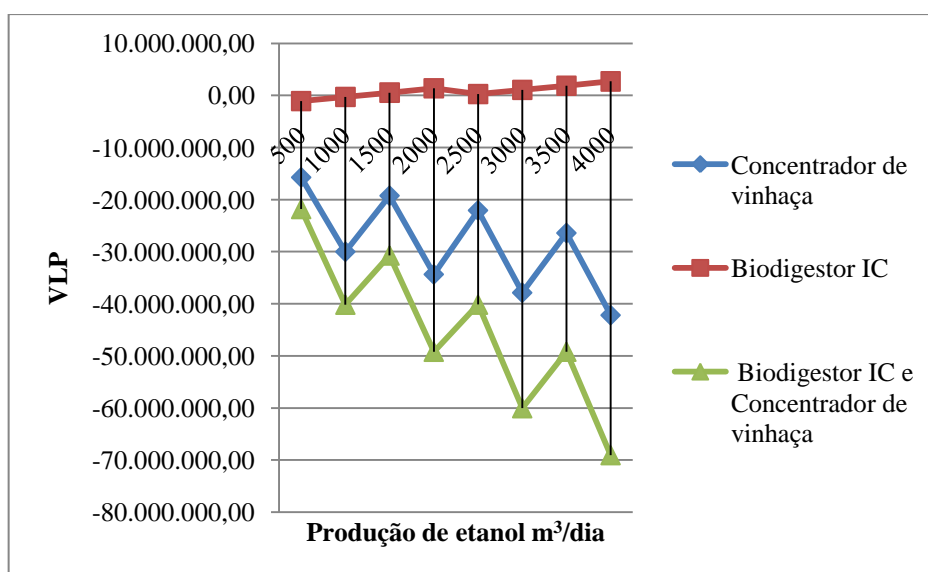
Nesse cenário econômico, replica-se as mesmas tecnologias estudadas para a mesma faixa de produção de etanol diário, porém, com taxa mínima de atratividade de 11% e isenção fiscal, seja no imposto de circulação de mercadorias e serviços, imposto sobre serviços, imposto de renda e contribuição social sobre o lucro líquido, outras dimensões econômicas, como preço do Diesel, créditos de carbono, venda de eletricidade no ambiente de contratação regulado e custos de operação e manutenção das tecnologias se mantiveram como nos cenários I e II.

Logo, o VPL, para a faixa de produção de etanol considerada nessa dissertação, para um horizonte de 20 anos, pode ser identificado a partir da tabela 35 e figura 21.

Tabela 35 – Valor presente líquido do cenário III

| Produção de etanol m³/dia | Concentrador de vinhaça | Biodigestor IC | Biodigestor IC e Concentrador de vinhaça |
|-------------------------------------------------|--------------------------------|-----------------------|-----------------------------------------------------|
| 500 | -15.742.040,21 | -1.089.414,68 | -21.775.756,34 |
| 1.000 | -30.004.713,15 | -274.399,44 | -40.153.301,87 |
| 1.500 | -19.259.005,79 | 540.615,80 | -30.701.767,10 |
| 2.000 | -34.341.918,44 | 1.355.631,04 | -49.196.489,72 |
| 2.500 | -22.074.382,01 | 251.802,74 | -40.141.969,42 |
| 3.000 | -37.858.884,02 | 1.066.817,98 | -60.041.344,02 |
| 3.500 | -26.411.587,30 | 1.881.833,22 | -49.185.157,27 |
| 4.000 | -42.168.041,14 | 2.696.848,46 | -69.056.483,70 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 21– Valor presente líquido do cenário III

Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se observar que a única tecnologia que obteve o valor presente líquido positivo foi o biodigestor de circulação interna, a partir da faixa de produção de etanol de 1.500 metros cúbicos por dia. Na medida em que neste cenário não foi computado políticas de incentivo ao Diesel, como também ao presente modelo logístico nacional, o concentrador de vinhaça e o conjugado biodigestor IC e concentrador não se apresentaram viáveis no que se refere ao VPL.

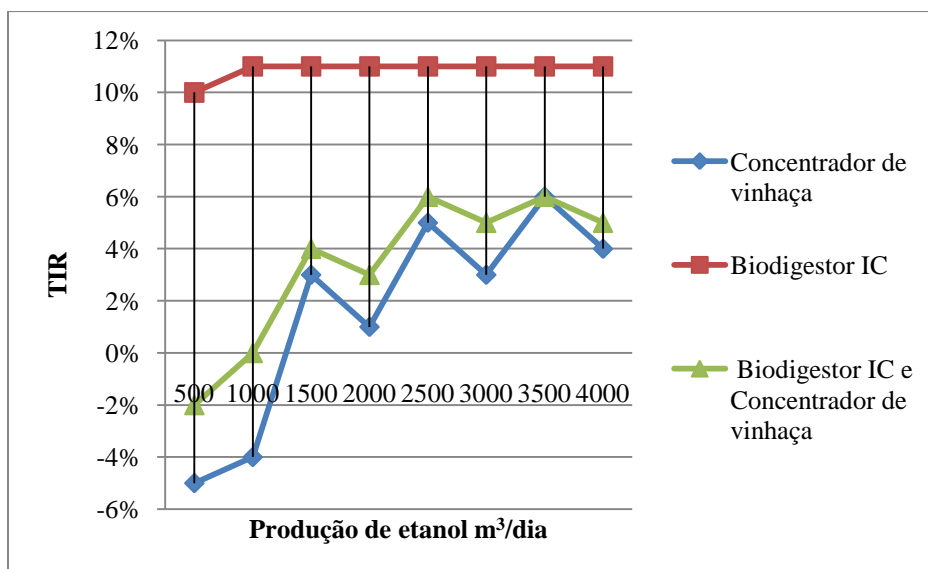
No que se refere a taxa interna de retorno, para a faixa de produção de etanol considerada nessa dissertação, para um horizonte de 20 anos e taxa mínima de atratividade de 11%, pode ser identificado a partir da tabela 36 e figura 22.

Tabela 36 – Taxa interna de retorno do cenário III

| Produção de etanol m ³ /dia | Concentrador de vinhaça | Biodigestor IC | Biodigestor IC e Concentrador de vinhaça |
|-------------------------------------------|-------------------------|----------------|---------------------------------------------|
| 500 | -5% | 10% | -2% |
| 1.000 | -4% | 11% | 0% |
| 1.500 | 3% | 11% | 4% |
| 2.000 | 1% | 11% | 3% |
| 2.500 | 5% | 11% | 6% |
| 3.000 | 3% | 11% | 5% |
| 3.500 | 6% | 11% | 6% |
| 4.000 | 4% | 11% | 5% |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 22 – Taxa interna de retorno do cenário III



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a análise da taxa interna de retorno, somente o biodigestor IC se mostrou economicamente vantajoso, na medida em que foi a única tecnologia que apresentou uma TIR igual a taxa mínima de atratividade, em 11% a partir da produção de 1.000 metros cúbicos de etanol por dia. O concentrador de vinhaça e o conjugado biodigestor IC e concentrador apresentaram taxas de retorno abaixo da TMA, demonstrando inviabilidade econômica nesse cenário.

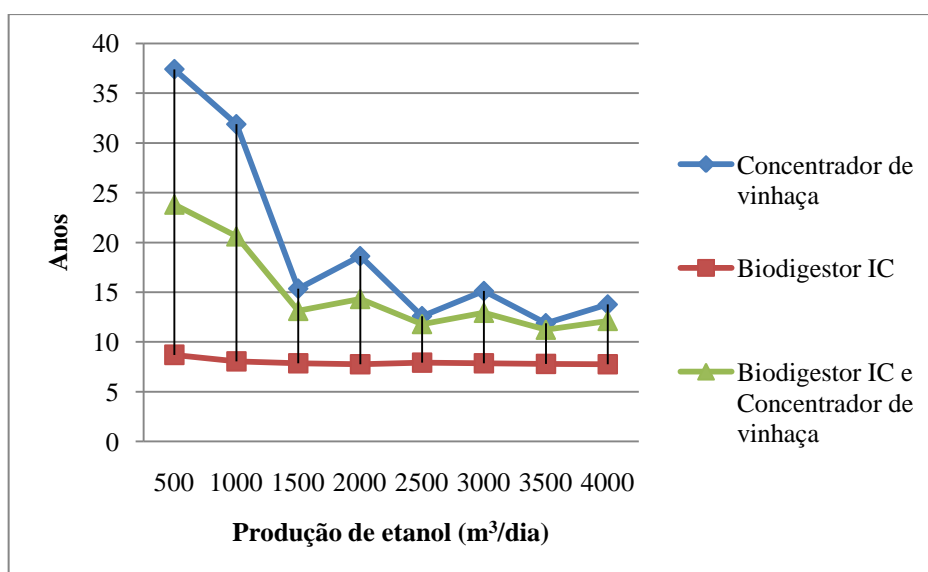
No que se refere ao *payback*, para um horizonte de 20 anos, pode ser identificado a partir da tabela 37 e figura 23.

Tabela 37 – Payback no cenário III

| Produção de etanol m³/dia | Concentrador de vinhaça (anos) | Biodigestor IC (anos) | Biodigestor IC e Concentrador de vinhaça (anos) |
|------------------------------|-----------------------------------|--------------------------|-------------------------------------------------------|
| 500 | 37,40 | 8,71 | 23,82 |
| 1.000 | 31,87 | 8,05 | 20,62 |
| 1.500 | 15,36 | 7,85 | 13,12 |
| 2.000 | 18,62 | 7,76 | 14,32 |
| 2.500 | 12,60 | 7,93 | 11,80 |
| 3.000 | 15,12 | 7,85 | 12,93 |
| 3.500 | 11,89 | 7,80 | 11,23 |
| 4.000 | 13,77 | 7,76 | 12,11 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 23 – Payback do cenário III



Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se constatar também, a partir do *payback* que o biodigestor IC mostrou o menor tempo de retorno se comparado com o concentrador de vinhaça e o conjugado biodigestor e concentrador, com melhor *payback* para produção de 2.000 e 4.000 metros cúbicos de etanol por dia. As outras tecnologias supracitadas, como também para todas as faixas de produção de etanol diário, o tempo de retorno sobre os investimentos se mostraram inadequados.

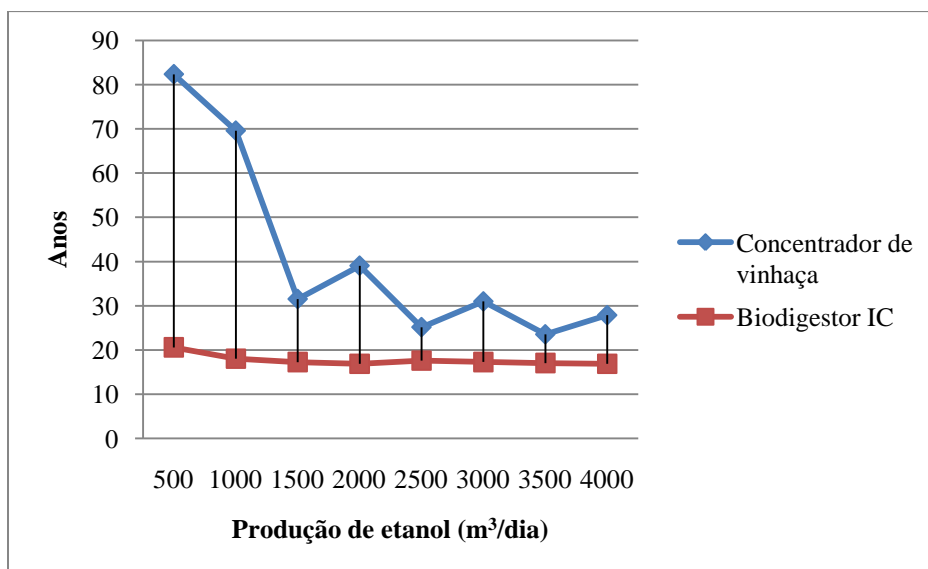
O *payback* descontado, para a faixa de produção de etanol considerada nessa dissertação, para um horizonte de 20 anos, para uma taxa mínima de atratividade de 11%, pode ser identificado a partir da tabela 38 e figura 24.

Tabela 38 – Payback descontado do cenário III

| Produção de etanol m³/dia | Concentrador de vinhaça (anos) | Biodigestor IC (anos) | Biodigestor IC e Concentrador de vinhaça (anos) |
|------------------------------|-----------------------------------|--------------------------|-------------------------------------------------------|
| 500 | 82,34 | 20,61 | ND |
| 1.000 | 69,58 | 18,05 | ND |
| 1.500 | 31,53 | 17,28 | ND |
| 2.000 | 39,06 | 16,91 | ND |
| 2.500 | 25,17 | 17,59 | ND |
| 3.000 | 30,98 | 17,29 | ND |
| 3.500 | 23,54 | 17,07 | ND |
| 4.000 | 27,87 | 16,91 | ND |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 24 – Payback descontado do cenário III



Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se concluir, outrossim, a partir do método do *payback* descontado, que o biodigestor IC mostrou o menor tempo de retorno se comparado com o concentrador de vinhaça e o conjugado biodigestor e concentrador, com melhor *payback* para produção de produção, a partir de 1.500 metros cúbicos de etanol por dia, com menor tempo de retorno em 16 anos, para uma produção de 2.000 m³ de etanol/dia. As outras tecnologias supracitadas, como também para todas as faixas de produção de etanol diário, o tempo de retorno sobre os investimentos se mostraram inadequados.

Pode-se concluir a partir dos métodos de avaliação econômica financeira: VPL, TIR, *payback* e *payback* descontado, em um cenário de baixa taxa de juros real da economia, conseqüentemente, menor taxa mínima de atratividade, como também políticas de isenção fiscal para geração de eletricidade, o biodigestor de circulação interna demonstrou ser viável economicamente, ao contrário dos concentradores de vinhaça e o conjugado de ambos, que demonstraram ser inviáveis economicamente sem a venda de fertilizantes para cenários econômicos com incentivos ao investimento com baixa taxa real de juros e isenções tributárias para geração de eletricidade.

8 DISCUSSÃO

Com o agravamento das questões sócio ambientais na década de setenta, é consenso dentre as principais instituições multilaterais, governos e cientistas da necessidade de reforma do presente modelo de desenvolvimento, capitalismo, baseado na exploração desenfreada dos recursos naturais, sem preocupação com sua recuperação e impacto de sua atividade produtiva.

As conferências realizadas pelas Nações Unidas sobre meio ambiente e desenvolvimento, com destaque para a Rio 92, Johannesburgo 2002 e Rio mais 20, como também o Relatório Brundtland, foram eventos históricos que corroboraram a necessidade do desenvolvimento econômico como instrumento de combate a pobreza e a desigualdade social, mas em consonância com a preservação ambiental, formando o tripé do desenvolvimento sustentável: desenvolvimento econômico, promoção social e preservação ambiental.

Para a consecução do desenvolvimento sustentável, o setor energético, juntamente com o setor de transporte tem importância superlativa, na medida em que esses setores econômicos são intensivos no consumo de combustíveis fósseis, sendo portanto, responsáveis em grande parte, pelo problema do aquecimento global e todos os seus desdobramentos econômicos, sociais e ambientais.

Nesse sentido, esforços mundiais estão sendo empreendidos por empresas, universidades, instituições multilaterais, institutos de pesquisa e organizações não governamentais para a elaboração de soluções em que venham ao encontro de soluções desse problema complexo.

Uma dessas iniciativas foi a terceira Conferência das Partes, em Kyoto, no Japão, a partir da tentativa de precificação do carbono, com a criação de mercados de créditos de carbono, com destaque para a Implementação Conjunta restrita aos países do anexo I e o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, com o objetivo de fomentar tecnologias verdes e empreendimento que viessem ao encontro de mitigação e seqüestro de gases efeito estufa em escala mundial. Porém, o mercado de carbono não obteve êxito esperado, tanto pela Convenção Quadro das Nações Unidas para Mudanças Climáticas, quanto pela Conferência das Partes, aonde, dentre as principais razões, a bibliografia referendada nesta dissertação apontou: não adesão dos Estados Unidos ao Protocolo de Kyoto, despesas elevadas na elaboração e execução de projetos em consonância com as exigências da UNFCCC, incertezas referentes ao mercado de carbono a médio e longo prazo e por fim o baixo preço pago por tonelada equivalente de dióxido de carbono mitigado ou sequestrado, esse cenário pode ser

considerado desfavorável para o Brasil na medida em que o MDL se fundamenta na diferença de custos de redução de emissões de gases efeito estufa. Essa diferença no custo marginal é o atrativo para o país, que possui custo de US\$ 10,00, devido a sua extensão territorial em latitudes tropicais, propício para atividades de reflorestamentos, voltados para o sequestro de carbono e a vantagem competitiva no setor agropecuário, aonde está concentrado o maior número projetos relacionado ao aproveitamento de subproduto para geração de energia.

Mesmo com as fragilidades do mercado de carbono, tecnologias verdes têm sido empreendidas na geração de energia, com o objetivo de retardar os avanços do aquecimento global e ao mesmo tempo contribuir para emergência de um novo modelo de desenvolvimento, a partir da geração distribuída para criação de empregos e fontes de renda descentralizada no espaço geográfico, como por exemplo, a energia eólica, fotovoltaica, geotérmica e a biomassa.

Especificamente no que se refere ao Brasil, sua matriz energética pode ser considerada privilegiada, se comparada com outros países do mundo, na medida em que esta fundada na geração em usinas hidrelétricas e energias renováveis, como a eólica, solar e a biomassa, que oferecem a complementaridade a energia hidráulica em períodos de estiagem. Nesse sentido, dispor de uma matriz energética estruturada, plural e ambientalmente correta é fundamental para o desenvolvimento sustentável de uma nação.

Dentre as opções supracitadas, a biomassa tem significativa participação para aproveitamento e reaproveitamento energético, seja tanto como combustível, quanto para geração de eletricidade, dada a importância em dimensão de produção e valor econômico gerado pelo setor agrícola.

Dentro do setor agrícola, a indústria da cana-de-açúcar tem papel superlativo na geração de biomassa para produção de combustível, como o etanol e geração de eletricidade. Esse setor é responsável por aproximadamente 2% do PIB nacional e por 31% do PIB da agricultura no Brasil em 2012, tendo empregado cerca de 4,5 milhões de pessoas. Porém, esse setor sofreu, de 2008 à 2016 uma das piores crises de sua história, devido fundamentalmente: queda dos investimentos estrangeiros no setor, endividamento das usinas, alto custo de produção, perda de competitividade do etanol frente à gasolina devido a manipulação de preços para contenção da pressão inflacionária e à estiagem na região sudeste nos anos de 2014 e 2015.

Para superação da presente crise do setor, que dá sinais de recuperação desde 2016, passa principalmente pela implementação e melhoria de gestão ambiental, com o objetivo de redução dos impactos ambientais de atividades agrícolas e industriais, a partir da racionalização dos

custos e maximização dos resultados financeiros, a partir a exploração dos subprodutos gerados pela produção, tanto de etanol, quanto da palha, bagaço, torta de filtro e a vinhaça.

Em particular no que se refere a vinhaça, é considerado o pior subproduto da produção de etanol, seja pelo seu volume e capacidade poluidora, e por essa razão a legislação ambiental, com destaque para o estado do Mato Grosso do Sul, possui o quadro legal mais moderno do país no que se refere ao descarte de vinhaça, conforme exposto da revisão da literatura, no subcapítulo 3.1.3, a Lei n.º 4.661/2015, dispõe sobre o armazenamento, distribuição e aplicação da vinhaça. No estado de São Paulo, maior produtor de etanol do país, destaca-se a Norma Técnica P 4.231 da CETESB de 2005, tendo como objetivo estabelecer os critérios e procedimentos para o armazenamento, transporte e aplicação da vinhaça, gerada pela atividade sucroenergética.

Ante o supracitado, o arcabouço legal referente ao descarte de vinhaça tem se tornado cada vez mais restritivo, dado seu impacto na flora, fauna, solo e coleções de águas. Porém, esse subproduto também possui potencial de utilização na produção de leveduras, ração animal, fertilizantes, biogás e geração de eletricidade.

Pelos motivos acima mencionados, a vinhaça tem atraído atenção de cientistas, engenheiros, analistas, universidades, empresas e institutos de pesquisa de referência internacional com o objetivo de ampliar sua compreensão científica, como também a avaliação de sua viabilidade energética, ambiental e econômica.

No transcorrer da revisão bibliográfica desta dissertação, foram apontadas tecnologias para o tratamento de vinhaça, com destaque para os biodigestores, motores de combustão interna e concentradores de vinhaça. Logo, para a elaboração das análises energéticas, ambientais e econômicas foram utilizadas o modelo do biodigestor de circulação interna, pois sua capacidade de conversão é de cerca de 80% a 90% do efluente em biogás, gera apenas 1% a 2% de lodo, TRH entre 2 e 3 horas, taxa de carregamento orgânico entre 20 a 30 kg DQO/m³.r.d, baixo consumo de: eletricidade, produtos químicos e possibilidade de construção modular permitindo futuras ampliações.

No que se refere aos motores, foi utilizado o do tipo de combustão interna, com rendimento de 38% para queima do biogás, produzido pelo biodigestor devido: utilização para pequenas e médias demandas de eletricidade, possibilidade de uso de combustíveis líquidos ou gasosos, instalações são modulares e flexíveis, rápido período de construção e entrada em operação.

Já o concentrado de vinhaça foi utilizado o modelo Citrotec JL, com capacidade de 200 m³/hora, dada as vantagens de utilização do concentrador, devido: redução do risco de

contaminação de vinhaça junto os corpos d'água, percolação nas águas subterrâneas, emissão de gases efeito estufa devido ao menor consumo de Diesel para a aplicação da vinhaça; antecipação de normas ambientais; economia com fertirrigação e redução na utilização de fertilizantes minerais.

Nesse sentido, a presente dissertação se fundamentou em três estudos relacionados a viabilidade energética, ambiental e econômica de utilização de vinhaça, sendo eles Nogueira et al. (2015), Moraes et al. (2014) e Poveda (2014).

O estudo de Nogueira et al. (2015), refere-se a viabilidade de geração de eletricidade a partir de vinhaça para uma usina de 1 MWh, para variação de preços entre US\$ 59,83 e US\$ 76,93 o MWh, para uma taxa mínima de atratividade de 8.76% por ano em um horizonte de 20 anos para três tipos de operações:

- Operação 1: Aonde a usina trabalharia para 7.236 h/ano;
- Operação 2: Aonde usina trabalharia para 5.000 h /ano
- Operação 3: Aonde a usina funcionaria de 4.000 a 8.000 h/ano

Os resultados encontrados por Nogueira et al (2015), de todos os cenários (exceto o considerado muito pessimista em operações 2 e 3) a taxa interna de retorno foi superior a taxa mínima de atratividade, o VPL foi maior do que zero e o retorno foi inferior a 20 anos. Comparando os três modos de funcionamento, pode ser visto que a operação 1, apresenta maior viabilidade econômica do que os outros, devido ao seu maior tempo de funcionamento por ano.

Já Poveda (2014), elaborou cinco cenários para a elaboração da análise de viabilidade econômica, energética e ambiental: fertirrigação com vinhaça *in natura*; concentração de vinhaça em 20° Brix; biodigestão para geração de energia elétrica, concentração de vinhaça em 65° Brix; para posterior incineração para geração de energia elétrica; e a combinação da biodigestão com concentração em 20 ° Brix para uso veicular de biogás. De acordo com esse pesquisador, a concentração de vinhaça em 20° Brix foi que demonstrou viabilidade econômica.

No que se refere a avaliação ambiental, Poveda (2014), encontrou como melhor tecnologia para mitigação e sequestro de CO₂ equivalente, como também aos óxidos de nitrogênio a combinação da biodigestão com concentração em 20 ° Brix para uso veicular de biogás, no que se referente aos óxidos de enxofre, Poveda (2014), aponta a biodigestão para geração de eletricidade.

Com relação ao balanço energético, Poveda (2014), aponta como melhor opção combinação da biodigestão com concentração em 20° Brix para uso veicular de biogás.

Moraes et al. (2014), também realizou avaliações de econômicas, ambientais e energéticas referentes a utilização de vinhaça para geração de eletricidade, cogeração e biogás para substituição do Diesel, aonde considerou três cenários para a avaliação: Uma planta autônoma que produz apenas etanol, uma planta anexa com 50% produção de açúcar e os outros 50% para produção de etanol, e a produção nacional de etanol, na safra 2009/2010, aonde foi considerado uma planta em anexo.

No que se refere a avaliação ambiental, comparando as três aplicações para o biogás, de acordo com Moraes et al. (2014), a substituição do Diesel pelo biogás, com a utilização do excedente para cogeração foi a melhor alternativa em termos de impactos ambientais.

No que se refere a avaliação econômica, os resultados encontrados por Moraes et al. (2014), a substituição do Diesel pelo biogás, em máquinas agrícolas e nos transportes, apresentou a melhor taxa interna de retorno se comparado com outras alternativas. No que se refere a geração de eletricidade, o preço relativamente baixo pago pelos leilões públicos para as energias renováveis no Brasil em comparação com as fontes de energia tradicionais, não facilita a comercialização de energia elétrica a partir do biogás.

No que refere avaliação energética, Moraes et al. (2014) revelou ganhos consideráveis em termos de eletricidade, cogeração, bem como uma alternativa de combustível veicular.

Os resultados encontrados pelo presente autor, no que se refere a avaliação energética, o biodigestor de circulação interna para produção de biogás para posterior geração de eletricidade é o que apresentou melhor desempenho em três de quatro dimensões de avaliação na dimensão energética, sendo elas: equivalente populacional, balanço de geração e consumo de eletricidade e no balanço de energia, sendo nesse último, em conjunto com o concentrador de vinhaça.

No que trata a avaliação ambiental, o conjugado biodigestor e concentrador de vinhaça é o que apresentou melhor desempenho em duas de quatro dimensões de avaliação na dimensão ambiental, sendo elas: equivalente populacional e dióxido de carbono equivalentes emitidos e mitigados.

Na dimensão econômica, no cenário aonde é computado a venda de fertilizantes, tanto o concentrador de vinhaça quanto biodigestor de circulação interna apresentam taxa interna de retorno e valor presente líquido superior a zero, porém, no cenário aonde o fertilizante não é computado, nenhuma das tecnologias apresentaram viabilidade econômica. Somente para o cenário aonde a taxa mínima de atratividade é de 11% com políticas de isenção fiscal, ainda sem a venda de fertilizantes, o biodigestor IC apresentou TIR e VPL maior que zero.

A tabela 39 apresenta o resumo dos resultados encontrados nesses quatro estudos:

Tabela 39 – Resultados de avaliação energética, ambiental e econômica realizada por Nogueira et al. (2015), Moraes et al. (2014), Poveda (2014) e autor da presente dissertação

| Autor | Dados técnico-operacionais | | | | | Avaliação energética | | | Avaliação ambiental | | | Avaliação econômica | | |
|------------------------|----------------------------|-------------------------------------------|---------------------|---------------|----------------------------------------|--------------------------|----------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|---------------------|------------------|----------------|
| | Uso de vinhaça | Produção de vinhaça (m ³ /dia) | Período de safra | Tipo de usina | Maquinário | Balanco energia (TJ/ano) | Energia elétrica (MWh/ano) | Consumo de Diesel (m ³ /ano) | Emissão de CO ₂ eq./ano (t/ano) | Emissão de NO _x /ano (t/ano) | Emissão de SO _x /ano (t/ano) | TIR (%) | VPL | Payback (anos) |
| Noqueira et al. (2015) | Energia elétrica | 5.000 | 7.236 horas | - | Biodigestor Plug Flow e motogerador | - | - | - | - | - | - | 18,8 | USD 1.707.558 | 8 |
| | Energia elétrica | 5.000 | 5.000 horas | - | Biodigestor Plug Flow e motogerador | - | - | - | - | - | - | 11,1 | USD 371.901 | 15 |
| | Energia elétrica | 5.000 | 4.000 – 8.000 horas | - | Biodigestor Plug Flow e motogerador | - | - | - | - | - | - | 14,6 | USD 969.243 | 10 |
| Moraes et al. (2014) | Energia elétrica | 10.180 | 167 dias | autonoma | Biodigestor IC e motor Caterpillar 38% | - | 27.400 | - | ≈ - 27.500 | - | - | 13 | ≈ USD 17.000.000 | - |
| | Energia elétrica | 5.988 | 167 dias | anexa | Biodigestor IC e motor Caterpillar 38% | - | 27.500 | - | ≈ - 19.000 | - | - | ≈ 12,2 | ≈ USD 4.000.000 | - |
| | Co geração | 10.180 | 167 dias | autonoma | Biodigestor IC e motor Siemens 30% | - | 21.700 | - | ≈ - 28.000 | - | - | ≈ 13,2 | ≈ USD 21.000.000 | - |
| | Co geração | 5.988 | 167 dias | anexa | Biodigestor IC e motor Siemens 30% | - | 21.800 | - | ≈ - 20.000 | - | - | ≈ 11,8 | ≈ USD 4.000.000 | - |
| | Subst. Diesel | 10.180 | 167 dias | autonoma | Biodigestor IC | - | - | - | ≈ - 34.000 | - | - | ≈ 13,9 | ≈ USD 31.000.000 | - |

Fonte: Adaptado de Nogueira et al. (2015), Moraes et al. (2014) e Poveda (2014).

Tabela 39 – Resultados de avaliação energética, ambiental e econômica realizada por Nogueira et al. (2015), Moraes et al. (2014), Poveda (2014) e autor da presente dissertação

| Autor | Dados técnico-operacionais | | | | Avaliação energética | | | Avaliação ambiental | | | Avaliação econômica | | | |
|----------------------|----------------------------------------|-------------------------------------------|------------------|---------------|---------------------------------------------------------------------------|--------------------------|----------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|---------|-----------------|----------------|
| | Uso de vinhaça | Produção de vinhaça (m ³ /dia) | Período de safra | Tipo de usina | Maquinário | Balanco energia (TJ/ano) | Energia elétrica (MWh/ano) | Consumo de Diesel (m ³ /ano) | Emissão de CO ₂ eq./ano (t/ano) | Emissão de NO _x /ano (t/ano) | Emissão de SO _x /ano (t/ano) | TIR (%) | VPL | Payback (anos) |
| Moraes et al. (2014) | Subst. Diesel | 5.988 | 167 dias | anexa | Biodigestor IC | - | - | - | ≈ - 25.000 | - | - | ≈ 12,3 | ≈ USD 5.500.000 | - |
| | Conc. em 20° Bx | 3.967 | 242 dias | - | Conc. Citrotec Ecovin Biodigestor IC e motor de combustão 29% | -94,7 | - 600 | 219,2 | 13.669,52 | 3,18 | 0,34 | 21 | R\$1.071.192 | 9 |
| | Energia elétrica | 3.967 | 242 dias | - | Conc. Citrotec Ecovin e incinerador SAACKE | -7,9 | 6.600 | 126 | 2.277,84 | 26,80 | -0,81 | 21 | R\$6.872.708 | 9 |
| Poveda (2014) | Queima com geração de energia elétrica | 3.967 | 242 dias | - | Conc. Citrotec Ecovin, Biodigestor IC e purificador <i>water scrubber</i> | 336 | 10.100 | - | 1.852,80 | 40,26 | 45,54 | 21 | R\$7.258.165 | 9 |
| | Conc. em 20° Bx com subst. Diesel | 3.967 | 242 dias | - | | -36,2 | - | - | - 2.176,32 | -14,94 | 2,85 | 21 | R\$9.402.336 | 9 |

Fonte: Adaptado de Nogueira et al. (2015), Moraes et al. (2014) e Poveda (2014).

Tabela 39 – Resultados de avaliação energética, ambiental e econômica realizada por Nogueira et al. (2015), Moraes et al. (2014), Poveda (2014) e autor da presente dissertação

| Autor | Dados técnico-operacionais | | | | | Avaliação energética | | | Avaliação ambiental | | | Avaliação econômica | | |
|--------|----------------------------|-------------------------------------------|------------------|---------------|--------------------------|--------------------------|----------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|---------------------|-------------|-----------------|
| | Uso de vinhaça | Produção de vinhaça (m ³ /dia) | Período de safra | Tipo de usina | Maquinário | Balanco energia (TJ/ano) | Energia elétrica (MWh/ano) | Consumo de Diesel (m ³ /ano) | Emissão de CO ₂ eq./ano (t/ano) | Emissão de NO _x /ano (t/ano) | Emissão de SO _x /ano (t/ano) | TIR (%) | VPL (R\$) | Pay Back (anos) |
| Autor | Conc. em 65° Bx | 5.000 | 200 dias | autonoma | Conc. Citrotec Ecovin JL | -1,56 | -1.411,20 | 43,25 | 242,50 | 0,62 | 0,56 | 9 | -6.531.821 | 9,29 |
| | | | | | | | | | | | | -5 | -16.653.160 | ND |
| | | | | | | | | | | | | -5 | -15.742.040 | 37,4 |
| | | 10.000 | | | | -3,07 | -2.822,40 | 85,22 | 481,28 | 1,23 | 1,12 | 9 | -11.900.831 | 8,91 |
| | | | | | | | | | | | | -4 | -32.143.509 | ND |
| | | | | | | | | | | | | -4 | -30.004.713 | 31,87 |
| | | 15.000 | | | | -4,58 | -2.822,40 | 127,20 | 604,34 | 1,72 | 1,13 | 18 | 6.666.843 | 5,37 |
| | | | | | | | | | | | | 3 | -23.697.173 | 15,36 |
| | | | | | | | | | | | | 3 | -19.259.005 | 15,36 |
| | | 20.000 | | | | -6,14 | -4.233,60 | 170,45 | 846,84 | 2,34 | 1,69 | 15 | 653.109 | 6,19 |
| | | | | | | | | | | | | 1 | -39.832.246 | 18,62 |
| | | | | | | | | | | | | 1 | -34.341.918 | 18,62 |
| | | 25.000 | | | | -7,65 | -4.233,60 | 212,42 | 969,90 | 2,82 | 1,71 | 21 | 20.416.971 | 4,67 |
| | | | | | | | | | | | | 5 | -30.189.723 | 12,6 |
| | | | | | | | | | | | | 5 | -22.074.382 | 12,6 |
| | | 30.000 | | | | -9,17 | -5.644,80 | 254,40 | 1.208,67 | 3,43 | 2,27 | 18 | 13.851.774 | 5,34 |
| 3 | -46.876.259 | | 15,12 | | | | | | | | | | | |
| 3 | -37.858.884 | | 15,12 | | | | | | | | | | | |
| 35.000 | -10,72 | -5.644,80 | 297,65 | 1.335,46 | 3,93 | 2,29 | 22 | 32.970.912 | 4,43 | | | | | |
| | | | | | | | 6 | -37.878.460 | 11,89 | | | | | |
| | | | | | | | 6 | -26.411.587 | 11,89 | | | | | |
| 40.000 | -12,24 | -7.056,00 | 339,62 | 1.574,23 | 4,54 | 2,85 | 20 | 26.427.761 | 4,95 | | | | | |
| | | | | | | | 4 | -54.542.950 | 13,77 | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | 4 | -42.168.041 | 13,77 |

Fonte: Adaptado de Nogueira et al. (2015), Moraes et al. (2014) e Poveda (2014).

Tabela 39 – Resultados de avaliação energética, ambiental e econômica realizada por Nogueira et al. (2015), Moraes et al. (2014), Poveda (2014) e autor da presente dissertação

| Autor | Dados técnico-operacionais | | | | | Avaliação energética | | | Avaliação ambiental | | | Avaliação econômica | | |
|-------|----------------------------|-------------------------------------------|------------------|---------------|----------------------------------------------------|--------------------------|----------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|---------------------|-------------|-----------------|
| | Uso de vinhaça | Produção de vinhaça (m ³ /dia) | Período de safra | Tipo de usina | Maquinário | Balanco energia (TJ/ano) | Energia elétrica (MWh/ano) | Consumo de Diesel (m ³ /ano) | Emissão de CO ₂ eq./ano (t/ano) | Emissão de NO _x /ano (t/ano) | Emissão de SO _x /ano (t/ano) | TIR (%) | VPL (R\$) | Pay Back (anos) |
| Autor | Energia elétrica | 5.000 | 200 dias | autonoma | Biodigestor IC e motor de combustão interna de 38% | 93,26 | 8.768,62 | 222,13 | -225,27 | 26,17 | -2,79 | 9 | 1.034.706 | 5,79 |
| | | | | | | | | | | | | -1 | -9.086.632 | ND |
| | | | | | | | | | | | | 10 | -1.089.414 | 8,71 |
| | | | | | | | | | | | | 9 | 2.963.031 | 5,61 |
| | | | | | | | | | | | | 0 | -17.279.645 | 19,54 |
| | | | | | | | | | | | | 11 | -274.399,44 | 8,05 |
| | | | | | | | | | | | | 17 | 4.891.358 | 5,55 |
| | | | | | | | | | | | | 1 | -25.472.658 | 18,85 |
| | | | | | | | | | | | | 11 | 540.615 | 7,85 |
| | | | | | | | | | | | | 17 | 6.819.684 | 5,52 |
| | | | | | | | | | | | | 1 | -33.665.671 | 18,53 |
| | | | | | | | | | | | | 11 | 1.355.631 | 7,76 |
| | | | | | | | | | | | | 17 | 7.843.061 | 5,57 |
| | | | | | | | | | | | | 0 | -42.763.633 | 19,13 |
| | | | | | | | | | | | | 11 | 251.802 | 7,93 |
| | | | | | | | | | | | | 17 | 9.771.387 | 5,55 |
| 1 | -50.956.646 | 18,86 | | | | | | | | | | | | |
| 11 | 1.066.817 | 7,85 | | | | | | | | | | | | |
| 17 | 11.699.714 | 5,53 | | | | | | | | | | | | |
| 1 | -59.149.658 | 18,67 | | | | | | | | | | | | |
| 11 | 1.881.833 | 7,80 | | | | | | | | | | | | |
| 17 | 13.628.040 | 5,52 | | | | | | | | | | | | |
| 1 | -67.342.671 | 18,53 | | | | | | | | | | | | |
| 11 | 2.696.848 | 7,76 | | | | | | | | | | | | |

Fonte: Adaptado de Nogueira et al. (2015), Moraes et al. (2014) e Poveda (2014).

Tabela 39 – Resultados de avaliação energética, ambiental e econômica realizada por Nogueira et al. (2015), Moraes et al. (2014), Poveda (2014) e autor da presente dissertação

| Autor | Dados técnico-operacionais | | | | Avaliação energética | | | Avaliação ambiental | | | Avaliação econômica | | | | |
|--------|------------------------------------|-------------------------------------------|------------------|---------------|-------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|----------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|---------|-------------|-----------------|-------|
| | Uso de vinhaça | Produção de vinhaça (m ³ /dia) | Período de safra | Tipo de usina | Maquinário | Balanco energia (TJ/ano) | Energia elétrica (MWh/ano) | Consumo de Diesel (m ³ /ano) | Emissão de CO ₂ eq./ano (t/ano) | Emissão de NO _x /ano (t/ano) | Emissão de SO _x /ano (t/ano) | TIR (%) | VPL (R\$) | Pay Back (anos) | |
| Autor | Energia elétrica e Conc. em 65° Bx | 5.000 | 200 dias | autonoma | Biodigestor IC e motor de combustão interna de 38% e conc. Citrotec Ecovin JL | 99,70 | 7.357,42 | 43,25 | -633,96 | 23,18 | -2,33 | 3 | -18.617.921 | 14,53 | |
| | | | | | | | | | | | | -8 | -28.739.260 | ND | |
| | | | | | | | | | | | | -2 | -21.775.756 | 23,82 | |
| | | 4 | | | | -35.168.082 | 13,54 | | | | | | | | |
| | | 10.000 | | | | 199,45 | 15.674,83 | 85,22 | - | 1.271,65 | 46,34 | -4,65 | -6 | -55.410.760 | ND |
| | | | | | | | | | | | | | 0 | -40.153.301 | 20,62 |
| | | | | | | | | | | | | | 9 | -26.451.282 | 9,46 |
| | | 15.000 | | | | 299,20 | 25.403,45 | 127,20 | - | 2.025,06 | 69,38 | -7,52 | -1 | -56.815.299 | ND |
| | | | | | | | | | | | | | 4 | -30.701.767 | 13,12 |
| | | | | | | | | | | | | | 7 | -43.093.547 | 10,24 |
| | | | | | | | | | | | | | -2 | -83.578.903 | ND |
| | | | | | | | | | | | | | 3 | -49.196.489 | 14,32 |
| | | | | | | | | | | | | | 10 | -34.085.509 | 8,64 |
| | | 20.000 | | | | 498,65 | 42.489,48 | 212,42 | - | 3.412,44 | 115,59 | -12,71 | 0 | -84.692.204 | 19,9 |
| | | | | | | | | | | | | | 6 | -40.141.969 | 11,80 |
| | | | | | | | | | | | | | 9 | -51.831.857 | 9,37 |
| -1 | - | | ND | | | | | | | | | | | | |
| 5 | 112.559.891 | | 12,93 | | | | | | | | | | | | |
| 10 | -42.010.974 | | 8,33 | | | | | | | | | | | | |
| 30.000 | 598,40 | 50.806,90 | 254,40 | - | 4.050,13 | 138,76 | -15,04 | 1 | - | 18,85 | | | | | |
| | | | | | | | | 6 | 112.860.347 | 11,23 | | | | | |
| | | | | | | | | 9 | -49.185.157 | 8,89 | | | | | |
| 35.000 | 698,10 | 60.535,52 | 297,65 | - | 4.799,81 | 161,81 | -17,91 | 0 | - | 20,70 | | | | | |
| | | | | | | | | 6 | -49.185.157 | 11,23 | | | | | |
| | | | | | | | | 9 | -59.735.276 | 8,89 | | | | | |
| 40.000 | 797,85 | 68.852,94 | 339,62 | - | 5.437,50 | 184,97 | -20,23 | 0 | - | 20,70 | | | | | |
| | | | | | | | | 5 | 140.705.988 | 12,11 | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | 5 | -69.056.483 | 12,11 | |

Fonte: Adaptado de Nogueira et al. (2015), Moraes et al. (2014) e Poveda (2014).

Ante a tabela 39, o autor da presente dissertação entra em consonância com a avaliação energética realizada por Moraes et al. (2014), no que se refere ao desperdício energético no que se refere fertilização de vinhaça *in natura*. Nesse cenário, a geração de biogás, seja para geração de eletricidade, substituição de combustíveis em veículos e incremento de produção de etanol de segunda geração, a partir de substituição parcial ou total de bagaço para geração de energia elétrica. Poveda (2014), na avaliação energética apontou como mais eficiente a biodigestão com concentração em 20° Brix, para uso veicular de biogás, cenário não abordado na presente dissertação, como também por Nogueira et al. (2015).

No que se refere a dimensão ambiental, Moraes et al. (2014), apontam substituição do Diesel pelo biogás, com a utilização do excedente para cogeração, como a melhor alternativa em termos de impactos ambientais. Poveda (2014), aponta a biodigestão com concentração em 20° Brix para uso veicular de biogás. Ambos os autores, embora diferem na metodologia, apontam ao final da utilização, seja para cogeração ou concentração, a utilização do biogás na substituição de combustíveis, sobretudo o Diesel, dimensão também não abordada nesta dissertação, como também por Nogueira et al. (2015).

Na dimensão econômica, Moraes et al. (2014), apontam como mais atrativa a substituição do Diesel pelo biogás em máquinas agrícolas e no transportes, Poveda (2014), aponta a concentração de vinhaça em 20° Brix, Nogueira et al. (2015), na medida em que abordaram exclusivamente a geração de eletricidade, aponta como mais viável o cenário de operação¹, aonde a mesma opera em torno de 7.236 h/ano. Na presente dissertação, computando a venda de fertilizantes, tanto o concentrador de vinhaça, quando o biodigestor IC, para geração de eletricidade apresentam viabilidade econômica. Porém, com sem o cômputo desse subproduto, ambas as tecnologias não apresentam atratividade. A geração de eletricidade vai apresentar viabilidade sem o cômputo de fertilizantes com isenções fiscais e taxa mínima de atratividade de 11%. Esse último cenário, entra em consonância com Nogueira et al. (2015), no que se refere a taxa mínima de atratividade, no caso adotado em 8,76% e nessa dissertação apontado em 11%, o que pode se concluir que a diminuição da taxa básica de juros da economia precisa ser diminuída para também contribuir para viabilidade econômica de geração de eletricidade a partir de vinhaça.

O quadro 12 sintetiza a viabilidade encontrada pelos autores supracitados.

Quadro 12 - Comparação de viabilidade energética, ambiental e econômica entre Nogueira et al. (2015), Moraes et al. (2014) e Poveda (2014) e o autor da presente dissertação

| Autor | Viabilidade energética | Viabilidade ambiental | Viabilidade econômica | |
|------------------------|----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| Nogueira et al. (2015) | - | - | Geração de eletricidade a partir de operação em 7.236 h/ano. | |
| Moraes et al. (2014) | Todas as opções exceto a utilização de vinhaça <i>in natura</i> . | Substituição do Diesel pelo biogás, com a utilização do excedente para cogeração. | Substituição do Diesel pelo biogás. | |
| Poveda (2014) | Biodigestão com concentração em 20° Brix para uso veicular de biogás | Biodigestão com concentração em 20° Brix para uso veicular de biogás. | Concentração de vinhaça em 20° Brix. | |
| Autor | Biodigestor IC para geração de eletricidade | Biodigestor IC para geração de eletricidade e concentrador de vinhaça | Cenário I | Concentrador de vinhaça e Biodigestor IC em separado |
| | | | Cenário II | Nenhuma das tecnologias |
| | | | Cenário III | Biodigestor IC |

Fonte: Adaptado de Nogueira et al. (2015), Moraes et al. (2014) e Poveda (2014).

9 CONCLUSÃO

9.1 Objetivos, proposições e respostas as mesmas

Portanto, ante as emergências ambientais do século XXI, a importância de matrizes energéticas sustentáveis, com destaque para a biomassa, a dimensão do setor sucroenergético brasileiro na economia e os desafios e oportunidades referentes a vinhaça e as tecnologias apresentadas para o tratamento desse subproduto, essa dissertação teve como objetivo geral analisar a viabilidade econômica, ambiental e energética da utilização em concentradores de vinhaça, biodigestores de circulação interna e em ambos, sendo os objetivos específicos e proposições:

Como apresentado na metodologia, cada objetivo foi cumprido e respondido a partir das proposições levantadas, sendo elas:

Objetivo específico 1:

Identificar o valor presente líquido, taxa interna de retorno, *payback* e *payback* descontado de biodigestores anaeróbios de circulação interna, concentrador de vinhaça e o conjugado de ambos.

Proposição 1:

É viável economicamente a utilização de biodigestores anaeróbios de circulação interna, concentrador de vinhaça e o conjugado de ambos?

Resposta a proposição 1:

Independente do cenário avaliado, o conjugado biodigestor e concentrador não se mostrou viável economicamente para todas as faixas de produção de etanol. No que se refere ao concentrador de vinhaça, esse apresenta viabilidade no cenário aonde o fertilizante é computado como entrada no fluxo de caixa e partir de escalas de produção de 1.500 metros cúbicos de etanol por dia. Em cenários aonde o fertilizante não é contabilizado, essa tecnologia não apresenta viabilidade, conforme metodologia desenvolvida nesta dissertação. No que se refere ao biodigestor, essa apresenta viabilidade no cenário aonde o fertilizante é computado nos cálculos de viabilidade para todas as faixas de produção, porém, retirado esse subproduto, o biodigestor IC, assim como o concentrador, também não apresentam viabilidade.

Nesse sentido, a elaboração de políticas públicas que promovam a reutilização de vinhaça passam a ter importância superlativa nesse cenário, medidas como leilões exclusivos para biomassa, isenções fiscais, fomento a pesquisa e desenvolvimento no setor sucroenergético são alguns exemplos de políticas a serem elaboradas ante a inviabilidade

econômica de geração de eletricidade a partir de vinhaça. O quadro 13 exemplifica o tipo de política pública a ser adotado ante a viabilidade ou inviabilidade econômica e ambiental de utilização desse subproduto, seja para geração de energia elétrica ou concentração.

Quadro 13 – Políticas públicas para vinhaça ante a viabilidade ou inviabilidade econômica e ambiental

| | | | |
|---------------------------|-----------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Dimensão econômica | Viável | (I) Auto regulação de mercado | (IV) Arcabouço legal, fiscalização e punição para o descarte de vinhaça em dissonância com a lei. |
| | Inviável | (II) P&D em novas aplicações de vinhaça, biodigestores, geradores de eletricidade, concentradores e logística desse subproduto. | (III) Ações descritas no quadro II e IV |
| | | Viável | Inviável |
| | | Dimensão ambiental | |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Como exemplificação, para cada instrumento citado no quadro 13, no que se refere a pesquisa e desenvolvimento, pode-se citar as pesquisas científicas referentes a otimização de produção de biogás pelos biodigestores, aumento da eficiência térmica concentradores de vinhaça, geradores de eletricidade e novas aplicações de vinhaça, construção civil, produção de ração animal e leveduras. No que se refere ao quadro legal, pode-se citar a Lei n.º 4.661/2015, do estado do Mato Grosso do Sul e da Norma Técnica P 4.231 da CETESB de 2005 do estado de São Paulo.

No que tange o biodigestor IC, esse apresenta viabilidade sem a venda de fertilizante somente em cenário aonde há uma taxa mínima de atratividade de 11% e isenção nos impostos de circulação de mercadorias e serviços, renda e contribuição social sobre o lucro líquido. As tecnologias que apresentaram viabilidade a um determinado cenário econômico, os principais bancos de desenvolvimento, como o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, Banco de Desenvolvimento de São Paulo, Banco de Desenvolvimento do Extremo Sul, Banco de Desenvolvimento do Nordeste e Banco de Desenvolvimento do Espírito Santo apresentam linhas de financiamento a juros competitivos e carências que podem vir a ser utilizados para a materialização destas modalidades de projeto. Os pormenores das principais linhas de financiamento estão no apêndice dois desta dissertação.

Objetivo específico 2:

Identificar o equivalente populacional, dióxido de carbono equivalentes emitidos e

mitigados, óxidos de nitrogênio e enxofre emitidos e mitigado de biodigestores anaeróbios de circulação interna, concentrador de vinhaça e o conjugado de ambos.

Proposição 2:

A utilização de biodigestores anaeróbios de circulação interna, concentrador de vinhaça e o conjugado de ambos estão em consonância com a dimensão ambiental sustentabilidade?

Resposta a proposição 2:

Depende da dimensão de avaliação ambiental, as externalidades ambientais, para o biodigestor e concentrador de vinhaça apresentaram melhores resultados quando analisa-se a dimensão equivalência populacional e dióxido de carbono equivalentes emitidos e mitigados. O biodigestor apresentou melhor resultado na dimensão óxidos de enxofre emitidos e mitigado e o concentrador de vinhaça na dimensão óxidos de nitrogênio emitidos e mitigados.

Objetivo específico 3:

Fundamentar a importância da reutilização da vinhaça com propósitos energéticos, ante sua capacidade poluidora.

Proposição 3:

Ante a sua elevada carga de material orgânico, baixo pH, elevada corrosividade e altos índices de demanda bioquímica de oxigênio e demanda química de oxigênio, a vinhaça deve ser também reutilizada com propósitos energéticos?

Resposta a proposição 3:

Sim, aonde a tecnologia que mais se apresentou adequada a essa dimensão foi o biodigestor IC, na medida em que o biogás produzido pode gerar eletricidade, substituir o Diesel, gasolina, etanol e o bagaço da cana-de-açúcar, sendo esse último podendo ser destinado ao produção de etanol de segunda geração seja em faixas de produção de etanol, como utilizado nessa dissertação, como também instrumento de políticas energéticas de cada estado brasileiro. Já o conjugado biodigestor e concentrador de vinhaça apresentou maior eficiência energética na dimensão balanço de energia e o concentrador na dimensão consumo de Diesel, no transporte de vinhaça junto com o conjugado.

Objetivo específico 4:

Identificar motivos de não reutilização da vinhaça para geração de energia elétrica junto aos produtores.

Proposição 4:

Os leilões de energia elétrica realizado para Agência Nacional de Energia Elétrica e a modalidade de venda direta, como também a atual legislação sobre vinhaça são desfavoráveis economicamente a sua reutilização?

Resposta a proposição 4:

Conforme pode-se observar no cenário econômico II, sem o computo dos fertilizantes e sem políticas de isenções tributárias para geração de eletricidade a partir de vinhaça e outros subprodutos, não há viabilidade econômica, e mesmo se houver políticas de incentivo é preciso ter escala de produção.

Além disso, os últimos leilões de eletricidade, para novos empreendimentos da ANEEL, levam em consideração somente a modicidade tarifária, não dimensionam as externalidades positivas da biomassa, referente a movimentação financeira dessa cadeia produtiva, como também de sua capacidade de mitigação, seqüestro de carbono e criação de postos de trabalho. Soma a esse cenário a responsabilidade do empreendedor em investir em linhas de transmissão para ligar à fonte fornecedora de eletricidade a rede de transmissão, de propriedade das empresas de transmissão e distribuição de energia elétrica.

Outrossim, o arcabouço legal brasileiro não proíbe totalmente o descarte de vinhaça *in natura* no solo, apenas apresenta algumas restrições em sua aplicação no solo, porém no estado do Mato Grosso do Sul, a disposição de vinhaça é rígida e supervisionada, dado a problemas já identificados como da mosca de estábulo.

Portanto, respondendo a problemática da presente pesquisa: qual a viabilidade econômica, ambiental e energética da utilização do biodigestor de circulação interna, concentrador de vinhaça e o conjugado de ambos ?

A resposta a problemática da dissertação é dada pelos quadros 14, 15 e 16.

Quadro 14 – Viabilidade econômica do concentrador de vinhaça, biodigestor IC e do conjugado de biodigestor IC e concentrador para diferentes cenários econômicos

| Cenário | Cenário I | | | Cenário II | | | Cenário III | | |
|---------------------------|-----------------------------------------------------------------|----------------|------------------------------------------|-------------------------|----------------|------------------------------------------|-------------------------|-----------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| | Concentrador de vinhaça | Biodigestor IC | Biodigestor IC e Concentrador de vinhaça | Concentrador de vinhaça | Biodigestor IC | Biodigestor IC e Concentrador de vinhaça | Concentrador de vinhaça | Biodigestor IC | Biodigestor IC e Concentrador de vinhaça |
| VPL | Sim, a partir de produção de 1.500 m ³ de etanol/dia | Sim | Não | Não | Não | Não | Não | Sim, a partir de produção de 1.500 m ³ de etanol/dia | Não |
| TIR | Sim, a partir de produção de 1.500 m ³ de etanol/dia | Sim | Não | Não | Não | Não | Não | Sim, a partir de produção de 1.500 m ³ de etanol/dia | Não |
| <i>Payback</i> | Sim, a partir de produção de 1.500 m ³ de etanol/dia | Sim | Não | Não | Não | Não | Não | Sim, a partir de produção de 1.500 m ³ de etanol/dia | Não |
| <i>Payback</i> descontado | Sim, a partir de produção de 1.500 m ³ de etanol/dia | Sim | Não | Não | Não | Não | Não | Sim, a partir de produção de 1.500 m ³ de etanol/dia | Não |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 15 – Análise energética do concentrador de vinhaça, biodigestor IC e do conjugado de biodigestor IC

| Tecnologia | Concentrador de vinhaça | Biodigestor IC | Biodigestor IC e Concentrador de vinhaça |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|-----------------------|-------------------------------------------------|
| Consumo de Diesel anual com o transporte de vinhaça concentrada e biodigerida(m ³ /ano) | Mais viável | Pouco viável | Mais viável |
| Balanço de energia consumida pelo Diesel por ano (TJ/ano) | Pouco viável | Mais viável | Mais viável |
| Balanço de geração e consumo de eletricidade (MWh/ano) | Pouco viável | Mais viável | Viável |
| Equivalente populacional de geração de eletricidade de vinhaça biodigerida (habitantes) | Pouco viável | Mais viável | Viável |

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Quadro 16 – Análise ambiental do concentrador de vinhaça, biodigestor IC e do conjugado de biodigestor IC

| Tecnologia | Concentrador de vinhaça | Biodigestor IC | Biodigestor IC e Concentrador de vinhaça |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|-----------------------|-------------------------------------------------|
| Equivalente Populacional após a concentração de vinhaça (habitantes) | Pouco viável | Viável | Mais viável |
| Balanço de emissão e mitigação de NO _x pelo concentrador e transporte de vinhaça concentrada com Diesel S 500 (t/ano) | Mais viável | Pouco viável | Pouco viável |
| Balanço de emissão e mitigação de SO _x pelo concentrador e transporte de vinhaça concentrada com Diesel S 500 (t/ano) | Pouco viável | Mais viável | Viável |
| Balanço de emissão e mitigação de CO ₂ eq pelo concentrador e transporte de vinhaça concentrada com Diesel S 500 (t/ano) | Pouco viável | Viável | Mais viável |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Por fim os cenários desfavoráveis em potencial para reutilização de vinhaça, dentre as principais pode-se elencar:

- **Baixo preço do MWh tanto no ambiente de contratação livre quanto no ambiente de contratação regulado:** O preço do MWh, nos mercados de eletricidade, é correlacionado ao dinamismo das atividades econômicas, sobretudo do setor industrial. Nesse sentido, com a retração do setor e, conseqüente, diminuição de consumo de eletricidade e manutenção de oferta, houve uma diminuição do preço de eletricidade e, conseqüente, inviabilidade econômica de projetos dessa natureza;
- **Incipiência no mercado de eletricidade:** O mercado elétrico no país sofreu na administração Rouseff (2011-2016), uma série de intervenções, sobretudo no preço da eletricidade, o que desregulou o mercado no Brasil, criando incertezas para o investidor e aumentando o custo de oportunidade para o investimento;
- **Elevado investimento em transmissão de eletricidade:** Cabe ao empreendedor elétrico o investimento em linhas de transmissão entre a usina geradora e a rede de transmissão da concessionária, o que, conseqüentemente, impacta negativamente na viabilidade econômica do projeto;
- **Ausência de políticas públicas de incentivo a utilização de matéria orgânica proveniente de atividades agropecuárias:** Não há por parte dos governos estaduais e federal políticas públicas de incentivo a produção de biogás a partir de subprodutos da produção agropecuária;
- **Ausência de políticas públicas de incentivo a utilização de energias renováveis:** Nos leilões de eletricidade promovidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica, as matrizes renováveis de energia competem com matrizes não renováveis de maneira igualitária, em outras palavras, não há tratamento diferenciado e favorável para fontes renováveis, na medida em que os leilões apenas buscam modicidade tarifáveis, excluindo as externalidades sócio ambientais das matrizes limpas;
- **Experiências não exitosas pelas usinas de etanol de utilização de vinhaça para produção de biogás nos anos 70:** Algumas usinas de etanol, durante o Programa Nacional do Alcool, na década de setenta, buscaram soluções para o crescente volume de vinhaça produzida, dentre elas a biodigestão anaeróbia. Porém, dado as limitações tecnológicas do processo de biodigestão naquele período, foi constatado a inviabilidade econômica para produção de biogás e eletricidade a partir de vinhaça, conseqüentemente, desincentivando novas tentativas.

- **Biodigestores anaeróbios em processo de consolidação tecnológica:** Os biodigestores anaeróbios, voltados para vinhaça, estão em processo de pesquisa e desenvolvimento para otimização da produção de biogás, porém, um entrave no desenvolvimento dessas tecnologias são pesquisas em escala industrial, ainda escassas;
- **Incapacidade de financiamento pelo setor sucroenergético para modernização e produção de biogás e eletricidade:** Devido à crise do setor sucroenergético, de 2008 até 2016, o setor se descapitalizou, com retração no número de usinas e destilarias em atividade no país, nesse sentido, essas empresas em atividade tem reduzido o investimento em abertura e expansão de novas unidades, seja de produção de etanol, açúcar e bioeletricidade;
- **Preço dos concentradores de vinhaça:** O preço do concentrador de vinhaça depende, sobretudo, das características operacionais das usinas, porém, pode-se considerar o preço médio em torno de R\$ 20.000.000,00. Dada a situação de fragilidade financeira das usinas sucroenergéticas, tal investimento depende da concessão de capitais por parte dos grandes bancos de desenvolvimento, como o BNDES, Desenvolve São Paulo, Banco de Desenvolvimento do Extremo Sul e o Banco de Desenvolvimento do Nordeste. Porém, as exigências referentes a garantias não permitem que grande parte das usinas tenham acesso a essa modalidade de crédito, dificultando a modernização do setor e a reutilização dos subprodutos gerados por esse setor;
- **Omissão legislativa referente ao descarte de vinhaça:** Embora haja uma série de legislações regionais e federais referentes ao descarte inadequado de subprodutos em coleções de águas e no solo, com destaque para o estado no Mato Grosso do Sul, a partir da Lei n.º 4.661/2015 e a Norma Técnica P 4.231 da CETESB, não há leis que proíbam, definitivamente, o descarte de vinhaça *in natura* no solo. A ausência dessa exigência dificulta a ampliação da utilização de concentradores e biodigestores nas usinas sucroenergéticas para o tratamento de vinhaça *in natura*;
- **Descapitalização das usinas sucroenergéticas:** Devido a crise de 2008, grande parte das usinas do país estão sem recursos financeiros para realizarem investimentos em bens de capital, como também estão inadimplentes com o sistema financeiro, o que, conseqüentemente, inviabiliza a tomada de financiamentos junto aos principais bancos de desenvolvimento do país para investimento em concentradores de vinhaça, biodigestores e geradores de eletricidade para produção de eletricidade.

9.2 Limitações

Como limitações a presente dissertação, a mesma abordou dentro da análise energética somente quatro dimensões: equivalente populacional, consumo de Diesel no transporte de vinhaça, balanço de energia e geração e consumo de eletricidade. Na dimensão ambiental foi abordado: equivalente populacional, dióxido de carbono, óxidos de nitrogênio e enxofre emitido e mitigado como também a taxa interna de retorno, valor presente líquido e payback simples e descontado para três cenários econômicos: venda de fertilizantes, sem venda de fertilizantes e isenção fiscal e taxa mínima de atratividade para o concentrador de vinhaça, biodigestor IC com motor de combustão interna com eficiência de 38% e o conjugado de ambos.

Logo os limites técnicos e operacionais da presente dissertação foram:

- Dias de safra: 200 dias;
- Horas de safra: 4.800 horas;
- Relação produção de vinhaça por produção de etanol: 10 litros;
- DQO de vinhaça: 21kg/m³;
- Transporte de vinhaça:
 - Caminhão tanque 2318 com tanque de 15 m³, com o transporte de 5% do volume de vinhaça *in natura* e 100% de vinhaça concentrada;
 - Caminhão Volvo rodotrem com dois tanques de 30 m³ cada e motobomba, com o transporte de 24% do volume de vinhaça *in natura*; ;
 - Motor MB OM 352 160 CV e bomba EQ 9048 140 m³/h, com o transporte de 74% do volume de vinhaça *in natura*.
- Capacidade de processamento anual do concentrador: 1.751.896 m³;
- 30 m³/semana de soda cáustica a 3%;
- Biodigestor de circulação interna com motor de combustão interna com eficiência de 38%

Os limites econômicos utilizados na análise da presente dissertação foram:

- Preço do concentrador:
 - Instalação: R\$ 20.000.000,00;
 - Custo de operação e manutenção: R\$ 200.000,00
- Preço do biodigestor IC:
 - Instalação: R\$ 85,00 por kg de DQO;
 - R\$ 0,016 por kg de DQO ;

- R\$ 1.700,00 por kW;
- R\$ 40,00 por MWh;
- Vida útil dos equipamentos: 20 anos;
- Taxa mínima de atratividade: 15% ao ano;
- Preço da soda cáustica: 170,40 m³;
- Carga tributária sobre os fertilizantes (IR e CSLL): 34% ao ano;
- Preço do MWh no ACL: R\$ 251,00;
- Preço do tCO₂ eq. : R\$ 17,38;
- Preço da vinhaça *in natura*: R\$ 2,45/m³;
- Preço da vinhaça concentrada: R\$ 24,50 m³;
- Economia por ausência de multas: R\$ 1.810,00/ano;
- Custo mensal com motorista, mais encargos trabalhistas e sociais sobre o salário: R\$: 4.904,86;
- Preço do Diesel pago pela usina: R\$ 2,77/litro;
- Depreciação e operação e manutenção do caminhão 2318, caminhão Volvo rodotrem: R\$: 6.000,00

9.3 Sugestões de pesquisas futuras

Como sugestão para pesquisas futuras, recomenda-se:

- Arvore de decisão para utilização de vinhaça para geração de eletricidade a partir de opções de biodigestores UASB, IC, EGSB, filtro anaeróbio e leito fixo juntamente com a opção de motores Otto, Diesel, microturbinas e turbinas a gás;
- Estudo exploratório sobre a viabilidade energética, ambiental e econômica de utilização de vinhaça de segunda geração para produção de eletricidade;
- Ampliação dos cenários econômicos para análise de viabilidade de utilização de vinhaça para geração de eletricidade, a partir da ampliação da faixa de taxa mínima de atratividade, preço do MWh e preço do crédito de carbono;
- Análise de viabilidade energética, ambiental e econômica da utilização de vinhaça: *in natura*, geração de eletricidade, substituição do diesel, cogeração, trigeriação e produção de biometano para gasodutos;
- Análise de viabilidade energética, ambiental e econômica de concentradores de vinhaça Citrotec Ecovin, Citrotec Ecovin JL, Thermally Accelerated Short Time Evaporator Dedini e osmose reversa em diferentes escalas produtivas;

- Análise de viabilidade energética, ambiental e econômica de concentradores de vinhaça Citrotec Ecovin, Citrotec Ecovin JL, Thermally Accelerated Short Time Evaporator Dedini e osmose reversa em diferentes faixas de concentração (3,5% até 65% Brix);
- Estudo exploratório sobre a utilização de vinhaça para produção de biodiesel, leveduras, ração animal e sua aplicabilidade na construção civil;
- Análise de viabilidade energética, ambiental e econômica de utilização de biodigestores UASB, IC, EGSB, filtro anaeróbio e leito fixo para diferentes faixas de DQO;
- Análise de viabilidade energética, ambiental e econômica de logística de vinhaça;
- Otimização de rotas na logística de vinhaça;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, S. B.; ZAIAT, M. Desempenho de reator anaeróbio-aeróbio de leito fixo no tratamento de esgoto sanitário. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 13, n. 2, p. 181-188, 2008. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-41522008000200008&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 18 dez. 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. Brasília: ANEEL, 2003. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/livro_atlas.pdf>. Acesso em: 27. abr. 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Resolução ANEEL n° 112, de 18 de maio de 1999a. Estabelece os requisitos necessários à obtenção de Registro ou Autorização para a Implantação, Ampliação ou Repotenciação de centrais geradoras termelétricas, eólicas e de outras fontes alternativas de energia. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 19 maio 1999. Disponível em: <<http://www.gasnet.com.br/legislacao/ANEEL112.PDF>>. Acesso em: 22 abr. 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Resolução ANEEL n° 233, de 29 de julho de 1999b. Estabelece os Valores Normativos que limitam o repasse, para as tarifas de fornecimento, dos preços livremente negociados na aquisição de energia elétrica, por parte dos concessionários e permissionários. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 30 jul. 1999. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/legislacao/res1999233.pdf>>. Acesso em: 22 abr. 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Resolução ANEEL n°235, de 14 de novembro de 2006. Estabelece os requisitos para a qualificação de centrais termelétricas cogeneradoras de energia e dá outras providências.. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 22 novembro 2006. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2006/003/documento/minuta_resolucao.pdf>. Acesso em: 22 abr. 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Resolução ANEEL n° 281 de 01 de outubro de 1999c. Estabelece as condições gerais de contratação do acesso, compreendendo o uso e a conexão, aos sistemas de transmissão de energia elétrica. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 04 out. 1999. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/res1999281.pdf>>. Acesso em: 22 abr. 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Resolução ANEEL n° 328, de 12 de agosto de 2004a. Aprova o Estatuto do Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 30 jul. 1999. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/rea2004328.pdf>>. Acesso em: 22 abr. 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Resolução ANEEL n°109 de 26 de outubro de 2004b. Institui a Convenção de Comercialização de Energia Elétrica, estabelecendo a estrutura e a forma de funcionamento da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica – CCEE. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 26 de outubro de 2004. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2006/017/documento/resolucao_minuta_altera_convencao.pdf>. Acesso em: 30 jul. 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Resolução ANEEL n° 167 de 11 de outubro de 2005a. Estabelece as condições para a comercialização da energia elétrica, proveniente de geração distribuída, por concessionária, permissionária ou autorizada de serviço público de distribuição, que atue no Sistema Interligado Nacional – SIN. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 11 de outubro de 2005. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2005/022/documento/minutadare soluo_geraodistribuda.pdf>. Acesso em: 30 jul. 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Resolução ANEEL n° 205 de 26 de dezembro de 2005b. Estabelece os procedimentos e as condições gerais, para o enquadramento de cooperativas de eletrificação rural, como permissionária de serviço público de distribuição de energia elétrica, e autorização para operação de instalações de distribuição de uso privativo, em área rural, bem como aprova o modelo de Contrato de Permissão. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 26 de dezembro de 2005. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/bren2005205.pdf>>. Acesso em: 30 jul. 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Resolução ANEEL n° 271 de 18 de julho de 2007a. Estabelece os procedimentos vinculados à redução das tarifas de uso dos sistemas elétricos de transmissão e de distribuição, para empreendimentos hidrelétricos, caracterizados como Pequena Central Hidrelétrica, e aqueles com fonte solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, com potência instalada menor ou igual a 30.000 kW. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 18 de julho de 2007. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2007271.pdf>>. Acesso em: 30 jul. 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Resolução ANEEL n° 284 de 30 de outubro de 2007b. Altera os arts. 3° e 4° da Resolução Normativa ANEEL 228 de 25.07.2006, que estabelece os requisitos para a certificação de centrais geradoras termelétricas na modalidade de geração distribuída, para fins de comercialização de energia elétrica no Ambiente de Contratação Regulada – ACR. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 30 de outubro de 2007. Disponível em: <<http://www.lexml.gov.br/urn/urn:lex:br:agência.nacional.energia.elétrica:resolucao.normativa:2007-10-30;284>>. Acesso em: 30 jul. 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Resolução ANEEL n° 304 de 13 de março de 2008. Altera os arts. 1°, 2°, 3°, 4° e 5° da Resolução ANEEL 371 de 29.12.1999, que regulamenta a contratação e comercialização de reserva de capacidade por autoprodutor ou produtor independente, para atendimento a unidade consumidora diretamente conectada às suas instalações de geração. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 13 de março de 2008. Disponível em: <<http://www.lexml.gov.br/urn/urn:lex:br:agência.nacional.energia.elétrica:resolucao.normativa:2008-03-13;304>>. Acesso em: 30 jul. 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Resolução ANEEL n° 482 de 19 de abril de 2012. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuídas aos sistemas de distribuição de energia elétrica e o sistema de compensação de energia elétrica e o acesso ao Sistema de Distribuição, do PRODIST, de forma a contemplar a inclusão do acesso a de Micro e Minigeração Distribuída com as adequações necessárias nesse Módulo. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 19 abril de 2012. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 30 jul. 2017.

ALAGOAS (Estado). **Portarias Ministeriais**. Disponível em:

<<http://www.meioambiente.al.gov.br/legislacao/portarias-ministeriais/portarias-ministeriais>>. Acesso em: 17 ago. 2015.

ALÉM, A. C. et al. **O BNDES em um Brasil em transição**. Rio de Janeiro: BNDES, 2010.

Disponível em:

<http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/livro_brasil_em_transicao/brasil_em_transicao_completo.pdf>. Acesso em: 18 jun. 2015.

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

<<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/86/86131/tde-19012012-180037/>>. Acesso em: 24 abr. 2015.

ALVES, J. M. Paradigma técnico e co-geração de energia com bagaço de cana-de-açúcar em Goiás.. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 6., 2006, Campinas. **Processo online...** Disponível em:

<http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022006000200021&lng=en&nrm=abn>. Acesso em: 19 Apr. 2017.

ALVES, S. M.; OLIVEIRA, J. F. G. Adequação ambiental dos processos usinagem utilizando Produção mais Limpa como estratégia de gestão ambiental. **Produção**, São Paulo, v. 17, n. 1, p. 129-138, abr. 2007. Disponível em:

<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-5132007000100009&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 18 jun. 2015.

ASSAF NETO, A. **Finanças corporativas e valor**. 2.ed. São Paulo: Atlas, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA.

Desempenho Setorial: Dados atualizados de março de 2015. Disponível em:

<<http://www.abinee.org.br/abinee/decon/decon15.htm/>>. Acesso em: 18 jun. 2015.

ÁVILA, R. O. **Avaliação do desempenho de sistemas tanque séptico-filtro anaeróbio com diferentes tipos de meio suporte**. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia Civil)-COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005. Disponível em: <http://wwwp.coc.ufrj.br/teses/mestrado/rh/2005/Teses/AVILA_RO_05_t_M_rhs.pdf> Acesso em: 18 dez. 2016.

AZZONE, G.; BERTELÈ, U. Exploiting green strategies for competitive advantage. **Long Range Planning**, v. 27, n. 6, p. 69-81, 1994. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0024630194901651>>. Acesso em: 17 ago. 2016.

BACCHI, M. R. P.; CALDARELLI, C. E. Impactos socioeconômicos da expansão do setor sucroenergético no Estado de São Paulo, entre 2005 e 2009. **Nova economia**, Belo Horizonte, v. 25, n. 1, p. 209-224, 2015 Disponível em:

<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-63512015000100209&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 09 out. 2016.

BALDACIN, A. C. S.; PINTO, G. M. F. Biodigestão anaeróbia de vinhaça: aproveitamento energético do biogás. **Revista Eletrônica FACP**, v. 1, n. 7, 2015. Disponível em: <<http://www.tratamentodeagua.com.br/wp-content/uploads/2016/07/Biodigest%C3%A3o-Anaer%C3%B3bia-da-Vinha%C3%A7a-Aproveitamento-Energ%C3%A9tico-do-Biog%C3%A1s.pdf>>. Acesso em: 18 dez. 2016.

BANCO DE DESENVOLVIMENTO DE SÃO PAULO. **FIP Simplificado**. São Paulo, 2017a. Disponível em: <<http://www.desenvolvesp.com.br/empresas/opcoes-credito/para-equipar-sua-empresa/fip-simplificado>>. Acesso em: 14 abr. 2017.

BANCO DE DESENVOLVIMENTO DE SÃO PAULO. **Linha Economia verde**. São Paulo, 2017c. Disponível em: <http://www.desenvolvesp.com.br/empresas/opcoes-credito/projetos-sustentaveis/linha_economia_verde>. Acesso em: 14 abr. 2017.

BANCO DE DESENVOLVIMENTO DE SÃO PAULO. **Linha Economia verde maquinas**. São Paulo, 2017b. Disponível em: <http://www.desenvolvesp.com.br/empresas/opcoes-credito/projetos-sustentaveis/linha-economia-verde_equipamentos>. Acesso em: 14 abr. 2017.

BANCO DE DESENVOLVIMENTO DO ESPIRITO SANTO. **Linha BNDES Automático/ABC Integração**. Vitória, 2017a. Disponível em: <<https://www.bandes.com.br/Site/Linhas/Show?id=11&idLinha=80>> . Acesso em: 14 abr. 2017.

BANCO DE DESENVOLVIMENTO DO ESPIRITO SANTO. **Linha BNDES Automático/ABC Florestas 2016/2017**. Vitória, 2017b. Disponível em: <<https://www.bandes.com.br/Site/Linhas/Show?id=11&idLinha=498>> . Acesso em: 14 abr. 2017.

BANCO DE DESENVOLVIMENTO DO ESPIRITO SANTO. **Automático/ABC Recuperação 2016/2017**. Vitória, 2017c. Disponível em: <<https://www.bandes.com.br/Site/Linhas/Show?id=11&idLinha=500>> . Acesso em: 14 abr. 2017.

BANCO DE DESENVOLVIMENTO DO EXTREMO SUL. **Linha micro, pequena e média empresa**. Florianópolis, 2017a. Disponível em: <<http://www.brde.com.br/industria-comercio-e-servicos/maquinas-e-equipamentos/>>. Acesso em: 14 abr. 2017.

BANCO DE DESENVOLVIMENTO DO EXTREMO SUL. **Linha média e grande empresa**. Florianópolis, 2017b. Disponível em: <<http://www.brde.com.br/industria-comercio-e-servicos/construcao-civil-reformas-e-instalacoes/>>. Acesso em: 14 abr. 2017.

BANCO DE DESENVOLVIMENTO DO NORDESTE. **Programa de Apoio ao Desenvolvimento da Agroindústria do Nordeste**. Fortaleza, 2017a. Disponível em: <<https://www.bnb.gov.br/programa-de-apoio-ao-desenvolvimento-da-agroindustria-do-nordeste-fne-agrin>>. Acesso em: 14 abr. 2017.

BANCO DE DESENVOLVIMENTO DO NORDESTE. **Linha Proinf**. Fortaleza, 2017b. Disponível em: <<https://www.bnb.gov.br/programa-de-aplicacao-dos-recursos-do-fundo-de-amparo-ao-trabalhador-em-projetos-de-infraestrutura-economica-proinf>>. Acesso em: 14. Abr. 2017.

BANCO DE DESENVOLVIMENTO DO NORDESTE. **Linha Pro infra**. Fortaleza, 2017c. Disponível em: <<https://www.bnb.gov.br/programa-de-financiamento-a-infraestrutura-complementar-da-regiao-nordeste-fne-proinfra>>. Acesso em: 14 abr. 2017.

BANCO DE DESENVOLVIMENTO DO NORDESTE. **Linha Programa de Aplicação de Recursos Obrigatórios**. Fortaleza, 2017f. Disponível em: <<https://www.bnb.gov.br/programa-de-aplicacao-de-recursos-obrigatorios2>>. Acesso em: 14 abr. 2017.

BANCO DE DESENVOLVIMENTO DO NORDESTE. **Programa de Apoio ao Setor Industrial do Nordeste**. Fortaleza, 2017d. Disponível em: <<https://www.bnb.gov.br/programa-de-apoio-ao-setor-industrial-do-nordeste-fne-industrial1>>. Acesso em: 14 abr. 2017.

BANCO DE DESENVOLVIMENTO DO NORDESTE. **Programa de Apoio ao Desenvolvimento Rural do Nordeste**. Fortaleza, 2017e. Disponível em: <<https://www.bnb.gov.br/programa-de-apoio-ao-desenvolvimento-rural-do-nordeste-rural1>>. Acesso em: 14 abr. 2017.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONOMICO E SOCIAL. **Finame - BK Aquisição e Comercialização**. Brasília, 2017d. Disponível em: <<http://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/produto/bndes-finame-bk-aquisicao-comercializacao>>. Acesso em: 14 abr. 2017.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONOMICO E SOCIAL. **Finem geração de energia**. Brasília, 2017a. Disponível em: <<http://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/produto/bndes-finem-energia>>. Acesso em: 14 abr. 2017.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONOMICO E SOCIAL. **Finem Saneamento ambiental e recursos hídricos**. Brasília, 2017b. Disponível em: <<http://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/produto/bndes-finem-saneamento-ambiental-recursos-hidricos>>. Acesso em: 14 abr. 2017.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONOMICO E SOCIAL. **Finem - Aquisição de bens de capital**. Brasília, 2017c. Disponível em: <<http://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/produto/bndes-finem-aquisicao-bens-capital>>. Acesso em: 14 abr. 2017.

BARBOSA, G. S. O desafio do desenvolvimento sustentável. **Revista Visões**. Macaé, v. 1, n. 4, p. 1-11, 2008. Disponível em: <http://www.fsma.edu.br/visoes/ed04/4ed_O_Desafio_Do_Developmento_Sustentavel_Gi sele.pdf>. Acesso em: 18 jun. 2015.

BARJA, G. J. A. **A cogeração e sua inserção no sistema elétrico**. 2006. Dissertação (Mestrado em Ciências Mecânicas) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2006. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/biblioteca/trabalhos/trabalhos/Dissertacao_Gabriel_de_Jesus.pdf>. Acesso em: 31 jul. 2015.

BARROS, A. J. S.; LEHFELD, N. A. S. **Fundamentos de Metodologia: Um Guia para a Iniciação Científica**. 2. ed. São Paulo: Makron Books, 2000.

BEN, F.; TONELLO, K. A. Análise do Reconhecimento de Crédito de Carbono. In: XI CONVENÇÃO DE CONTABILIDADE, 2007, Rio Grande do Sul. **Artigo Completo...** Rio Grande do Sul: UCS, 2007. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/cop17/panorama/a-convencao-quadro-das-nacoes-unidas-sobre-mudanca-do-clima>>. Acesso em: 01 jul. 2012.

BENITO, J. G.; BENITO, O. G., A review of determinant factors of environmental proactivity. **Business Strategy and the Environment**, n. 15, p. 87–102, 2006. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/bse.450/pdf>>. Acesso em: 17 ago. 2016.

BERMANN, C. Crise ambiental e as energias renováveis. **Ciência e Cultura**, v. 60, n. 3, 2008. Disponível em: <http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0009-67252008000300010&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 17 ago. 2016.

BERNI, M. D.; BAJAY, S. V. Geração de energia e a digestão anaeróbica no tratamento de efluentes: estudo-de-caso na indústria de papel.. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 3., 2000, Campinas. **Proceedings...** Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022000000100003&lng=en&nrm=abn>. Acesso em: 18 dez. 2016.

BERRY, M. A; RONDINELLI, D. A. Proactive corporate environmental management: a new industrial revolution. **Academy of Management Executive**, v. 12, n. 2, p. 38-50, 1998. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/npr.4040170305/epdf>>. Acesso em: 7 ago. 2016.

BOHÓRQUEZ, W. O. I. **Análise termoenergética, econômica e ambiental da repotenciação e conversão de UTEs com ciclo Rankine para ciclo combinado utilizando turbinas a gás**. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2007. Disponível em: <<http://saturno.unifei.edu.br/bim/0031979.pdf>>. Acesso em: 12 dez. 2016.

BOIRAL, O. Corporate Response to Global Warming: For a Proactive Strategy. **International Journal of Business and Economics Perspectives**, v. 1, n. 1, p. 79-95. 2006. Disponível em: <<http://www4.fsa.ulaval.ca/wp-content/uploads/2015/05/Corporate-Response-to-Global-Warming-For-a-Proactive-Strategy.pdf>>. Acesso em: 10 ago. 2016.

BONA, F. S.; RUPPERT FILHO, E. As microturbinas e a geração distribuída. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 5., 2004, Campinas. **Proceedings online**. Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022004000100018&lng=en&nrm=abn>. Acesso em: 03 out. 2016.

BOSSO, A. L. A. **Análise cinemática, dinâmica e termodinâmica de um motor de combustão interna com pistão impulsionado por engrenagens**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, 2013. Disponível em: <http://www.academia.edu/19362724/Bosso_Andre_Luiz_Aparecido_M_1_>. Acesso em: 12 dez. 2016.

BRASIL. **Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças do Clima**. Brasília, 2012. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/cop17/panorama/a-convencao-quadro-das-nacoes-unidas-sobre-mudanca-do-clima>>. Acesso em: 8 abr. 2016.

BRASIL. Decreto 2.003, de 10 de setembro de 1996. Regulamenta a produção de energia elétrica por Produtor Independente e por Autoprodutor e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 11 set. 1996. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/D2003.htm>. Acesso em: 22 abr. 2016.

BRASIL. Decreto nº 2.655 de 02 de julho de 1998. Regulamenta o Mercado Atacadista de Energia Elétrica, define as regras de organização do Operador Nacional do Sistema Elétrico, de que trata a Lei nº 9.648, de 27 de maio de 1998, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 03 jul. 1998. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/D2655.htm>. Acesso em: 22 abr. 2016.

BRASIL. Decreto 5.163, de 30 de julho de 2004. Regulamenta a comercialização de energia elétrica, o processo de outorga de concessões e de autorizações de geração de energia elétrica, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 30 jul. 2004. Disponível em: <[http://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/2004/decreto-5163-30-julho-2004-533148-norma-atualizada-pe.html](http://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/2004/decreto-5163-30-julho-2004-533148-norma-2004-533148-norma-atualizada-pe.html)>. Acesso em: 22 abr. 2016.

BRASIL. Decreto nº 5.163, de 30 de julho de 2004. Regulamenta a comercialização de energia elétrica, o processo de outorga de concessões e de autorizações de geração de energia elétrica, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 30 jul. 2004. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2004/decreto/d5163.HTM>. Acesso em: 22 abr. 2016.

BRASIL. Decreto nº 5.175, de 09 de agosto de 2004. Constitui o Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico - CMSE de que trata o art. 14 da Lei nº 10.848, de 15 de março de 2004. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 10 ago. 2004. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2004/decreto/d5175.htm>. Acesso em: 22 abr. 2016.

BRASIL. Decreto nº 5.177, de 12 de agosto de 2004. Regulamenta os arts. 4º e 5º da Lei nº 10.848, de 15 de março de 2004, e dispõe sobre a organização, as atribuições e o funcionamento da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica - CCEE. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 16 ago. 2004. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2004/decreto/d5177.htm>. Acesso em: 22 abr. 2016.

BRASIL. Decreto nº 5.184, de 16 de agosto de 2004. Cria a Empresa de Pesquisa Energética - EPE, aprova seu Estatuto Social e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 16 ago. 2004. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2004/decreto/d5184.HTM>. Acesso em: 22 abr. 2016.

BRASIL. Decreto nº 5.249, de 20 de outubro de 2004. Dá nova redação ao inciso XI do § 2º do art. 1º do Decreto nº 5.163, de 30 de julho de 2004, que regulamenta a comercialização de energia elétrica, o processo de outorga de concessões e de autorizações de geração de energia elétrica. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 21 out. 2004. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2004/decreto/d5249.htm>. Acesso em: 22 abr. 2016.

BRASIL. Lei nº 1.413, de 14 de agosto de 1975. Dispõe sobre o controle da poluição do meio ambiente provocada por atividades industriais. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 15 ago. 1989. Disponível em: <<http://legis.senado.gov.br/legislacao/ListaPublicacoes.action?id=122915>>. Acesso em: 8 abr. 2016.

BRASIL. Lei nº 7.960 de 21 de dezembro de 1989. Dispõe sobre prisão temporária. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 22 dez. 1989. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L7960.htm>. Acesso em: 8 abr. 2016.

BRASIL. Lei nº 9.074, de 20 de julho de 1995. Estabelece normas para outorga e prorrogações das concessões e permissões de serviços públicos e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 21 jul. 1995. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9074cons.htm>. Acesso em: 22 abr. 2016.

BRASIL. Lei nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996. Institui a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, disciplina o regime das concessões de serviços públicos de energia elétrica e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 27 dez. 1996. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9427compilada.htm>. Acesso em: 22 abr. 2016.

BRASIL. Lei nº 9.478, de 6 de agosto de 1997. Dispõe sobre a política energética nacional, as atividades relativas ao monopólio do petróleo, institui o Conselho Nacional de Política Energética e a Agência Nacional do Petróleo e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 7 ago. 1997. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9478.htm>. Acesso em: 12 abr. 2016.

BRASIL. Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 13 fev. 1998. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9605.htm>. Acesso em: 8 abr. 2016.

BRASIL. Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002. Dispõe sobre a expansão da oferta de energia elétrica emergencial, recomposição tarifária extraordinária, cria o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa), a Conta de Desenvolvimento Energético (CDE), dispõe sobre a universalização do serviço público de energia elétrica, dá nova redação às Leis nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996, nº 9.648, de 27 de maio de 1998, nº 3.890-A, de 25 de abril de 1961, nº 5.655, de 20 de maio de 1971, nº 5.899, de 5 de julho de 1973, nº 9.991, de 24 de julho de 2000, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 29 abr. 2002. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/2002/L10438.htm>. Acesso em: 22 abr. 2016.

BRASIL. Lei nº 10.847 de 15 de março de 2004. Autoriza a criação da Empresa de Pesquisa Energética – EPE e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 16 mar. 2004. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2004/lei/110.847.htm>. Acesso em: 22 abr. 2016.

BRASIL. Lei nº 10.848 de 15 de março de 2004. Dispõe sobre a comercialização de energia elétrica, altera as Leis nºs 5.655, de 20 de maio de 1971, 8.631, de 4 de março de 1993, 9.074, de 7 de julho de 1995, 9.427, de 26 de dezembro de 1996, 9.478, de 6 de agosto de 1997, 9.648, de 27 de maio de 1998, 9.991, de 24 de julho de 2000, 10.438, de 26 de abril de 2002, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 16 mar. 2004. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2004/lei/110.848.htm>. Acesso em: 22 abr. 2016.

BRASIL. Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009. Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima - PNMC e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 30 dec. 2009. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/112187.htm>. Acesso em: 27 mar. 2016.

BRASIL. Lei nº 24.643, de 10 de julho de 1934. Decreta o Código de Águas. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 10 jul. 1934. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/d24643.htm>. Acesso em: 8 abr. 2016.

BRASIL. Ministério da Ciência e da Tecnologia. **Protocolo de Quioto**. Brasília, 2002. Disponível em: <<http://www.mct.gov.br>>. Acesso em: 8 abr. 2016.

BRASIL. Portaria nº124, de 20 de agosto de 1980. Estabelece normas para a localização de indústrias potencialmente poluidoras junto à coleções hídricas. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 21 ago. 1980. Disponível em: <<http://ima.al.gov.br/wp-content/uploads/2015/03/Portaria-nb0-124.80.pdf>>. Acesso em: 8 abr. 2016.

BRASIL. Portaria nº 158, de 03 de novembro de 1980. Mantém proibição de lançamento direto ou indireto de vinhaça em qualquer coleção hídrica. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 6 nov. 1980. Disponível em: <https://www.imprensaoficial.com.br/DO/GatewayPDF.aspx?link=/2015/executivo%20secao%20i/fevereiro/13/pag_0051_D3NO1NGM18ME1e1HU52PBES99NK.pdf>. Acesso em: 8 abr. 2016.

BRASIL. Portaria nº 323, de 29 de novembro de 1978. Proíbe o lançamento, direto ou indireto, do vinhaça em qualquer coleção hídrica, pelas destilarias do álcool. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 30 nov. 1978. Disponível em: <<http://abiquim.org.br/restrito/esp/pminter-323-78-rh.pdf>>. Acesso em: 8 abr. 2016.

BRASIL. Presidência da República. Núcleo de Assuntos Estratégicos. Oportunidades de negócios em segmentos produtivos nacionais. In: _____. **Mudança do clima**. Brasília: [s.n.], 2005. v. 2 (Cadernos NAE, 04). p. 115-303.

BRIGHENTI, C. R. F. **Integração do Cogrador de Energia do Setor Sucroalcooleiro com o Sistema Elétrico**. Dissertação (Mestrado em Energia) – Programa Interunidades de Pós Graduação em Energia da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003. Disponível em: <<http://www.iee.usp.br/producao/2003/Teses/DissertacaoClaudiaBrighenti.pdf>>. Acesso em: 3 out. 2016.

BRUNDTLAND, G. H. **Nosso futuro comum**: Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento. Rio de Janeiro: Fundação Getúlio Vargas, 1991.

BRUNO, M. **Desempenho de reatores anaeróbios de fluxo ascendente com manta de lodo (UASB) em dois estágios tratando águas residuárias do beneficiamento de café por via úmida**. Dissertação (Mestrado em Microbiologia Agropecuária)-Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2007. Disponível em: <<http://www.fcav.unesp.br/download/pgtrabs/micro/m/2244.pdf>>. Acesso em: 18 dez. 2016.

BRUNO FILHO, L. Oportunidades de negócio com créditos de carbono no Brasil. **Revista HSM**. São Paulo, 2012. Disponível em: <<file:///E:/Credito%20de%20carbono/Oportunidades%20de%20neg%C3%B3cio%20com%20cr%C3%A9ditos%20de%20carbono%20no%20Brasil%20%20%20Portal%20HSM.htm>> Acesso em: 01 jul. 2012.

BRUSEKE, F. J. **O problema do Desenvolvimento Sustentável**. Florianópolis: Cortez, 1995.

CAMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELETRCA. **Ambiente livre e ambiente regulado**. São Paulo, 2016. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/como-participar/ambiente-livre-ambiente-regulado?_afLoop=2968217971998604#%40%3F_afLoop%3D2968217971998604%26_adf.ctrl-state%3D18914nwxy8_4>. Acesso em: 22 abr. 2016.

CAMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELETRCA. **Comercialização**. São Paulo, 2010. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/onde-atuamos/comercializacao?_afLoop=2969073576355171#%40%3F_afLoop%3D2969073576355171%26_adf.ctrl-state%3D18914nwxy8_17>. Acesso em: 22 abr. 2016.

CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. **Tipos de leilões**. São Paulo, 2015. Disponível em: <http://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/oquefazemos/como_ccee_atua/tipos_leiloesn_logado?_adf.ctrlstate=u39k8h2bz_4&_afLoop=2373609661592803>. Acesso em: 27 mar. 2016.

CAMPOS, C. M. M. et al. Desenvolvimento e operação de reator anaeróbio de manta de lodo (UASB) no tratamento de efluentes da suinocultura em escala laboratorial. **Ciência e agrotecnologia**, Lavras, v. 30, n. 1, 2006. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/cagro/v30n1/v30n1a20>> Acesso em: 18 dez. 2016.

CAMPOS, J. R.; DIAS, H. G. Potencialidade do filtro anaeróbio. **Revista DAE**. v. 49, n. 154, 1989. Disponível em: <http://revistadae.com.br/artigos/artigo_edicao_154_n_67.pdf>. Acesso em: 18 dez. 2016.

CARDOSO, R. D. et al. Índice de desenvolvimento do setor externo sucroalcooleiro brasileiro: uma análise de 1999 a 2007. **Revista de Economia e Agronegócio**, Viçosa, MG, v. 7, n. 3, p. 337-361, set./dez. 2009. Disponível em: <<http://ageconsearch.umn.edu/bitstream/94838/2/Artigo%203.pdf>>. Acesso em: 18 jun. 2015.

CARR, M. K. V.; KNOX, J. W. The water relations and irrigation requirements of sugarcane (*Saccharum officinarum*). **Review Experimental Agriculture**. v. 47, p. 1-25, 2011.

Disponível em: <<https://www.cambridge.org/core/services/aop-cambridge-core/content/view/92DE3EA32EC10E8EE86ABCDD7C58FE31/S0014479710000645a.pdf/div-class-title-the-water-relations-and-irrigation-requirements-of-sugar-cane-span-class-italic-saccharum-officinarum-span-a-review-div.pdf>>. Acesso em: 18 dez. 2016.

CARVALHO, A. M. et al. Microturbinas a Gás, Motores Stirling e Células a Combustíveis para Geração Distribuída. In: CONGRESSO DE INOVAÇÃO DE INVAÇÃO TECNOLÓGICA EM ENERGIA ELÉTRICA, 2007. **Anais...** Disponível em: <<http://www.mfap.com.br/pesquisa/arquivos/20081205152225-it96.pdf>>. Acesso em: 12 dez. 2016.

CARVALHO, M.A.S. **Avaliação de um motor de combustão interna ciclo Otto utilizando diferentes tipos de combustíveis**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) - Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2011. Disponível em: <http://www.pei.ufba.br/novo/uploads/biblioteca/Dissertacao_de_Mestrado_PEI_Marcio_Carvalho.pdf>. Acesso em: 12 dez. 2016.

CARVALHO, T. C., SILVA, C. L. Redução da quantidade de vinhaça a partir da evaporação. **Periódico Fórum Ambiental da Alta Paulista**, Tupã, v. 4, 2010. Disponível em: <http://amigosdanatureza.org.br/publicacoes/index.php/forum_ambiental/article/download/58/61>. Acesso em: 4 mar. 2017.

CASTAÑON, M. J. B. **Biogás - originado a partir de rejeitos rurais**. Disponível em: <<http://www.cenbio.org.br/pt/documentos.html>>. Acesso em: 27 mar. 2016.

CASTRO, N. J.; DANTAS, G. A. **A Conexão da Bioeletricidade à Rede: Quem Paga?** 2008. Disponível em: <http://www.ie.ufrj.br/images/infosucro/biblioteca/080429_CastroDantas_BioeletricidadeQueM paga.pdf>. Acesso em: 18 jun. 2015.

CASTRO, N. J.; DANTAS, G. A. **A Importância da Inserção da Bioeletricidade na Matriz Brasileira e o Leilão de Energia de Reserva**. Rio de Janeiro: Grupo de Estudos do setor elétrico da Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2010. Disponível em: <<http://docplayer.com.br/8046715-A-importancia-da-insercao-da-bioeletricidade-na-matriz-brasileira-e-o-leilao-de-energia-de-reserva.html>>. Acesso em: 27 mar. 2016.

CASTRO, N. J.; DANTAS, G. A. Fusões e aquisições no setor sucroenergético e a importância da escala de geração. **Texto para Discussão do Setor Elétrico**, GEE/IE-UFRJ, n. 14, 2009. Disponível em: <http://www.gesel.ie.ufrj.br/app/webroot/files/publications/13_TDSE14.pdf>. Acesso em: 28 mar. 2016

CEMANO, M. C. **O Mercado de crédito de carbono e as oportunidades para o agronegócio brasileiro**. Disponível em: <www.cepea.esalq.usp.br/economiaambiental>. Acesso em: 01 jul. 2012.

CITROTEC. **Concentrador de Vinhaça Citrotec JL**. Disponível em:
<http://citrotec.com.br/index.php?option=com_content&view=article&id=121%3Aconcentracao_vinhaca&catid=34%3Abanner&lang=>. Acesso em: 5 mar. 2017.

CHAVES, F. D. M. **Serviços ancilares a partir da geração distribuída: Reserva de potência ativa e suporte de reativos**. Tese (Doutorado em Planejamento de Sistemas Energéticos) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009. Disponível em:
<<http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=000775351&fd=y>>. Acesso em: 3 out. 2016.

CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores Anaeróbios**. Belo Horizonte: DESA/UFMG, 1997.
CONTI, J. B. Considerações sobre as mudanças climáticas globais. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, n. 16, p. 70-75, 2005.

COMITÊ DE QUALIDADE DA GESTÃO PÚBLICA. **Declaração de Johannesburgo sobre desenvolvimento sustentável**. Disponível em:
<http://www.cqgp.sp.gov.br/gt_licitacoes/publicacoes/joanesburgo.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2014.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **A Produção Mais Limpa (P+L) no Setor Sucroalcooleiro: Informações gerais**. São Paulo, 2002. Disponível em:
<http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Adubacao_organica_producao_mais_limpaID-37HFh1RpEg.pdf> Acesso em: 24 abr. 2015.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Vinhaça – Critérios e procedimentos para aplicação no solo agrícola**. São Paulo: CETESB, 2006. Disponível em: <http://www.ambiente.sp.gov.br/camaras-ambientais/files/2013/12/P4_231.pdf>. Acesso em: 24 abr. 2015.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**. 2016. Disponível em:
<http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/16_12_20_11_25_12_boletim_cana_portugues_-3o_lev_-_16-17.pdf>. Acesso em: 21 dez. 2016.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **A Geração termoeétrica com a queima do bagaço de cana-de-açúcar no Brasil**. Análise do desempenho da safra 2009-2010. 2011. Disponível em:
<http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/11_05_05_15_45_40_geracao_termo_baixa_res..pdf>. Acesso em: 22 set. 2015.

CONDE, A. P. **Desempenho do motor ciclo Diesel alimentado com biodiesel de óleo de soja e oliva**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2007. Disponível em:
<http://repositorio.ufla.br/bitstream/1/3016/1/DISSERTA%3%87%C3%83O_Desempenho%20de%20motor%20ciclo%20Diesel%20alimentado%20com%20biodiesel%20de%20soja%20e%20de%20oliva.pdf>. Acesso em: 12 dez. 2016.

CORAZZA, R. I. Impactos ambientais da vinhaça: controvérsias científicas e lock-in na fertirrigação. In: CONGRESSO SOBER, 46., 2006, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: Sociedade Brasileira de Economia e Sociologia Rural, 2006. p. 1. Disponível em: <<http://www.sober.org.br/palestra/5/453.pdf>>. Acesso em: 27 abr. 2015.

CORAZZA, R. I.; SALLES FILHO, S. Opções produtivas mais limpas: uma perspectiva evolucionista a partir de um estudo de trajetória tecnológica na agroindústria canavieira. In: SIMPÓSIO DE GESTÃO DA INOVAÇÃO DA TECNOLÓGICA, 21., 2000, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Núcleo PGT – USP, 2000. p. 89-102.

CORREIA, G. T. **Contribuição ao estudo e modelagem matemática de reator anaeróbio de leito granular expandido (EGSB) tratando de águas residuárias na suinocultura.** Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2014. Disponível em: <<https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/3957/6345.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 18 dez. 2016.

CORREIA NETO, V. **Análise de viabilidade de cogeração de energia elétrica em ciclo combinado com gaseificação de biomassa de cana-de-açúcar e gás natural.** Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001. Disponível em: <<http://www.ppe.ufrj.br/ppe/production/tesis/vcneto.pdf>>. Acesso em: 12 dez. 2016.

COSTA, D. F. **Geração de energia elétrica a partir do biogás do tratamento de esgoto.** 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Interunidades de Pós Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. Disponível em: <http://www.iee.usp.br/producao/2006/Teses/Dissertacao_David.pdf>. Acesso em: 27 mar. 2016.

COSTA, S. S. **Compensação Ambiental:** Uma alternativa de recursos para implementação do Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza. 2007. Dissertação (Mestrado em Políticas Públicas e Gestão Ambiental) - CDS/UnB, Brasília, 2007. Disponível em: <http://repositorio.unb.br/bitstream/10482/17301/1/2007_SildaleiaSilvaCosta.pdf>. Acesso em: 18 jun. 2015.

CORTEZ, L. A. B.; FREIRE, W. J.; ROSILLO-CALLE, F. Biodigestion of vinasse in Brazil. **International Sugar Journal**, v. 100, n. 1196, p. 403-413, 1998. Disponível em: <<http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=GB1997050930>>. Acesso em: 27 mar. 2016.

CORTEZ, L.; MAGALHAES, P.; HAPPI, J. Principais Subprodutos da Agroindústria Canavieira e Sua Valorização. **Revista Brasileira de Energia**, v. 2, n. 2, 1992. Disponível em: <<http://www.sbpe.org.br/socios/download.php?id=45>>. Acesso em: 24 fev. 2016.

CORTEZ, L. A. B. et al. **Biomassa para energia.** Campinas: Editora UNICAMP, 2008. Disponível em: <<http://www.nipe.unicamp.br/2013/docs/publicacoes/inte-biomassa-energia070814.pdf>>. Acesso em: 24 fev. 2016.

- CRUZ, V. G. **Desenvolvimento experimental de um motor Stirling tipo gama**. Dissertação (Mestrado Engenharia Mecânica) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2012. Disponível em: <<http://tede.biblioteca.ufpb.br/bitstream/tede/5341/1/arquivototal.pdf>>. Acesso em: 12 dez. 2016.
- DAILY, B. F; HUANG, S. Achieving sustainability through attention to human resource factors in environmental management. **International Journal of Operations and Production Management**, v. 21, n. 12, p. 1539-1552, 2001. Disponível em: <<http://www.emeraldinsight.com/doi/pdfplus/10.1108/01443570110410892>>. Acesso em: 9 ago. 2016.
- DALRI, A. B.; CRUZ, R. L. Produtividade da cana-de-açúcar fertirrigada com N e K via gotejamento subsuperficial. **Engenharia Agrícola**, v. 28, p. 516-524, 2008. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/eagri/v28n3/a12v28n3>>. Acesso em: 9 ago. 2016.
- DANTAS FILHO, P. L.; PARENTE, V. **Análise da viabilidade econômica financeira de projetos de cogeração de energia a partir do bagaço de cana-de-açúcar em quatro usinas em São Paulo**. São Paulo, SP. 2010. Disponível em: <http://paulodantas.com.br/artigo_dantas.pdf>. Acesso em: 18 jun. 2015.
- DEGANUTTI, R., et al. Biodigestores rurais: modelo indiano, chinês e batelada.. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 4., 2002, Campinas. **Proceedings online...** Disponível em : <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.p?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022002000100031&lng=en&nrm=abn>. Acesso em: 29 mar. 2016.
- DIAS, G. V.; TOSTES, J. G. R. Desenvolvimento Sustentável: do eco desenvolvimento ao capitalismo verde. **Revista Sociedade Brasileira de Geografia**, Rio de Janeiro, v. 2, 2008. Disponível em: <http://www.socbrasileiradegeografia.com.br/revista_sbg/Artigos_arquivos/GUILHERME_artigo_SBG.pdf>. Acesso em: 18 jun. 2015.
- DINIZ, K. M. **Subsídios para a Gestão dos Planos de Aplicação de Vinhaça (PAV): um estudo de caso da região de Piracicaba**. 2010. Dissertação (Mestrado em Agro-energia) - Escola de Economia de São Paulo, Fundação Getúlio Vargas, São Paulo, 2010. Disponível em: <<http://bibliotecadigital.fgv.br/dspace/bitstream/handle/10438/8278/65080100012.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 17 ago. 2015.
- DONAIRE, D. **Gestão Ambiental na Empresa**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 1999.
- ELIAS NETO, A. **Estado da arte de vinhaça**, 2016. União da Indústria da Cana-de-açúcar. Piracicaba. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/download.php?idSecao=17&id=35414851>>. Acesso em: 4 mar. 2017.

ELKINGTON, J. **Sustentabilidade: canibais com garfo e faca**. Edição Especial, São Paulo: M. Books, 2012. Disponível em: <http://www.institutojatobas.org.br/mkt/top50/capitulos/Top50_cap22_Elkington.pdf>. Acesso em: 18 jun. 2015.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional**. Brasília: EPE, 2016. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2016.pdf>. Acesso em: 3 out. 2016.

EPELBAUM, M. **A influência da gestão ambiental na competitividade e no sucesso empresarial**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3136/tde-02072004-190334/>>. Acesso em: 18 jun. 2015.

ESTADO DE MINAS. **Pesquisas de multinacionais ameaçam liderança do etanol brasileiro**. Disponível em: <http://www.uai.com.br/UAI/html/sessao_4/2009/11/16/em_noticia_interna,id_sessao=4&id_noticia=136145/em_noticia_interna.shtml>. Acesso em: 1 jun. 2010.

FARIA, R. A. P. **Avaliação do potencial de geração de biogás e de produção de energia a partir da remoção da carga orgânica de uma estação de tratamento de esgoto – Estudo de caso**. 2012. Dissertação (Mestrado em Energia da Agricultura) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2012. Disponível em: <http://projetos.unioeste.br/pos/media/File/energia_agricultura/pdf/Dissertacao_Rui_A_P_Faria.pdf>. Acesso em: 18 jun. 2015.

FERNANDES, D. D. et al. Utilização do etanol em motores a combustão no Brasil. **Universo do Petróleo e do gás**, Nova Venécia, v. 1, n. 3, 2010. Disponível em: <http://novavenecia.multivix.edu.br/wp-content/uploads/2013/03/universo_pet_03.pdf>. Acesso em: 27 abr. 2015.

FERNANDES, F. A. N.; PISO, S. M.; MORAES JUNIOR, D. **Termodinâmica Química**. Fortaleza: UFC Editora, 2006.

FERNANDES FILHO, F. E.; ARAUJO, G. J. F. Normativos federais e estaduais reguladores da destinação da vinhaça no Brasil: uma proposta de nova abordagem. **Revista de Administração, Contabilidade e Economia da Fundace**, v. 7, n. 3, 2016.

FERRAZ JÚNIOR, A. D. N. **Digestão anaeróbia da vinhaça da cana-de-açúcar em reator acidogênico de leito fixo seguido de reator metanogênico de manta de lodo**. 2013. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-27082014-092345/>>. Acesso em: 24 abr. 2015.

FOGLIATTI, M. C. et al. **Sistema de Gestão Ambiental para Empresas**. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2011.

FONSECA, J. J. S. **Metodologia da pesquisa científica**. Fortaleza: UEC, 2002.

FORTUNSKI, B. Does the environmental management standard ISO 14001 stimulate sustainable development? An example from the energy sector in Poland. **Management of Environmental Quality: An International Journal**, v. 19, n. 2, p. 204-212, 2008. Disponível em: <<http://www.emeraldinsight.com/doi/pdfplus/10.1108/14777830810856582>>. Acesso em: 8 ago. 2016.

FRANÇA, A. B. **Montagem e avaliação de um reator anaeróbio de leito fluidizado automatizado no tratamento de efluentes de indústrias de refrigerantes**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2006. Disponível em: <<http://livros01.livrosgratis.com.br/cp073772.pdf>> Acesso em: 18 dez. 2016.

FRANÇA JUNIOR, A. T. **Análise do Aproveitamento Energético do Biogás Produzido numa Estação de Tratamento de Esgoto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, Bauru, 2008. Disponível em: <<http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariamecanica/nuplen/análise-do-aproveitamento-energetico-do-biogas-produzido-numa-estacao-de-tratamento-de-esgoto.pdf>>. Acesso em: 12 dez. 2016.

FREITAS, G. S.; DATHEIN, R. As energias renováveis no Brasil: uma avaliação acerca das implicações para o desenvolvimento socioeconômico e ambiental. **Revista Nexus Econômicos**, v. 7, n. 1, p. 71-94, 2015. Disponível em: <<http://www.ppge.ufrgs.br/ricardodathein/publicacoes/15-2013-energias.pdf>>. Acesso em: 27 mar. 2016.

FREIRE, W. J.; CORTEZ, L. A. B. **Vinhaça de cana-de-açúcar**. Guaíba: Agropecuária, 2000.

FUESS, L. T.; GARCIA, M. L. **Qual o valor da vinhaça?** Mitigação de impacto ambiental e recuperação de energia por meio da digestão anaeróbia. São Paulo: Cultura Acadêmica Editora, 2012.

FUNDAÇÃO DE AMPARO A PESQUISA DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Influência da matéria-prima na corrosividade e degradação do biodiesel**. 2012. Disponível em: <http://www.bv.fapesp.br/pt/pesquisa/?q=%22Biodiesel%22&count=30&format=&index=&q2=&sort=-data_inicio&page=4>. Acesso em: 27 abr. 2015.

GALBIATI, J. K.; LAVANHOLI, M. G. D. P; GALLO, C. A. Produção de energia elétrica a partir da queima do bagaço da cana-de-açúcar. **Nucleus**, v. 7, n. 1, p. 127-138, 2010. Disponível em: <<http://www.nucleus.feituverava.com.br/index.php/nucleus/article/view/319/376>>. Acesso em: 02 ago. 2015.

GANEM, R. S. (Coord.). **Conservação da biodiversidade: legislação e políticas públicas**. Brasília: Câmara dos Deputados, Ed. Câmara, 2010. Disponível em: <<http://www.terrabrasil.org.br/ecotecadigital/images/conservacao.pdf>>. Acesso em: 18 jun. 2015.

GARCÊZ, S. L. A. **Métodos de estimativa da evapotranspiração da cultura da cana-de-açúcar em condições de sequeiro**. 2013. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas da Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande. 2013. Disponível em:

<http://www.dca.ufcg.edu.br/posgrad_met/dissertacoes/SilviaLeticiaAlvesGarcez_2013.pdf>. Acesso em: 27 abr. 2015.

GASPAR, P. M. F. **Pós-tratamento de efluente de reator UASB em sistema de lodos ativados visando a remoção biológica do nitrogênio associada à remoção físico-química do fósforo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 2003. Disponível em:

<<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3147/tde-18122003-131000/pt-br.php>>. Acesso em: 27 mar. 2016.

GEHRING, C. G. **Análise da geração de energia elétrica a partir do biogás produzido na fermentação anaeróbica de vinhaça**. 2014. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia elétrica com ênfase em sistemas de energia e automação) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014. Disponível em:

<<http://www.tcc.sc.usp.br/tce/disponiveis/18/180500/tce-13012015-143737/?&lang=br/>>. Acesso em: 12 dez. 2016.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2007.

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

<http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC00000002200200200006&lng=en&nrm=abn>. Acesso em: 29 Mar. 2016.

GLORIA, N. A.; ORLANDO FILHO, J. Aplicação de vinhaça como fertilizante. **Boletim Técnico do Planalsucar**, Araras, v. 5, n. 1, p. 5-38, 1983.

GODOY, A. V. **A eficácia do Licenciamento Ambiental como um instrumento público de gestão do meio ambiente**. Brasília: OAB Editora, 2005.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. Energias renováveis: um futuro sustentável. **Revista USP**, São Paulo, n. 72, p. 6-15, 2007. Disponível em:

<www.revistas.usp.br/revusp/article/download/13564/15382>. Acesso em: 27 mar. 2016.

GOMES, M. T. M. S., EÇA, K. S., VIOTTO, L. A. Concentração da vinhaça por microfiltração seguida de nanofiltração com membranas. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v. 46, n. 6, p. 633-638, jun. 2011. Disponível em:

<<http://www.scielo.br/pdf/pab/v46n6/a09v46n6.pdf>>. Acesso em: 4 mar. 2017.

GRANATO, E. F. **Geração de energia a partir da biodigestão anaeróbia de vinhaça**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2003. Disponível em:

<http://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/90820/granato_ef_me_bauru.pdf?sequenc e=1>. Acesso em: 27 mar. 2016.

GOES, T.; MARRA, R.; SILVA, G. S. Setor sucroalcooleiro no Brasil: situação atual e perspectivas. **Revista de Política Agrícola**, Brasília, n. 2, p. 39-51, 2008. Disponível em: <<http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/125247/1/SetorsucroalcooleironoBrasil.pdf>>. Acesso em: 18 ago. 2015.

GUIMARAES, R.; FONTOURA, Y. Desenvolvimento sustentável na Rio+20: discursos, avanços, retrocessos e novas perspectivas. **Cadernos EBAPE**, Rio de Janeiro, v. 10, n. 3, p. 508-532, 2012. Disponível em: <<http://bibliotecadigital.fgv.br/ojs/index.php/cadernosebape/article/view/5477/4199>>. Acesso em: 18 jun. 2015.

HADEN, S. S. P. et al. Historical, practical, and theoretical perspectives on green management: An exploratory analysis. **Management Decision**, v. 47, n. 7, p. 1041-55, 2009. Disponível em: <<http://www.emeraldinsight.com/doi/abs/10.1108/00251740910978287>>. Acesso em: 17 ago. 2016.

HEIDRICH, J. W. F. **Modelagem e análise computacional de uma máquina Stirling de pressão livre**. Dissertação (mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/82609/259877.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 12 dez. 2016.

HENRIQUES, R. M. **Aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos: uma abordagem tecnológica**. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004. Disponível em: <http://observatorioambiental.iff.edu.br/publicacoes/publicacoes-científicas/lixo_tese.pdf>. Acesso em: 12 dez. 2016.

HIROSE, M. **Produção mais Limpa**. 2005. Disponível em: <http://www.cybermind.com.br/OLDfat/download/RevistaFAT03_2005.pdf>. Acesso em: 18 jun. 2015.

HOBSBAWN, E. **A era dos extremos: o breve século XX: 1941-1991**. São Paulo: Companhia das Letras, 1995.

HOJI, M. **Administração financeira e orçamentária: matemática financeira aplicada, estratégias financeiras, orçamento empresarial**. 8. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

HOLLANDA, L.; VAREJÃO, M. Energia e sustentabilidade: Desafios do Brasil na expansão da oferta e na gestão da demanda. **Cadernos FGV Energia e Catavento**, ano 1, n. 3, dez. 2014. Disponível em: <[http://bibliotecadigital.fgv.br/dspace/bitstream/handle/10438/13849/energia3%20\(1\).pdf?sequence=3](http://bibliotecadigital.fgv.br/dspace/bitstream/handle/10438/13849/energia3%20(1).pdf?sequence=3)>. Acesso em: 27 mar. 2016.

HUNT, C. B.; AUSTER, E. R. Proactive environmental management: avoiding the toxic trap. **MIT Sloan Management Review**, v. 31, n. 2, p. 7-18, 1990. Disponível em: <<http://sloanreview.mit.edu/article/proactive-environmental-management-avoiding-the-toxic-trap/>>. Acesso em: 7 ago. 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATISTICA. **Projeção da população do Brasil e das Unidades da Federação**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao/>>. Acesso em: 19 abr. 2017.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS. **História**. 2009. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/am/institucional/historia.htm>>. Acesso em: 9 jan. 2015.

INVESTING. **Preço do crédito de carbono no mercado futuro**. Disponível em: <<https://br.investing.com/commodities/carbon-emissions-historical-data>>. Acesso em: 21 mar. 2017.

JABBOUR, C. J. C. Tecnologias ambientais: em busca de um significado. **Revista de Administração Pública**, v. 44, n. 3, p. 591-611, 2010. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rap/v44n3/03.pdf>>. Acesso em: 13 ago. 2016.

JABBOUR, C. J. C. et al. “Verdes e competitivas?”: a influência da gestão ambiental no desempenho operacional de empresas brasileiras. **Ambiente e Sociedade**, v. 15, n. 2, p. 151-172, 2012. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1414-753X2012000200009&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 6 ago. 2016.

JABBOUR, A. B. L. S.; JABBOUR, C. J. C. Are supplier selection criteria going green? Case studies of company in Brazil. **Industrial Management & Data Systems**, v. 109, n. 4, p. 477-495. 2009. Disponível em: <<http://www.emeraldinsight.com/doi/pdfplus/10.1108/02635570910948623>>. Acesso em: 9 ago. 2016.

JABBOUR, C. J. C.; SANTOS, F. C. A.; NAGANO, M. S. Contributions of HRM throughout the stages of environmental management: methodological triangulation applied to companies in Brazil. **The International Journal of Human Resource Management**, v. 21, n. 7, p. 1049-1089, 2010. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/233324194_Contributions_of_HRM_throughout_the_stages_of_environmental_management_Methodological_triangulation_applied_to_companies_in_Brazil>. Acesso em: 17 ago. 2016.

JACOBI, P. Dilemas socioambientais na gestão metropolitana: do risco a busca da sustentabilidade urbana. **Revista Política e Trabalho**, João Pessoa, n. 25, p. 115-134, 2006. Disponível em: <<http://periodicos.ufpb.br/ojs/index.php/politicaetrabalho/article/view/6742/4181>>. Acesso em: 27 abr. 2015.

JUDGE, W.; DOUGLAS, T. Performance implications of incorporating natural environmental issues into the strategic planning process: an empirical assessment. **Journal of Management Studies**, v. 35, n. 2, p. 241 – 62, 1998. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1467-6486.00092/pdf>>. Acesso em: 11 ago.

KLABIN, I. O mecanismo de Desenvolvimento Limpo e as Oportunidades Brasileiras. **Parcerias Estratégicas**, Brasília, n. 9, p. 35-53, 2000.

KRAEMER, M. E. P. Gestão ambiental como vantagem competitiva. **Revista Gestão Universitária**, v. 2, n. 4, p. 1-9, 2005. Edição especial.

KOCHE, J. C. **Fundamentos de metodologia científica**: teoria da ciência e prática da pesquisa. 14. ed. Petrópolis, RJ: Vozes, 2000.

KOHLHEPP, G. Análise da situação da produção de etanol e biodiesel no Brasil. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 24, n. 68, 2010 Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40142010000100017&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 24 jul.2013.

LAGO, A. A. C. **Estocolmo, Rio, Johannesburgo**: o Brasil e as três conferências ambientais das Nações Unidas. Brasília, DF: Fundação Alexandre de Gusmão, 2006.

LAIME, E. M. O. et al. Possibilidades tecnológicas para a destinação da vinhaça: uma revisão. **Revista Trópica Ciências Agrárias e Biológicas**, v. 5, n. 3, pág. 27, 2011. Disponível em: <<http://www.periodicoseletronicos.ufma.br/index.php/ccaatropica/article/download/260/386/>>. Acesso em: 27 mar. 2016.

LAZARO, C. Z. **Influência da concentração de substrato e da temperatura na produção de hidrogênio a partir de vinhaça de cana-de-açúcar**. 2012. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-19102012-154700/>>. Acesso em: 24 abr. 2015.

LAZZARINI, S. G. Estudos de Caso para Fins de Pesquisa: Aplicabilidade e Limitações do Método. In: FARINA et al. (Coord). **Estudos de Caso em Agribusiness**. São Paulo: Pioneira, 1997. p. 9-23.

LIMA, A. B. B. V. **Pós tratamento de efluente de reator anaeróbio em sistema seqüencial constituído de ozonização em processo biológico anaeróbio**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) - Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-19032007-205446/en.php>>. Acesso em: 18 dez. 2016.

LIMA, H. Q. **Avaliação dos modelos Hashimoto e AMS-III.D para produção de metano com dejetos de suínos**. 2011. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Alimentos) - Universidade Federal do ABC, Santo André, 2011. 148 f. Disponível em: <http://tede.ufabc.edu.br/tde_busca/arquivo.php?codArquivo=254>. Acesso em: 28 mar. 2016.

LOPES, O. A. **Avaliação de métodos avançados de geração de energia elétrica na indústria de açúcar e bioenergia**. 2013. Dissertação (Mestrado em Economia) – Escola de Economia de São Paulo, Fundação Getúlio Vargas, São Paulo, 2013. Disponível em: <http://bibliotecadigital.fgv.br/dspace/bitstream/handle/10438/10996/Dissertacao_OTAVIOLOPES_VFINAL22072013.pdf.txt?sequence=3>. Acesso em: 27 mar. 2016.

LORENZETTI, J. V.; CARRION, R. M. Governança ambiental global: atores e cenários. **Cadernos EBAPE.BR**, v. 10, n. 3, p. 721-735, 2012. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1679-39512012000300014&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 17 ago. 2016.

LUDOVICE, M.T.F. **Estudo do efeito poluente da vinhaça infiltrada em canal condutor de terra sobre o lençol freático**. 1997. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – UNICAMP, Campinas. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/zeus/auth.php?back=http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=vtls000124559&go=x&code=x&unit=x>>. Acesso em: 24 abr. 2015.

MACEDO, I.C. et al. **Balanco 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. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/download.php?idSecao=17&id=11168105>>. Acesso em: 24 abr. 2015.

MAIA, A. G.; PIRES, P. S. Uma compreensão da sustentabilidade por meio dos níveis de complexidade das decisões organizacionais. **Revista de Administração do Mackenzie**, São Paulo, v. 12, n. 3, p. 177-206, jun. 2011. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1678-69712011000300008&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 18 jun. 2015.

MAIMON, D. **Passaporte Verde: Gestão ambiental e competitividade**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 1996.

MALAJOVICH, M. A. **Biotechnologia**. Rio de Janeiro: BTEDUC, 2016. Disponível em: <http://www.bteduc.bio.br/livros/Biotechnologia_2016.pdf>. Acesso em: 18 dez. 2016.

MARTINOT, E. Global Renewable Energy Markets and policies. **New Academy Review especial edition on Climate Change**, Maryland, 2004. Disponível em: <http://www.martinot.info/Martinot_NAR.pdf>. Acesso em: 22 abr. 2016.

MARTINS et al. Estudo da sustentabilidade empresarial: O caso e uma cooperativa gaúcha. **Revista Eletrônica de Gestão Organizacional**, Recife, v. 8, n. 3, p. 457-482, 2010. Disponível em: <<http://www.revista.ufpe.br/gestaoorg/index.php/gestao/article/view/250>>. Acesso em: 18 jun. 2015.

MELISSA, A. S. S. et al. Uso de vinhaça e impactos nas propriedades do solo e lençol freático. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 1, p. 108–114, 2007. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v11n1/v11n1a14>>. Acesso em: 27 mar. 2016.

MELO, J. A. S. **Inovação tecnológica: O uso direto de óleos vegetais como vetor energético no Brasil**. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Sustentável), Centro de Desenvolvimento Sustentável, Universidade de Brasília, Brasília, 2009. Disponível em: <http://repositorio.unb.br/bitstream/10482/4598/1/2009_JoseAntonioSalesdeMelo.pdf>. Acesso em: 12 dez. 2016.

MENKES, M. **Eficiência Energética, Políticas Públicas e Sustentabilidade**. 2004. 293 f. Tese (Doutorado em Desenvolvimento Sustentável) – Centro de Desenvolvimento Sustentável, Universidade de Brasília, 2004. Disponível em: <http://www.iar.unicamp.br/lab/luz/ld/Arquitetural/efici%EAncia%20energ%E9tica/Pesquisa/eficiencia_energetica_politicas_publicas_e_sustentabilidade.pdf>. Acesso em: 24 abr. 2015.

MIKHAILOVA, I. Sustentabilidade: evolução dos conceitos teóricos e os problemas da mensuração prática. **Revista Economia e Desenvolvimento**, Cascavel, n. 16, 2004. Disponível em: <<http://www.cascavel.ufsm.br/revistas>>. Acesso em: 27 abr. 2015.

MILES, M. P.; COVIN, J. G. Environmental marketing: a source of reputational, competitive and financial advantage. **Journal of Business Ethics**. v. 23, n. 3 p.299-311, 2000. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1023%2FA%3A1006214509281?LI=true> >. Acesso em: 17 jul. 2016.

MINISTÉRIO DA FAZENDA. **Panorama do mercado de fertilizantes**. Disponível em: <<http://seae.fazenda.gov.br/central-de-documentos/panoramas-setoriais/Fertilizantes.pdf>>. Acesso em: 17 abr. 2017.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Ambientes de contratação**. Brasília: MME, 2009. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/programas/leiloes_de_energia/menu/inicio.html>. Acesso em: 27 mar. 2016.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Portaria nº 538 de 16 de dezembro de 2015. Cria o Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica - ProGD, e institui Grupo de Trabalho, no âmbito do ProGD. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 16 de dezembro de 2015. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/10584/1942329/Portaria_n_538-2015/49ab0708-5850-404c-a924-2760bbd22bbc?version=1.1>. Acesso em: 30 jul. 2017.

MORAES, B. S.; ZAIAT, M.; BONOMI, A. Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane ethanol production in Brazil: Challenges and perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 44, p. 888–903, 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115000337>>. Acesso em: 27 mar. 2016.

MORAIS, C. F. **Metodologia de análise de desempenho de turbinas a vapor operando em ciclos convencionais**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2007. Disponível em: <<http://saturno.unifei.edu.br/bim/0031619.pdf>>. Acesso em: 12 dez. 2016.

MORAES, B. et al. Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane biorefineries in Brazil from energy, environmental, and economic perspectives: Profit or expense? **Applied Energy**, v. 113, p. 825–835, 2014. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261913005849>>. Acesso em 5 mar. 2017.

MORAES, M. L.; BACCHI, M. R. P. Etanol: do início às fases atuais de produção. **Revista de Política Agrícola**, v. 23, n. 4, p. 5-22, 2014. Disponível em: <<http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/121083/1/Etanol-do-inicio-as-fases.pdf>>. Acesso em: 28 mar. 2016.

MOREIRA, H. M.; GIOMETTI, A. B. R. Protocolo de Quioto e as possibilidades de inserção do Brasil no Mecanismo de Desenvolvimento Limpo por meio de projetos em energia limpa. **Contexto Internacional**. Rio de Janeiro, v. 30, n. 1, 2008. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S010285292008000100001&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 01 jul. 2012.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 3. ed. Viçosa: UFV, 2007. 320 p.

MOREZI, E. **Metodologia da Pesquisa**. Brasília: Universidade Católica de Brasília, 2004. Disponível em: <<http://www.inf.ufes.br/~falbo/files/MetodologiaPesquisa-Moresi2003.pdf>>. Acesso em: 24 abr. 2015.

MOTA, J. A. et al. Trajetória da governança ambiental. **Boletim Regional e Urbano**, 2008, n. 1. Disponível em: <http://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/boletim_regional/081207_boletimregionall1_cap3.pdf>. Acesso em: 27 abr. 2015.

MUELLER, Charles C. O debate dos economistas sobre a sustentabilidade: uma avaliação sob a ótica da análise do processo produtivo de Georgescu-Roegen. **Estudos Econômicos**, São Paulo, v. 35, n. 4, p. 687-713, Dec. 2005. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0101-41612005000400004&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 18 jun. 2015.

NASSIF, L. Empresas dinamarquesas anunciam tecnologia para fazer etanol de bagaço de cana. **Portal IG**. Disponível em: <<http://ultimosegundo.ig.com.br/colunistas/luisnassif/2010/02/26/o-etanol-de-segunda-geracao>>. Acesso em 24 jul.2015.

NASCIMENTO, L. F.; LEMOS, A. D. C.; MELLO, M. C. A. **Gestão socioambiental estratégica**. Porto Alegre: Bookman, 2008.

NASCIMENTO, T.; MENDONÇA, A.; CUNHA, S. Innovation and sustainability in energy production: The case of wind power generating system in Brazil. **Cadernos EBAPE**, v. 10, n. 3, p. 630-651, 2012. Disponível em: <<http://www.redalyc.org/pdf/3232/323227835010.pdf>>. Acesso em: 18 jun. 2015.

NEVES, M. F.; CONEJERO, M. A. **Estratégias para a cana no Brasil: um negócio classe mundial**. São Paulo: Atlas 2010.

NEVES, M. F.; CONEJERO, M. A. Sistema agroindustrial da cana: cenários e agenda estratégica. **Revista de Economia Aplicada**, v. 11, n. 4, p. 587-604, 2007. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S141380502007000400007&script=sci_arttext&tlng=ES>. Acesso em: 27 mar. 2016.

NEVES, M. F.; TROMBIN, V. G. (Coord.) **A dimensão do Setor Sucroenergético.** Mapeamento e Quantificação da Safra 2013/2014. Ribeirão Preto, SP: Markestrat, Fundace, FEA-RP/USP, 2014. Disponível em: <http://www.brasilagro.com.br/imagens/pdf/Mapeamento_Quantificacao_Setor_Sucroenergetico_Safra_2013-14.pdf>. Acesso em: 18 jun. 2015.

NOGUEIRA, C. E. C. et al. Exploring possibilities of energy insertion from vinasse biogas in the energy matrix of Paraná State, Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 48, p. 300–305, 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115002932>>. Acesso em: 27 mar. 2016.

NOVA CANA. **Vantagens da bioeletricidade do bagaço de cana para o Brasil.** São Paulo, 2015. Disponível em: <<http://www.novacana.com/estudos/vantagens-da-bioeletricidade-do-bagaco-de-cana-para-o-brasil-120913/>>. Acesso: 31 jul. 2015.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Conferência das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento Sustentável: do Rio à Rio +20 - 2012.** Disponível em: <<http://www.onu.org.br/rio20/tema/rio20/>>. Acesso em: 13 jan. 2015.

OLIVEIRA, L. R. et al. Sustainability: the evolution of concepts to implementation as strategy in organizations. **Produção**, São Paulo, v. 22, n. 1, p. 70-82, 2011. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0103-65132012000100006&script=sci_arttext>. Acesso em: 18 jun. 2015.

OLIVEIRA, M. Vinhaça alternativa: resíduo da produção de etanol pode ser usado para produzir biodiesel. **Pesquisa FAPESP**, São Paulo, n. 186, p. 70-73, 2011. Disponível em: <<http://revistapesquisa.fapesp.br/wp-content/uploads/2011/08/070-073-186.pdf?180c5b>>. Acesso em: 24 fev. 2016.

OLIVEIRA, O. J.; PINHEIRO, C. R. M. S. Implantação de sistemas de gestão ambiental ISO 14001: uma contribuição da área de gestão de pessoas. **Gestão e Produção**, v. 17, n. 1, p. 51-61, 2010. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/gp/v17n1/v17n1a05>>. Acesso em: 17 ago. 2016.

OLIVEIRA, O. J; SERRA, J. R. Benefícios e dificuldades da gestão ambiental com base na ISO 14001 em empresas industriais de São Paulo. **Produção**, v. 20, n. 3, p. 429-438, 2010. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/prod/v20n3/aop_T6_0009_0078.pdf>. Acesso em: 12 ago. 2016.

OLIVEIRA, R. D. **Geração de energia elétrica a partir do biogás produzido pela fermentação anaeróbia de dejetos em matadouros e as possibilidades no mercado de carbono.** 2009. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia com ênfase em energia e sistemas de automação) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009. Disponível em: <<http://www.tcc.sc.usp.br/tce/disponiveis/18/180500/tce-26042010-091847/?&lang=br>>. Acesso em: 27 mar. 2016.

OLIVEIRA, S. V. W. B. **Modelo para tomada de decisão na escolha de sistema de tratamento de esgoto sanitário**. 2004. Tese (Doutorado em Administração) - Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/12/12139/tde-19092006-125541/>>. Acesso em: 18 jun. 2015.

ORGANIZAÇÃO DOS PLANTADORES DE CANA DA REGIÃO DA REGIÃO CENTRO SUL DO BRASIL. **ORPLANA Informa**, n. 27, 28 jul. 2014. Disponível em: <http://www.orplana.agr.br/uploads/orplana_informa/2014/db0c138bb0de9816f5676ee3b5fae4ac.pdf>. Acesso em: 13 jan. 2015.

ORSATO, R. J. Posicionamento ambiental estratégico: Identificando quando vale a pena investir no verde. **Revista de Administração**, v. 8, n. 6, p. 1-29, 2002. Disponível em: <<http://seer.ufrgs.br/read/article/view/42723>>. Acesso em: 9 ago. 2016.

PACHECO, T. F. **Produção de Etanol: primeira ou segunda geração?** Disponível em: <<http://www.embrapa.br/embrapa/imprensa/artigos/2011/producao-de-etanol-primeira-ou-segunda-geracao#>>. Acesso em 24 jul.2015.

PAINULY, J. P. Barriers to renewable energy penetration; a framework for analysis. **Renewable energy**, v. 24, n. 1, 2001, p. 73-89. Disponível em: <<http://www1.upme.gov.co/sgic/sites/default/files/Barriers%20to%20renewable%20energy%20penetration.pdf>>. Acesso em: 22 abr. 2016.

PASSOS, P. N. C. A conferência de Estocolmo como ponto de partida para a proteção internacional do meio ambiente. **Revista Direitos Fundamentais e Democracia**, v. 6, p. 305-329, 2009. Disponível em: <<http://revistaeletronicardfd.unibrasil.com.br/index.php/rdfd/article/viewFile/18/17>>. Acesso em: 27 abr. 2015.

PEIXOTO, G. **Sistema fermentativo de duas fases para a produção de hidrogênio e metano a partir de esgoto sanitário combinado com águas residuárias industriais**. 2011. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-18102012-164602/>>. Acesso em: 24 abr. 2015.

PEREIRA, C. N.; SILVEIRA, J. M. F. J. Análise Exploratória da Eficiência Produtiva das Usinas de Cana-de-açúcar na Região Centro-Sul do Brasil. **Revista Economia e Sociologia Rural**, Brasília, v. 54, n. 1, p. 147-166, mar. 2016. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-20032016000100147&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 09 out. 2016.

PEREIRA, A. S. **Do fundo ao mecanismo: gênese, características e perspectivas para o mecanismo de desenvolvimento limpo; ao encontro ou de encontro à equidade?** 2002. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002. Disponível em: <<http://www.ppe.ufrj.br>>. Acesso em: 20 abr. 2017.

PESTANA, M.; GANGHIS, D. **Coordenação de Processos Industriais**. Salvador: Centro Federal de Educação Tecnológica da Bahia, 2010. Disponível em: <http://www.ifba.edu.br/professores/diogenesgaghis/TE_Tratamento%20de%20Efluentes/Apostila%20Tratamento%20de%20Efluentes.doc>. Acesso em: 18 dez. 2016.

PIACENTE, F. J. **Agroindústria Canavieira e o Sistema de Gestão Ambiental**: o caso das usinas localizadas nas Bacias Hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá. 2005. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Econômico) – UNICAMP, Campinas. 2005. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/zeus/auth.php?back=http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=vtls000386200&go=x&code=x&unit=x>>. Acesso em: 24 abr. 2015.

PINTO, C. P. **Tecnologia da Digestão Anaeróbia da Vinhaça e Desenvolvimento Sustentável**. 1999. Dissertação (Mestrado em Planejamento de sistemas energéticos) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=vtls000188461/>>. Acesso em: 28 mar. 2016.

PINTO, J. D. S. **Tratamento de Esgotos Sanitários A partir de Filtro Anaeróbio de Fluxo Ascendente Utilizando Escória de Alto Forno como Meio Suporte**. Dissertação (Mestrado em Saneamento e Meio Ambiente) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo horizonte, 1995. Disponível em: <<http://www.smarh.eng.ufmg.br/defesas/586M.PDF>>. Acesso em: 18 dez. 2016.

PORTER, M. E. **Competição**. Ed. revista e ampliada. Campus. São Paulo: 2009.

PORTER, M. E.; VAN DER LINDE, C. Green and Competitive: Ending the Stalemate. **Harvard Business Review**, v. 73, n. 5, p. 120–133, 1995. Disponível em: <http://www.uvm.edu/~gflomenh/ENRG-POL-PA395/readings/Porter_Linde.pdf>. Acesso em: 17 ago. 2016.

POVEDA, M. M. R. **Análise econômica e ambiental do processamento da vinhaça com aproveitamento energético**. 2014. Dissertação (Mestrado em Energia) - Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/106/106131/tde-25032015-161117/>>. Acesso em: 24 abr. 2015.

PRADO JUNIOR, C. **História e desenvolvimento**. São Paulo: Brasiliense, 1972.

PROCKNOR, C. **Energia elétrica a partir vinhaça**. UNICA, 2009. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/convidados/25641156920337715081/energia-elétrica-a-partir-da-vinhaca/>>. Acesso em: 7 abr. 2017.

RAFALDINI, M. E. et al. Controle biológico para sistema de vinhaça no solo. **Engenharia Ambiental**, Espírito Santo do Pinhal, v. 3, n. 2, p. 041-057, 2006. Disponível em: <<http://www.unipinhal.edu.br/ojs/engenhariaambiental/include/get./>>>. Acesso em: 28 mar. 2016.

REGAZZINI, L. C.; BACHA, C. J. C. A tributação no setor sucroenergético do estado de São Paulo: anos de 2000 e 2008. **Revista Economia e Sociologia Rural**, Brasília, v. 50, n. 4, p. 801-818, 2012. Disponível em:

<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-20032012000400012&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 09 out. 2016.

REGO, E. E.; HERNANDEZ, F. M. Eletricidade por digestão anaeróbia da vinhaça de cana-de-açúcar: contornos técnicos, econômicos e ambientais de uma opção. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 6., 2006. **Anais...** Campinas, Unicamp, 2006.

REPINALDO, V. P. R. **Otimização de um ciclo Brayton irreversível com regeneração, inter resfriamento e reaquecimento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, 2013. Disponível em:

<http://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/93080/repinaldo_vp_me_bauru.pdf?sequence=1>. Acesso em: 12 dez. 2016.

REZENDE, A. J.; DALMACIO, F. Z.; RIBEIRO, M. S. A Potencialidade dos Créditos de Carbono na Geração de Lucro Econômico Sustentável da Atividade de Reflorestamento. **Organizações Rurais e Agroindustriais**, Lavras, v. 14, n. 1, p. 108-126, 2012.

RIBAS, M. M. F. **Tratamento de vinhaça em reator anaeróbio operado em batelada sequencial contendo biomassa imobilizada sob condições termofílicas e mesofílicas**. 2006. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006. Disponível em:

<<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-19032007-171353/>>. Acesso em: 24 abr. 2015.

RIBAS, R.P. **Estratégias de Empresas de Petróleo no Cenário de Mudanças Climáticas Globais**. 2008. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) - PPE/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2008. Disponível em:

<<http://www.ppe.ufrj.br/ppe/production/tesis/rodrigop.pdf>>. Acesso em: 18 jun. 2015.

RIO DE JANEIRO (Estado). Lei Nº 6361, de 18 de dezembro de 2012. Dispõe sobre a política estadual de gás natural renovável – GNR. **Palácio da Guanabara**, 18 dez. 2012.

Disponível em: <http://biogas.cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/27/2013/12/lei6361_12_2012_RJ.pdf>. Acesso em: 24 abr. 2015.

RIZZO, A. C. L., LEITE, S. G. F. **Produção de sulfeto em reator do tipo UASB e sua potencial aplicação na remoção de metais pesados de efluentes**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004. Disponível em:

<http://biblio.cetem.gov.br/bitstream/handle/cetem/339/sta-32_I.pdf?sequence=1>. Acesso em: 18 dez. 2016.

ROCHA, M. T. **Aquecimento global e o mercado de carbono: uma aplicação do modelo CERT**. 2003. Tese (Doutorado em Economia Aplicada) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/tesesdisponiveis/1111132/tde-13052003-163913>>. Acesso em: 01 jul. 2012.

RODRIGUES, A. et al. Estimativa do potencial de geração de energia elétrica a partir da vinhaça. **Acta Iguazu**, Cascavel, v. 1, n. 2, p. 80-93, 2012. Disponível em: <<http://e-revista.unioeste.br/index.php/actaiguazu/article/download/7040/5192>>. Acesso em: 28 mar. 2016.

ROMAGNOLI, H. C. **Identificação de Barreiras à Geração Distribuída no Marco Regulatório Atual do Setor Elétrico Brasileiro**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/102160/221032.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 22 abr. 2016.

ROMEIRO, A. R. Desenvolvimento sustentável: uma perspectiva econômico-ecológica. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 26, n. 74, p. 65-92, 2012. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40142012000100006&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 18 jun. 2015.

ROMERO, T. **Etanol de segunda geração é essencial à sustentabilidade dos biocombustíveis**. 2008. Disponível em: <<http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=etanol-de-segunda-geracao-e-essencial-a-sustentabilidade-dos-biocombustiveis&id=010115081226>>. Acesso em: 24 jul. 2015.

RONDINA, J. M. R. **Geração distribuída utilizando micro centrais hidrelétricas com tecnologia assíncrona**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/14650/1/JMRondinaDISPRT.pdf>>. Acesso em: 12 dez. 2016.

ROSA, H. R.; MONTEGGIA, L. O. Comportamento de reator anaeróbio de leito fluidizado inverso submetido a crescentes cargas orgânicas. In: SIMPÓSIO ÍTALO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 6., 2002, São Paulo: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2002. Disponível em: <<http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/sibesa6/sinov.pdf>> Acesso em: 18 dez. 2016.

ROSE, R. **A gestão empresarial e a questão ambiental**. São Paulo, 2008. Disponível em: <<http://www.ambientebrasil.com.br/>>. Acesso em: 13 jan. 2015.

ROSSETO, A. J. Utilização agrônômica dos resíduos e subproduto da indústria açucareira e alcooleira. In: PARANHOS, S.B. **Cana-de-açúcar: cultivo e utilização**. Campinas: Fundação Cargill, v. 2, p. 435-504, 1987. Disponível em: <http://www.researchgate.net/publication/221899784_Utilizao_agronmica_dos_subprodutos_e_resduos_da_industria_aucareira_e_alcooleira>. Acesso em: 17 ago. 2015.

SACHS, I. **Estratégias de transição para o século XXI: desenvolvimento e meio ambiente**. São Paulo: Studio Nobel, 1993.

SALOMON, K. R. **Avaliação técnico-econômica e ambiental da utilização do biogás proveniente da biodigestão da vinhaça em tecnologias para geração de eletricidade.** 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2007. Disponível em: <<http://homologa.ambiente.sp.gov.br/biogas/publicacoes.asp>>. Acesso em: 24 abr. 2015.

SANCHES, C. S. Gestão ambiental proativa. **Revista de Administração de Empresas**, v. 40, n. 1, p. 76-87, 2000. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-75902000000100009&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 17 ago. 2016.

SANTA CRUZ, L. F. L. **Viabilidade técnica/econômica/ambiental das atuais formas de aproveitamento da vinhaça para o setor sucroenergético do Estado de São Paulo.** 2011. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-04052012-104315/>>. Acesso em: 24 abr. 2015.

SANTOS, D.S. **Produção de etanol de segunda geração por *Zymomonas mobilis* naturalmente ocorrente e recombinante, empregando biomassa lignocelulósica.** 2012. Tese (Doutorado em tecnologia de processos químicos e bioquímicos), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <<http://tpqb.eq.ufrj.br/download/etanol-de-2a-geracao-por-zymomonas-mobilis.pdf/>>. Acesso em: 24 abr. 2015.

SÃO PAULO (Estado). Decreto Lei N° 58. 659 de 4 de dezembro de 2012. Institui o Programa Paulista de Biogás e dá providências correlatas. **Palácio dos Bandeirantes, 4 dez. 2012.** Disponível em: <http://biogas.cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/27/2013/12/decreto_58659_041212.pdf>. Acesso em: 24 abr. 2015.

SCHULZ, C. K. et al. Tratamento de efluentes da indústria de arroz parboilizado em reatores EGSB. **Revista Brasileira de Agrociência**, v. 7, n. 1, p. 68-72, 2001. Disponível em: <<https://periodicos.ufpel.edu.br/ojs2/index.php/CAST/article/download/356/350>>. Acesso em: 18 dez. 2016.

SEQUINEL, M. C. M. Cúpula mundial sobre desenvolvimento sustentável – Joanesburgo: entre o sonho e o possível. **Análise Conjuntural**, Curitiba: IPARDES, v. 24, n. 11/12, p. 13-16, 2002. Disponível em: <http://www.ipardes.gov.br/biblioteca/docs/bol_24_6e.pdf>. Acesso em: 18 jun. 2015.

SERENO FILHO, J. A. et al. Tratamento de efluentes da indústria de bebidas em reator anaeróbio de circulação interna (IC). **Revista Internacional de Ciências**, v. 3, n. 1, 2013. Disponível em: <<http://www.e-publicacoes.uerj.br/index.php/ric/article/download/7065/5072>>. Acesso em: 18 dez. 2016.

SHEEHAN, G. J.; GREENFIELD, P. F. Utilization, Treatment and Disposal of Distillery Wastewater. **Water Research**, v. 14, p. 257-277, 1980. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0043135480900974>>. Acesso em: 24 fev. 2016.

SILVA, C. L. S.; BARBOSA, S. L. Estratégia, fatores de competitividade e contexto de referência das organizações: uma análise arquetípica. **Revista Administração Contemporânea**, v. 6, n. 3, p. 7-32, 2002 Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-65552002000300002&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 9 ago. 2016.

SILVA, C. R. A. S. et al. A biomassa como energia alternativa para o Brasil. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, São Paulo, v. 1, n. 2, 2005. Disponível em: <http://www.rbciamb.com.br/images/online/02_artigo_4_artigos83.pdf>. Acesso em: 13 jan. 2015.

SILVA, E. G. **Potencial Experimental de Produção de Biogás em Equipamento de Pequena Escala com Utilização de Esterco Bovino**. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento regional e meio ambiente) - Fundação Universidade Federal de Rondônia, Porto Velho, 2013. Disponível em: <http://www.pgdra.unir.br/downloads/Enio_Gomes_Dissertacao_2010_2013.pdf>. Acesso em: 18 dez. 2016.

SILVA, G. A. **Avaliação das tecnologias de disposição de vinhaça de cana-de-açúcar quanto ao aspecto de desenvolvimento ambiental e econômico**. 2012. Tese (Doutorado em Térmica e Fluidos) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18147/tde-21052012-174023/>>. Acesso em: 24 abr. 2015.

SILVA, J. A. S. **Concentrado de vinhaça biodigerida como fertilizante: Efeito no substrato, no crescimento e na nutrição da cana-de-açúcar**. 2012. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2012. Disponível em: <http://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/96886/silva_jas_me_jabo.pdf?sequence=1>. Acesso em: 4 mar. 2017.

SILVA, M. A. S., GRIEBELER, N. P., BORGES, L. C. Uso de vinhaça e impactos nas propriedades do solo e lençol freático. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, p. 108-114, 2007. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v11n1/v11n1a14>>. Acesso em: 4 mar. 2017.

SILVA, T. A. Estudo de viabilidade de implantação de um concentrador de vinhaça em uma usina produtora de etanol. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 35., Fortaleza, 2015. **Anais...** Fortaleza: ENEP, 2015. Disponível em: <http://www.abepro.org.br/biblioteca/TN_STO_206_219_27780.pdf>. Acesso em: 4 mar. 2017.

SIMOES, C. L. N., SENA, M. E. R., CAMPOS, R. Estudo da viabilidade econômica da concentração de vinhaça a partir de osmose inversa. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 24., Florianópolis, 2004. **Anais...** Florianópolis: ENEGEP, 2004. Artigos, p. 1-8. Disponível em: <http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEgEP2004_Enegep1004_1360.pdf>. Acesso: 5 mar. 2017.

SIQUEIRA, L. M. **Influência da taxa de carregamento orgânico na degradação anaeróbia da vinhaça em reator de leito fluidizado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2010. Disponível em:

<<https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/3996/1832.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 18 dez. 2016.

SLACK, N. et al. **Administração da produção**. São Paulo: Atlas, 2002.

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

<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662007000100014&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 17 ago. 2015.

SOARES, M. G. **Efeito da suplementação de cobalto na biodigestão anaeróbia de vinhaça de cana-de-açúcar em reator termofílico de leito estruturado**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, 2015. Disponível em:

<<https://www.unifal-mg.edu.br/ppgcea/files/file/disserta%C3%A7%C3%B5es/Marcela%20Disserta%C3%A7%C3%A3o%20Vers%C3%A3o%20Final.pdf>>. Acesso em: 18 dez. 2016.

SOCIEDADE DOS TÉCNICOS AÇUCAREIROS E ALCOOLEIROS DO BRASIL. Paques - Geração de Energia a Partir da Biodigestão da Vinhaça. **STAB**, v. 32, n. 4, 2014. Disponível em: <http://www.stab.org.br/Artigos%20de%20Capa/paques_2014.pdf>. Acesso em: 18 dez. 2016.

SOUSA, P. N.; SCUR, G.; SOUZA, R. C. Panorama da cadeia produtiva do etanol no Brasil: gargalos e proposições para seu desenvolvimento. **GEPROS - Gestão da Produção, Operações e Sistemas**, ano 7, n. 3, 2012, p. 145-159. Disponível em:

<<http://revista.feb.unesp.br/index.php/gepros/article/viewFile/394/454>>. Acesso em: 28 mar. 2016.

SOUZA, H. O Grupo Banco Mundial e as estratégias de gestão ambiental global para o Brasil. In: BARROS, Flávia. (org.) et al. **As Estratégias dos Bancos Multilaterais para o Brasil**. Brasília: Rede Brasil, 2001.

SOUZA, Z. J.; AZEVEDO, P. F. Geração de energia elétrica excedente no setor sucroalcooleiro: um estudo a partir das usinas paulistas. **Revista Economia e Sociologia Rural**, Brasília, v. 44, n. 2, p. 179-199, 2006. Disponível em:

<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-20032006000200002&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 20 dez. 2016.

STAUD, P. B. **Modelagem e simulação dinâmica de colunas de destilação**. 2007.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007. Disponível em:

<<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/12218/000619755.pdf?...>>. Acesso em: 4 mar. 2017.

STEFANELLI, N. O.; JABBOUR, C. J. C. Análise da inclusão da gestão ambiental na estrutura organizacional de empresas brasileiras do setor de bebidas: estudo de múltiplos casos. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 4, n. 1, p. 44-54, 2012. Disponível em: <<http://www.revistaret.com.br/ojs-2.2.3/index.php/ret/article/view/96>>. Acesso em: 17 ago. 2016.

STROBEL, J. S. **Modelo para mensuração da sustentabilidade corporativa a partir de indicadores**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/102809/223696.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 18 jun. 2015.

SUZUKI, A. B. P. et al. Uso de biogás em motores de combustão interna. **Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias**, Guarapuava-PR, v. 4, n. 1, p. 221–237, 2011. Disponível em: <<http://revistas.unicentro.br/index.php/repaa/article/viewFile/1405/1487>>. Acesso em: 12 dez. 2016.

SZKLO, A.; TOLMASQUIM, M. Strategic cogeneration – fresh horizons for the development of cogeneration in Brazil, **Applied Energy**, v. 69, p. 257-268, 2001. Disponível em: <[http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306-2619\(01\)00016-2](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306-2619(01)00016-2)>. Acesso em: 27 mar. 2016.

SZWARC, A. Na rota do etanol de segunda geração. **Agro Rede Notícias**. São Paulo. Disponível em: <<http://www.agroredenoticias.com.br/textos.aspx?QN3amXB1bo8HXMSseW3S06g>>. Acesso em: 14 de Abr 2015.

TAHAN, C. M. V. Impactos Ambientais e Sociais do Tratamento e Disposição de Resíduos Sólidos Urbanos. **Centro Nacional de Referência em Biomassa da Universidade de São Paulo**. 2013. Disponível em: <<http://143.107.4.241/documentos/documentos/painel-3-1-tahan.pdf>>. Acesso em: 22 abr. 2016.

TOSCANI, D. C. **Avaliação e aplicação de simulações matemáticas para definição de regime hidráulico e constantes cinéticas de remoção de matéria orgânica em reatores de tratamento de esgoto sanitário**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos) - Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010. Disponível em: <<http://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/24244/Dissertacao%20-%20Daniel%20Toscani.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 18 dez. 2016.

TRIGOSO, F. B. M. **Demanda de Energia Elétrica e Desenvolvimento Socioeconômico: o caso das comunidades rurais eletrificadas com sistemas fotovoltaicos**. 2004. Tese (Doutorado em Energia) - Programa Inter unidades de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004. Disponível em: <http://www.iee.usp.br/biblioteca/producao/2004/Teses/Tese_Federico.pdf>. Acesso em: 18 jun. 2015.

UNIÃO DAS INDUSTRIAS DA CANA DE AÇUCAR. **Estimativa SAFRA 2016/2017**. São Paulo, 2016 a. Disponível em: <<http://unica.com.br/download.php?idSecao=17&id=10968146>>. Acesso em: 3 out. 2016.

UNIÃO DAS INDUSTRIAS DA CANA DE AÇUCAR. **Leilões bem estruturados e fortalecimento do mercado livre podem incentivar biomassa e biogás de vinhaça.** São Paulo, 2016 b. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/noticia/7657299920328579221/leiloes-bem-estruturados-e-fortalecimento-do-mercado-livre-podem-incentivar-biomassa-e-biogas-da-vinhaca/>>. Acesso em: 3 out. 2016.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DA CANA-DE-AÇÚCAR. **Preço teto da biomassa deve cair 11% no próximo leilão de energia.** Disponível em: <<http://www.unica.com.br/noticia/41597945920323130215/preco-teto-para-a-biomassa-cai-11-por-cento-para-o-proximo-leilao-de-energia/>>. Acesso em: 4 mar. 2017.

UNIÃO DA INDUSTRIA DA CANA DE AÇUCAR. **Produção de etanol por estado na safra 2015/2016.** Disponível em: <http://www.unicadata.com.br/historico-de-producao-e-moagem.php?idMn=31&tipoHistorico=2&acao=visualizar&idTabela=1802&produto=etanol_total&safrIni=2015%2F2016&safrFim=2015%2F2016&estado=RS%2CSC%2CPR%2CSP%2CRJ%2CMG%2CES%2CMS%2CMT%2CGO%2CDF%2CBA%2CSE%2CAL%2CPE%2CPB%2CRN%2CCE%2CPI%2CMA%2CTO%2CPA%2CAP%2CRO%2CAM%2CAC%2CRR>. Acesso em 19 abr. 2017.

UNIÃO DAS INDUSTRIAS DA CANA DE AÇUCAR. **Relatório de Sustentabilidade do setor sucroenergético.** Disponível em: <<http://www.unica.com.br/download.php?idSecao=17&id=21574014/>>. Acesso em: 3 out. 2016.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATECHANGE. **Text of the Convention.** Disponível em: <http://unfccc.int/key_documents/the_convention/items/2853.php>. Acesso em: 01 jul. 2012.

VALENTE, M. S. et al. **Bens de capital para o setor sucroenergético: a indústria está preparada para atender adequadamente a novo ciclo de investimentos em usinas de cana-de-açúcar? Bioenergia BNDES Setorial**, n. 36, p. 119-178, 2012. Disponível em: <http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/bndes/bndes_pt/Institucional/Publicacoes/Consulta_Expressa/Tipo/BNDES_Setorial/201209_04.html>. Acesso em: 18 jun. 2015.

VARELLA, C. A. A.; SANTOS, G. S. **Noções Básicas de Motores Diesel.** Seropédica: Editora da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <http://www.ufrj.br/institutos/it/deng/varella/Downloads/IT154_motores_e_tratores/Literatura/No%20E7%20F5es%20B%20E1sicas%20de%20Motores%20Diesel.pdf>. Acesso em: 12 dez. 2016.

VENEZIA, A. A. **Biogás no Estado de São Paulo: Novo potencial em um mercado restrito.** 2014. Dissertação (Mestrado em Políticas Públicas e Gestão Governamental) - Escola de Administração de Empresas de São Paulo, Fundação Getúlio Vargas, São Paulo, 2014. Disponível em: <<http://bibliotecadigital.fgv.br/dspace/bitstream/handle/10438/12069/Venezia%20Anthony%20Aaron%20Biog%C3%A1s%20Trabalho%20Vers%C3%A3o%20Final%202.10.2014.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 27 mar. 2016.

- VIANA, A. N. C. et al. **Eficiência Energética: Fundamentos e Aplicações**. Campinas: ANEEL, 2012. Disponível em: <http://www.elektro.com.br/Media/Default/DocGalleries/Eficientiza%C3%A7%C3%A3o%20Energ%C3%A9tica/Livro_Eficiencia_Energetica.pdf>. Acesso em: 12 dez. 2016.
- VIEIRA, R. S. Rio+20: Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento: contexto, principais temas e expectativa em relação ao novo “Direito da Sustentabilidade”. **Revista Novos Estudos Jurídicos**, Itajaí, v. 17, n. 1, p. 48-69, jan./ abr. 2012. Disponível em: <<http://www6.univali.br/seer/index.php/nej/article/viewFile/3638/2181>>. Acesso em: 18 jun. 2015.
- VILAÇA, A. C.; PINTO, D. C. A. **Sustentabilidade do setor sucroalcooleiro**. Disponível em: <<http://www.fazu.br/ojs/index.php/posfazu/article/%20viewFile/467/359>>. Acesso em: 18 jun. 2015.
- WEBBER, M. I. **Avaliação da eficiência de um reator anaeróbio de leite fluidizado para o tratamento de resíduos líquidos da indústria de refrigerantes**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba. Disponível em: <http://www.ppgerha.ufpr.br/publicacoes/dissertacoes/files/120-Marisa_Isabel_Weber.pdf>. Acesso em: 18 dez. 2016.
- WILLINGTON, I. P.; MARTEN, G. G. Options for handling stillage waste from sugar-based fuel ethanol production. **Resources and Conservation**, v. 8, p. 111-29. 1982. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0166309782900360>>. Acesso em: 17 ago. 2015.
- YU, C. M. **Seqüestro Florestal de Carbono no Brasil**. São Paulo: Annablume, 2004.
- ZAGO, A. P. P. **Sustentabilidade corporativa: O caso da Dow Jones Sustainability Index**. 2007. Dissertação (Mestrado em Administração) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007. Disponível em: <<http://www.nea.ie.ufu.br/dissertacoes/10.pdf>>. Acesso em: 24 abr. 2015.
- ZAIAT, M. **Desenvolvimento e análise de bioreatores anaeróbios contendo células imobilizadas para o tratamento de águas residuárias: Reator anaeróbio horizontal de leite fixo e reator anaeróbio operado em bateladas sequenciais**. Tese (Livre docência) - Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/livredocencia/18/tde-30012008-100731/publico/Livre-docencia-M.Zaiat-final.pdf>>. Acesso em: 18 dez. 2016.
- ZANCANER, M. G.; SANTOS, T. B. S. S. Cogeração: Ampliação da Oferta de Energia Elétrica com a Biomassa (Bagaço da Cana-de-Açúcar). **Revista Diálogos Interdisciplinares**, v. 2, n. 2 p. 47-65, 2013. Disponível em: <<http://www3.brazcubas.br/ojs2/index.php/dialogos/article/view/21/>>. Acesso em: 27 mar. 2016.

ZANETTI, A. A.; OLIVEIRA JUNIOR, S. **Avaliação comparativa de sistemas de cogeração com utilização de bagaço de cana-de-açúcar e gás natural**. Disponível em: <http://www.mecanica-poliusp.org.br/wp-content/uploads/2014/02/Art_TCC_020_2006.pdf>. Acesso em: 31 jul. 2015.

ZANIN, A.; BAGATINI, F. M.; PESSATTO, C. B. Viabilidade econômico-financeira de implantação de biodigestor: uma alternativa para reduzir os impactos ambientais causados pela suinocultura. **Custos e Agronegócio on line**, v. 6, n. 1, 2010. Disponível em: <<http://www.custoseagronegocioonline.com.br/número1v6/Biodigestor.pdf>>. Acesso em: 27 mar. 2016.

ZARATINI, A. J. **Análise de viabilidade sócio-ambiental e econômica de alternativas de produção energética de subprodutos do sistema sucroenergético para usinas da região de Ribeirão Preto - SP**. 2013. Dissertação (Mestrado em Administração de Organizações) - Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2013. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/96/96132/tde-07112013-100105/>>. Acesso em: 24 abr. 2015.

ZILBER, S. N.; KOGA, E. Mercado de Créditos de Carbono no Brasil e o Papel dos Agentes Intermediários: Desafios e Oportunidades. **Organizações Rurais e Agroindustriais**, Lavras, v. 13, n. 1, p. 139-153, 2011

APÊNDICE A

Memória de cálculo para produção de etanol de 500 metros cúbicos por dia.

Concentrador de vinhaça.

Avaliação econômica.

Tabela 40 - Dados de safra e insumos agroindustriais

| | |
|--------------------------------------------------------|--------------|
| Dias de safra | 200,00 |
| Período de safra (meses) | 7,00 |
| Horas de funcionamento do concentrador/ horas de safra | 4.800,00 |
| Produção de etanol/dia (m ³) | 500,00 |
| Produção de vinhaça/dia (m ³) | 5.000,00 |
| Produção de etanol/ano (m ³) | 100.000,00 |
| Produção de vinhaça/ano (m ³) | 1.000.000,00 |
| DQO de vinhaça (kg/m ³) | 21,00 |

Fonte: Moraes et al. (2014).

Tabela 41 - Investimento e manutenção em concentrador de vinhaça

| | |
|--------------|-------------------|
| Investimento | R\$ 20.000.000,00 |
| Manutenção | R\$ 200.000,00 |

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Citrotec (2017).

Tabela 42 – Operação em concentrador de vinhaça

| | |
|-------------------------------------|----------------|
| Potência MW | 0,294 |
| Eletricidade MWh | R\$ 354.211,20 |
| Soda cáustica/ano (m ³) | R\$ 265.824,00 |

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Citrotec (2017).

Tabela 43 - Capacidade e número de concentradores

| | |
|--------------------------------------------------------------------|--------------|
| Capacidade de processamento do volume de vinhaça (m ³) | 1.751.896,00 |
| Capacidade de redução do volume de vinhaça (m ³) | 175.189,60 |
| Número de concentradores de vinhaça | 1,00 |

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Citrotec (2017).

Tabela 44 - Custo com transporte e mão de obra de vinhaça in natura

| Sistema de transporte e aplicação | Máquina | % de volume de vinhaça a ser transportado | Distância média percorrida para fertirrigação (km) | Velocidade média percorrida pelo caminhão(km/h) | Tempo médio de aplicação e recarga de vinhaça (horas) | Volume de vinhaça transportada por dia (m ³) | Número de viagens no transporte de vinhaça por dia | Número de viagens no transporte de vinhaça por ano | Número de caminhões necessários para transporte de vinhaça | Número de camioneiros necessários para o transporte de vinhaça em três turnos |
|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| Caminhão aplicando diretamente | Caminhão 2318 com tanque de 15 m ³ | 5% | 7,00 | 35 | 0.3 | 250,00 | 17,00 | 3.400,00 | 1,00 | 3,00 |
| Caminhão com aspersão combinado com motobomba | Caminhão Volvo rodotrem com dois tanques de 30m ³ cada e motobomba | 24% | 12,00 | 20 | 1,2 | 1.200,00 | 20,00 | 4.000,00 | 2,00 | 6,00 |
| Motobomba em canal com montagem direta ou rolão | Motor MB OM 352 160 CV e Bomba EQ 9048 140 m ³ /h | 71% | 63,00 | | | 3.550,00 | | | | |

Fonte: Adaptado Macedo et al. (2004) e Poveda (2014).

Tabela 45 - Dados com logística de vinhaça antes do concentrador

| Evento | Custo |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Custo mensal de motorista mais encargos trabalhistas e sociais sobre o salário (R\$) | R\$ 4.904,86 |
| Preço do Diesel pago pela usina R\$/litro | R\$ 2,77 |
| Consumo de combustível por safra - caminhão 2318, caminhão Volvo rodotrem e motor MB OM 352 e bomba EQ 9048 (litros) | 222.130,67 |
| Depreciação e O&M mensal por caminhão 2318 e caminhão Volvo rodotrem (R\$) | R\$ 6.000,00 |

Fonte: Adaptado Macedo et al. (2004), Poveda (2014) e Silva (2015).

Tabela 46 - Custos com logística de vinhaça antes do concentrador

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
| Custo anual de motorista mais encargos trabalhistas e sociais sobre o salário (R\$) | R\$ 309.006,37 |
| Consumo de combustível por safra - caminhão 2318, caminhão Volvo rodotrem e motor MB OM 352 e bomba EQ 9048 (litros) | 222.130,67 |
| Custo de consumo de combustível por safra - caminhão 2318, caminhão Volvo rodotrem e motor MB OM 352 e bomba EQ 9048 (R\$) | R\$ 615.079,82 |
| Custo de depreciação por safra da frota de caminhões 2318 e Volvo rodotrem (R\$) | R\$ 126.000,00 |
| Total | R\$ 1.050.086,19 |

Fonte: Adaptado Macedo et al. (2004), Poveda (2014) e Silva (2015).

Tabela 47 - Volume de vinhaça concentrada por dia

| | |
|----------------------------------------------|---------------|
| Volume de vinhaça concentrada por dia | 500,00 |
|----------------------------------------------|---------------|

Fonte: Poveda (2014).

Tabela 48 - Custo com transporte e mão de obra de vinhaça concentrada

| Sistema de transporte e aplicação | Máquina | % de volume de vinhaça a ser transportado | Distância média percorrida para fertirrigação (km) | Velocidade média percorrida pelo caminhão(km/h) | Tempo médio de aplicação e recarga de vinhaça (horas) | Volume de vinhaça transportada por dia (m ³) | Número de viagens no transporte de vinhaça concentrada por dia | Número de viagens no transporte de vinhaça concentrada por ano | Número de caminhões necessários para transporte de vinhaça | Número de camioneiros necessários para o transporte de vinhaça em três turnos |
|-----------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| Caminhão aplicando diretamente | Caminhão 2318 com tanque de 15 m ³ | 100% | 7,00 | 35 | 0.3 | 500,00 | 34,00 | 6.800,00 | 2,00 | 6,00 |

Fonte: Adaptado Macedo et al. (2004) e Poveda (2014).

Tabela 49 - Custos com logística de vinhaça depois do concentrador

| Evento | Custo |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| Custo mensal de motorista mais encargos trabalhistas e sociais sobre o salário (R\$) | R\$ 206.004,25 |
| Custo de consumo de combustível por safra - caminhão 2318(R\$) | R\$ 169.160,73 |
| Custo de depreciação por safra da frota de caminhões 2328 e Volvo rodotrem (R\$) | R\$ 42.000,00 |
| Total | R\$ 417.164,97 |

Fonte: Adaptado Macedo et al. (2004), Poveda (2014) e Silva (2015).

Tabela 50 – Economia por safra

| | |
|---------------------------|-----------------------|
| Economia por safra | R\$ 632.921,21 |
|---------------------------|-----------------------|

Fonte: Silva (2015).

Tabela 51 - Dados e custo de fertilizantes e vinhaça concentrada

| Fertilizante | kg/m³ de vinhaça | Preço (R\$/t) | Preço/m³ (R\$) |
|-------------------------------------------------------|------------------------------------|----------------------|----------------------------------|
| Ureia | 0,615 | 767,03 | 0,47 |
| Superfosfato triplo | 0,435 | 838,45 | 0,36 |
| Cloreto de potássio | 2,45 | 664,55 | 1,62 |
| Vinhaça in natura | | | 2,45 |
| Vinhaça concentrada (concentração em 10 vezes) | | | 24,50 |

Fonte: Simoes, Sena e Campos (2004).

Tabela 52 - Volume de água permeada recuperada m³

| | |
|---------------------------------------------------------|-------------------|
| Volume de água permeada recuperada m³ | 720.000,00 |
|---------------------------------------------------------|-------------------|

Fonte: Simoes, Sena e Campos (2004).

Tabela 53- Valor final de vinhaça concentrada e águas residuárias

| Produto | Preço | Quantidade | Valor final |
|-------------------------------------|--------------|-------------------|--------------------|
| Vinhaça concentrada | R\$ 24,50 | 100.000,00 | R\$ 2.450.000,00 |
| Recuperação de água | R\$ 1,00 | 720.000,00 | R\$ 720.000,00 |
| Ausência de multa (atualizado IGPM) | R\$ 1.810,00 | 1 | R\$ 1.810,00 |

Fonte: Simoes, Sena e Campos (2004).

Tabela 54 - Dados financeiros

| | |
|-----------------------------------------------------|------------|
| Vida útil (anos) | 20 |
| Preço da soda cáustica (R\$/m ³) | R\$ 170,40 |
| Preço do MWh | R\$ 251,00 |
| Taxa de desconto | 15,00% |
| Carga tributária sobre os fertilizantes (IR e CSLL) | 34% |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 55 - Fluxo de caixa do concentrador de vinhaça

| Receita | ano 1 | ano 2 | ano 3 | ano 4 | ano 5 | ano 6 | ano 7 | ano 8 | ano 9 | ano 10 | ano 11 | ano 12 | ano 13 | ano 14 | ano 15 | ano 16 | ano 17 | ano 18 | ano 19 | ano 20 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Venda de fertilizantes | R\$ 2.450.000,00 | R\$ 2.450.000,00 | R\$ 2.450.000,00 | R\$ 2.450.000,00 | R\$ 2.450.000,00 | R\$ 2.450.000,00 | R\$ 2.450.000,00 | R\$ 2.450.000,00 | R\$ 2.450.000,00 | R\$ 2.450.000,00 | R\$ 2.450.000,00 | R\$ 2.450.000,00 | R\$ 2.450.000,00 | R\$ 2.450.000,00 | R\$ 2.450.000,00 | R\$ 2.450.000,00 | R\$ 2.450.000,00 | R\$ 2.450.000,00 | R\$ 2.450.000,00 | R\$ 2.450.000,00 |
| Água recuperada | R\$ 720.000,00 | R\$ 720.000,00 | R\$ 720.000,00 | R\$ 720.000,00 | R\$ 720.000,00 | R\$ 720.000,00 | R\$ 720.000,00 | R\$ 720.000,00 | R\$ 720.000,00 | R\$ 720.000,00 | R\$ 720.000,00 | R\$ 720.000,00 | R\$ 720.000,00 | R\$ 720.000,00 | R\$ 720.000,00 | R\$ 720.000,00 | R\$ 720.000,00 | R\$ 720.000,00 | R\$ 720.000,00 | R\$ 720.000,00 |
| Economia por ausência de multa | R\$ 1.810,00 | R\$ 1.810,00 | R\$ 1.810,00 | R\$ 1.810,00 | R\$ 1.810,00 | R\$ 1.810,00 | R\$ 1.810,00 | R\$ 1.810,00 | R\$ 1.810,00 | R\$ 1.810,00 | R\$ 1.810,00 | R\$ 1.810,00 | R\$ 1.810,00 | R\$ 1.810,00 | R\$ 1.810,00 | R\$ 1.810,00 | R\$ 1.810,00 | R\$ 1.810,00 | R\$ 1.810,00 | R\$ 1.810,00 |
| Economia com transporte de vinhaça in natura | R\$ 632.921,21 | R\$ 632.921,21 | R\$ 632.921,21 | R\$ 632.921,21 | R\$ 632.921,21 | R\$ 632.921,21 | R\$ 632.921,21 | R\$ 632.921,21 | R\$ 632.921,21 | R\$ 632.921,21 | R\$ 632.921,21 | R\$ 632.921,21 | R\$ 632.921,21 | R\$ 632.921,21 | R\$ 632.921,21 | R\$ 632.921,21 | R\$ 632.921,21 | R\$ 632.921,21 | R\$ 632.921,21 | R\$ 632.921,21 |
| Receita total | R\$ 3.804.731,21 | R\$ 3.804.731,21 | R\$ 3.804.731,21 | R\$ 3.804.731,21 | R\$ 3.804.731,21 | R\$ 3.804.731,21 | R\$ 3.804.731,21 | R\$ 3.804.731,21 | R\$ 3.804.731,21 | R\$ 3.804.731,21 | R\$ 3.804.731,21 | R\$ 3.804.731,21 | R\$ 3.804.731,21 | R\$ 3.804.731,21 | R\$ 3.804.731,21 | R\$ 3.804.731,21 | R\$ 3.804.731,21 | R\$ 3.804.731,21 | R\$ 3.804.731,21 | R\$ 3.804.731,21 |
| Despesa | ano 1 | ano 2 | ano 3 | ano 4 | ano 5 | ano 6 | ano 7 | ano 8 | ano 9 | ano 10 | ano 11 | ano 12 | ano 13 | ano 14 | ano 15 | ano 16 | ano 17 | ano 18 | ano 19 | ano 20 |
| Eletricidade | R\$ 354.211,20 | R\$ 354.211,20 | R\$ 354.211,20 | R\$ 354.211,20 | R\$ 354.211,20 | R\$ 354.211,20 | R\$ 354.211,20 | R\$ 354.211,20 | R\$ 354.211,20 | R\$ 354.211,20 | R\$ 354.211,20 | R\$ 354.211,20 | R\$ 354.211,20 | R\$ 354.211,20 | R\$ 354.211,20 | R\$ 354.211,20 | R\$ 354.211,20 | R\$ 354.211,20 | R\$ 354.211,20 | R\$ 354.211,20 |
| Soda Cáustica | R\$ 265.824,00 | R\$ 265.824,00 | R\$ 265.824,00 | R\$ 265.824,00 | R\$ 265.824,00 | R\$ 265.824,00 | R\$ 265.824,00 | R\$ 265.824,00 | R\$ 265.824,00 | R\$ 265.824,00 | R\$ 265.824,00 | R\$ 265.824,00 | R\$ 265.824,00 | R\$ 265.824,00 | R\$ 265.824,00 | R\$ 265.824,00 | R\$ 265.824,00 | R\$ 265.824,00 | R\$ 265.824,00 | R\$ 265.824,00 |
| Manutenção | R\$ 200.000,00 | R\$ 200.000,00 | R\$ 200.000,00 | R\$ 200.000,00 | R\$ 200.000,00 | R\$ 200.000,00 | R\$ 200.000,00 | R\$ 200.000,00 | R\$ 200.000,00 | R\$ 200.000,00 | R\$ 200.000,00 | R\$ 200.000,00 | R\$ 200.000,00 | R\$ 200.000,00 | R\$ 200.000,00 | R\$ 200.000,00 | R\$ 200.000,00 | R\$ 200.000,00 | R\$ 200.000,00 | R\$ 200.000,00 |
| Impostos sobre venda (isento/SP), renda (25%) e contribuições sociais (9%) sobre a venda de fertilizantes | R\$ 833.000,00 | R\$ 1.004.500,00 | R\$ 1.004.500,00 | R\$ 1.004.500,00 | R\$ 1.004.500,00 | R\$ 1.004.500,00 | R\$ 1.004.500,00 | R\$ 1.004.500,00 | R\$ 1.004.500,00 | R\$ 1.004.500,00 | R\$ 1.004.500,00 | R\$ 1.004.500,00 | R\$ 1.004.500,00 | R\$ 1.004.500,00 | R\$ 1.004.500,00 | R\$ 1.004.500,00 | R\$ 1.004.500,00 | R\$ 1.004.500,00 | R\$ 1.004.500,00 | R\$ 1.004.500,00 |
| Total de despesa | R\$ 1.653.035,20 | R\$ 1.824.535,20 | R\$ 1.824.535,20 | R\$ 1.824.535,20 | R\$ 1.824.535,20 | R\$ 1.824.535,20 | R\$ 1.824.535,20 | R\$ 1.824.535,20 | R\$ 1.824.535,20 | R\$ 1.824.535,20 | R\$ 1.824.535,20 | R\$ 1.824.535,20 | R\$ 1.824.535,20 | R\$ 1.824.535,20 | R\$ 1.824.535,20 | R\$ 1.824.535,20 | R\$ 1.824.535,20 | R\$ 1.824.535,20 | R\$ 1.824.535,20 | R\$ 1.824.535,20 |
| Fluxo Líquido | R\$ 2.151.696,01 | R\$ 1.980.196,01 | R\$ 1.980.196,01 | R\$ 1.980.196,01 | R\$ 1.980.196,01 | R\$ 1.980.196,01 | R\$ 1.980.196,01 | R\$ 1.980.196,01 | R\$ 1.980.196,01 | R\$ 1.980.196,01 | R\$ 1.980.196,01 | R\$ 1.980.196,01 | R\$ 1.980.196,01 | R\$ 1.980.196,01 | R\$ 1.980.196,01 | R\$ 1.980.196,01 | R\$ 1.980.196,01 | R\$ 1.980.196,01 | R\$ 1.980.196,01 | R\$ 1.980.196,01 |

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Simões, Sena e Campos (2004), Macedo et al. (2004), Poveda (2014), Moares et al. (2014) e Silva (2015).

Tabela 56 - Fluxo de caixa e saldo simples e descontado

| Ano | Fluxo | Saldo | Fluxo descontado | Saldo descontado |
|-----|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 0 | -R\$ 20.000.000,00 | -R\$ 20.000.000,00 | -R\$ 20.000.000,00 | -R\$ 20.000.000,00 |
| 1 | R\$ 2.151.696,01 | -R\$ 17.848.303,99 | R\$ 1.871.040,01 | -R\$ 18.128.959,99 |
| 2 | R\$ 2.151.696,01 | -R\$ 15.696.607,97 | R\$ 1.626.991,31 | -R\$ 16.501.968,68 |
| 3 | R\$ 2.151.696,01 | -R\$ 13.544.911,96 | R\$ 1.414.775,06 | -R\$ 15.087.193,62 |
| 4 | R\$ 2.151.696,01 | -R\$ 11.393.215,95 | R\$ 1.230.239,18 | -R\$ 13.856.954,44 |
| 5 | R\$ 2.151.696,01 | -R\$ 9.241.519,94 | R\$ 1.069.773,20 | -R\$ 12.787.181,24 |
| 6 | R\$ 2.151.696,01 | -R\$ 7.089.823,92 | R\$ 930.237,56 | -R\$ 11.856.943,68 |
| 7 | R\$ 2.151.696,01 | -R\$ 4.938.127,91 | R\$ 808.902,23 | -R\$ 11.048.041,45 |
| 8 | R\$ 2.151.696,01 | -R\$ 2.786.431,90 | R\$ 703.393,24 | -R\$ 10.344.648,21 |
| 9 | R\$ 2.151.696,01 | -R\$ 634.735,89 | R\$ 611.646,30 | -R\$ 9.733.001,91 |
| 10 | R\$ 2.151.696,01 | R\$ 1.516.960,13 | R\$ 531.866,35 | -R\$ 9.201.135,56 |
| 11 | R\$ 2.151.696,01 | R\$ 3.668.656,14 | R\$ 462.492,48 | -R\$ 8.738.643,08 |
| 12 | R\$ 2.151.696,01 | R\$ 5.820.352,15 | R\$ 402.167,37 | -R\$ 8.336.475,72 |
| 13 | R\$ 2.151.696,01 | R\$ 7.972.048,16 | R\$ 349.710,76 | -R\$ 7.986.764,96 |
| 14 | R\$ 2.151.696,01 | R\$ 10.123.744,18 | R\$ 304.096,31 | -R\$ 7.682.668,65 |
| 15 | R\$ 2.151.696,01 | R\$ 12.275.440,19 | R\$ 264.431,57 | -R\$ 7.418.237,08 |
| 16 | R\$ 2.151.696,01 | R\$ 14.427.136,20 | R\$ 229.940,50 | -R\$ 7.188.296,58 |
| 17 | R\$ 2.151.696,01 | R\$ 16.578.832,21 | R\$ 199.948,26 | -R\$ 6.988.348,32 |
| 18 | R\$ 2.151.696,01 | R\$ 18.730.528,23 | R\$ 173.868,05 | -R\$ 6.814.480,26 |
| 19 | R\$ 2.151.696,01 | R\$ 20.882.224,24 | R\$ 151.189,61 | -R\$ 6.663.290,65 |
| 20 | R\$ 2.151.696,01 | R\$ 23.033.920,25 | R\$ 131.469,23 | -R\$ 6.531.821,43 |

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Simões, Sena e Campos (2004), Macedo et al. (2004), Poveda (2014), Moares et al. (2014) e Silva (2015).

Tabela 57 - Resultados financeiros

| | |
|--------------------|-------------------|
| VPL | -R\$ 6.531.821,43 |
| TIR | 9% |
| Payback | 9,29 |
| Payback descontado | ND |

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Simões, Sena e Campos (2004), Macedo et al. (2004), Poveda (2014), Moares et al. (2014) e Silva (2015).

Análise Energética do concentrado de vinhaça

Tabela 58 - Consumo de Diesel anual com transporte de vinhaça concentrada (m³/ano)

| | |
|----------------------------------------------------------------------|-------|
| Consumo de Diesel anual de vinhaça concentrada (m ³ /ano) | 43,25 |
|----------------------------------------------------------------------|-------|

Fonte: Poveda (2014).

Tabela 59 - Energia proveniente consumida do Diesel por ano (TJ/ano)

| | |
|-----------------------------------------------------|-------------|
| Consumo de Diesel anual (m ³ /ano) | 43,25 |
| Poder calorífico inferior do Diesel (kJ/litro) | 36.031,00 |
| Energia consumida do Diesel por ano (TJ/ano) | 1,56 |

Fonte: Poveda (2014).

Tabela 60 - Consumo de eletricidade do concentrador (MWh/ano)

| | |
|---------------------------------------------------|----------|
| Consumo de eletricidade do concentrador (MWh/ano) | 1.411,20 |
|---------------------------------------------------|----------|

Fonte: Poveda (2014).

Análise Ambiental do concentrador de vinhaça

Tabela 61 - Equivalente populacional após a concentração de vinhaça (habitantes)

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| DQO de águas de esgoto (kg/m ³) | 0,43 |
| Média de consumo de água por habitante (litros/habitante) | 225,00 |
| Contribuição per capita de esgoto | 0,80 |
| Fluxo de vinhaça pós concentração (litros/dia) | 5.000.000,00 |
| DQO de vinhaça (kg/m ³) | 21,00 |
| Equivalente Populacional após a concentração de vinhaça (habitantes) | 1.356.589,15 |

Fonte: Moraes et al. (2014).

Tabela 62 - Emissão de NO_x pelo concentrador (t/ano)

| | |
|-------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Consumo de eletricidade pelo concentrador (MWh/ano) | 1.411,20 |
| Fator de emissão de NO _x por consumo de eletricidade (g/MWh) | 89,29 |
| Emissão de NO_x pelo concentrador (t/ano) | 0,13 |

Fonte: Poveda (2014).

Tabela 63 - Emissão de SO_x pelo concentrador (t/ano)

| | |
|-------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Consumo de eletricidade pelo concentrador (MWh/ano) | 1.411,20 |
| Fator de emissão de SO _x por consumo de eletricidade (g/MWh) | 383,17 |
| Emissão de SO_x pelo concentrador (t/ano) | 0,54 |

Fonte: Poveda (2014).

Tabela 64 - Emissão de CO₂ eq pelo concentrador (t/ano)

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| Consumo de eletricidade pelo concentrador (MWh/ano) | 1.411,20 |
| Fator de emissão de CO ₂ eq por consumo de eletricidade (tCO ₂ eq/MWh) | 0,082 |
| Emissão de CO₂ eq pelo concentrador (t/ano) | 115,72 |

Fonte: Poveda (2014).

Tabela 65 - Emissão de NO_x no transporte de vinhaça concentrada com Diesel S500 (t/ano)

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Kilometragem total percorrida pela frota de caminhões 2318 no ano (km) | 95.200,00 |
| Fator de emissão de NO _x por kilometro percorrido (g/km) | 5,23 |
| Emissão de NO_x no transporte de vinhaça concentrada (t/ano) | 0,50 |

Fonte: Poveda (2014).

Tabela 66 - Emissão de SO_x no transporte de vinhaça concentrada com Diesel S500 (t/ano)

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Consumo total de Diesel pela frota de caminhões 2318 anual (m ³) | 43,25 |
| Densidade do Diesel (kg/m ³) | 840,00 |
| Quantidade SO _x por massa de Diesel (t/kg de Diesel) | 0,00 |
| Emissão de SO_x no transporte de vinhaça concentrada com Diesel S500 (t/ano) | 0,02 |

Fonte: Poveda (2014).

Tabela 67 - Emissão de CO₂ eq no transporte de vinhaça concentrada com Diesel S500 (t/ano)

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| Consumo total de Diesel pela frota de caminhões 2318 anual (m ³) | 43,25 |
| Densidade do Diesel (kg/m ³) | 840,00 |
| Quantidade CO ₂ eq por massa de Diesel (t/kg de Diesel) | 0,00 |
| Emissão de CO₂ eq no transporte de vinhaça concentrada com Diesel S500 (t/ano) | 126,79 |

Fonte: Poveda (2014).

Resumo dos resultados energéticos do concentrador

Tabela 68 – Resumo dos resultados energéticos para o concentrador de vinhaça

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Consumo de Diesel anual com o transporte de vinhaça concentrada (m ³ /ano) | 43,25 |
| Balanco de energia consumida pelo Diesel por ano (TJ/ano) | -1,56 |
| Balanco de geração e consumo de eletricidade (MWh/ano) | -1.411,20 |
| Equivalente populacional de geração de eletricidade de vinhaça biodigerida (habitantes) | 0,00 |

Fonte: Adaptado de Moraes et al. (2014) e Poveda (2014).

Resumo dos resultados ambientais do concentrador

Tabela 69 - Resumo dos resultados ambientais para o concentrador de vinhaça

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Equivalente Populacional após a concentração de vinhaça (habitantes) | 1.356.589,15 |
| Balanco de emissão e mitigação de NO _x pelo concentrador e transporte de vinhaça concentrada com Diesel S 500 (t/ano) | 0,62 |
| Balanco de emissão e mitigação de SO _x pelo concentrador e transporte de vinhaça concentrada com Diesel S 500 (t/ano) | 0,56 |
| Balanco de emissão e mitigação de CO ₂ eq pelo concentrador e transporte de vinhaça concentrada com Diesel S 500 (t/ano) | 242,50 |

Fonte: Adaptado de Moraes et al. (2014) e Poveda (2014).

Biodigestor

Análise Econômica do biodigestor

Tabela 70 - Valor de investimento no biodigestor e motogerador

| Materiais | Preço Unitário | Unidade | Preço total |
|------------------------------------|-----------------------|----------------|--------------------------|
| Biodigestor IC e dessulfurificador | R\$85/(kgDQO/dia) | 105.000,00 | R\$ 8.925.000,00 |
| Motogerador | R\$ 1700/Kw | 2.226,79 | R\$ 3.785.548,78 |
| Total de investimento | | | R\$ 12.710.548,78 |

Fonte: Procknor (2008), Moraes et al. (2014) e Poveda (2014).

Tabela 71 - Valor de operação e manutenção anual de biodigestor e motogerador

| Materiais | Preço unitário | Unidade | Preço total |
|---------------------------------------------|-----------------------|----------------|-----------------------|
| Biodigestor e dessulfurificador | R\$ 0,016/kg DQO | 21.000.000,00 | R\$ 336.000,00 |
| Motogerador | R\$ 40/MWh | 10.688,61 | R\$ 427.544,33 |
| Total anual de operação e manutenção | | | R\$ 763.544,33 |

Fonte: Procknor (2008), Moraes et al. (2014) e Poveda (2014).

Tabela 72 - Economia por ausência de multa

| | |
|--------------------------------|--------------|
| Economia por ausencia de multa | R\$ 1.810,00 |
|--------------------------------|--------------|

Fonte: Simoes, Sena e Campos (2004).

Tabela 73 - Dados e custo de fertilizantes e vinhaça biodigerida

| Fertilizante | kg/m³ de vinhaça | Preço (R\$)/t | Preço/m³ (R\$) |
|----------------------------|------------------------------------|----------------------|----------------------------------|
| Ureia | 0,615 | 767,03 | 0,47 |
| Superfosfato triplo | 0,435 | 838,45 | 0,36 |
| Cloreto de potássio | 2,45 | 664,55 | 1,62 |
| Vinhaça biodigerida | | | 2,45 |

Fonte: Simoes, Sena e Campos (2004).

Tabela 74 - Resumo dos dados financeiros

| | |
|--------------------------------------------------------|------------|
| Vida útil (anos) | 20 |
| Preço do MWh | R\$ 251,00 |
| Preço da tCO ₂ eq | R\$ 17,38 |
| Impostos sobre venda de eletricidade (ICMS, IR e CSLL) | 40% |
| Taxa de desconto | 15,00% |

Fonte: UNICA (2014), Investing (2017) e Nogueira et al. (2015).

Tabela 75 - Fluxo de caixa do biodigestor de vinhaça

| Receita | ano 1 | ano 2 | ano 3 | ano 4 | ano 5 | ano 6 | ano 7 | ano 8 | ano 9 | ano 10 | ano 11 | ano 12 | ano 13 | ano 14 | ano 15 | ano 16 | ano 17 | ano 18 | ano 19 | ano 20 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Venda de fertilizantes | R\$ 2.450.000,00 | R\$ 2.450.000,00 | R\$ 2.450.000,00 | R\$ 2.450.000,00 | R\$ 2.450.000,00 | R\$ 2.450.000,00 | R\$ 2.450.000,00 | R\$ 2.450.000,00 | R\$ 2.450.000,00 | R\$ 2.450.000,00 | R\$ 2.450.000,00 | R\$ 2.450.000,00 | R\$ 2.450.000,00 | R\$ 2.450.000,00 | R\$ 2.450.000,00 | R\$ 2.450.000,00 | R\$ 2.450.000,00 | R\$ 2.450.000,00 | R\$ 2.450.000,00 | R\$ 2.450.000,00 |
| Água recuperada | R\$ 720.000,00 | R\$ 720.000,00 | R\$ 720.000,00 | R\$ 720.000,00 | R\$ 720.000,00 | R\$ 720.000,00 | R\$ 720.000,00 | R\$ 720.000,00 | R\$ 720.000,00 | R\$ 720.000,00 | R\$ 720.000,00 | R\$ 720.000,00 | R\$ 720.000,00 | R\$ 720.000,00 | R\$ 720.000,00 | R\$ 720.000,00 | R\$ 720.000,00 | R\$ 720.000,00 | R\$ 720.000,00 | R\$ 720.000,00 |
| Economia por ausência de multa | R\$ 1.810,00 | R\$ 1.810,00 | R\$ 1.810,00 | R\$ 1.810,00 | R\$ 1.810,00 | R\$ 1.810,00 | R\$ 1.810,00 | R\$ 1.810,00 | R\$ 1.810,00 | R\$ 1.810,00 | R\$ 1.810,00 | R\$ 1.810,00 | R\$ 1.810,00 | R\$ 1.810,00 | R\$ 1.810,00 | R\$ 1.810,00 | R\$ 1.810,00 | R\$ 1.810,00 | R\$ 1.810,00 | R\$ 1.810,00 |
| Economia com transporte de vinhaça in natura | R\$ 632.921,21 | R\$ 632.921,21 | R\$ 632.921,21 | R\$ 632.921,21 | R\$ 632.921,21 | R\$ 632.921,21 | R\$ 632.921,21 | R\$ 632.921,21 | R\$ 632.921,21 | R\$ 632.921,21 | R\$ 632.921,21 | R\$ 632.921,21 | R\$ 632.921,21 | R\$ 632.921,21 | R\$ 632.921,21 | R\$ 632.921,21 | R\$ 632.921,21 | R\$ 632.921,21 | R\$ 632.921,21 | R\$ 632.921,21 |
| Receita total | R\$ 3.804.731,21 | R\$ 3.804.731,21 | R\$ 3.804.731,21 | R\$ 3.804.731,21 | R\$ 3.804.731,21 | R\$ 3.804.731,21 | R\$ 3.804.731,21 | R\$ 3.804.731,21 | R\$ 3.804.731,21 | R\$ 3.804.731,21 | R\$ 3.804.731,21 | R\$ 3.804.731,21 | R\$ 3.804.731,21 | R\$ 3.804.731,21 | R\$ 3.804.731,21 | R\$ 3.804.731,21 | R\$ 3.804.731,21 | R\$ 3.804.731,21 | R\$ 3.804.731,21 | R\$ 3.804.731,21 |
| Despesa | ano 1 | ano 2 | ano 3 | ano 4 | ano 5 | ano 6 | ano 7 | ano 8 | ano 9 | ano 10 | ano 11 | ano 12 | ano 13 | ano 14 | ano 15 | ano 16 | ano 17 | ano 18 | ano 19 | ano 20 |
| Eletricidade | R\$ 354.211,20 | R\$ 354.211,20 | R\$ 354.211,20 | R\$ 354.211,20 | R\$ 354.211,20 | R\$ 354.211,20 | R\$ 354.211,20 | R\$ 354.211,20 | R\$ 354.211,20 | R\$ 354.211,20 | R\$ 354.211,20 | R\$ 354.211,20 | R\$ 354.211,20 | R\$ 354.211,20 | R\$ 354.211,20 | R\$ 354.211,20 | R\$ 354.211,20 | R\$ 354.211,20 | R\$ 354.211,20 | R\$ 354.211,20 |
| Soda Cáustica | R\$ 265.824,00 | R\$ 265.824,00 | R\$ 265.824,00 | R\$ 265.824,00 | R\$ 265.824,00 | R\$ 265.824,00 | R\$ 265.824,00 | R\$ 265.824,00 | R\$ 265.824,00 | R\$ 265.824,00 | R\$ 265.824,00 | R\$ 265.824,00 | R\$ 265.824,00 | R\$ 265.824,00 | R\$ 265.824,00 | R\$ 265.824,00 | R\$ 265.824,00 | R\$ 265.824,00 | R\$ 265.824,00 | R\$ 265.824,00 |
| Manutenção | R\$ 200.000,00 | R\$ 200.000,00 | R\$ 200.000,00 | R\$ 200.000,00 | R\$ 200.000,00 | R\$ 200.000,00 | R\$ 200.000,00 | R\$ 200.000,00 | R\$ 200.000,00 | R\$ 200.000,00 | R\$ 200.000,00 | R\$ 200.000,00 | R\$ 200.000,00 | R\$ 200.000,00 | R\$ 200.000,00 | R\$ 200.000,00 | R\$ 200.000,00 | R\$ 200.000,00 | R\$ 200.000,00 | R\$ 200.000,00 |
| Impostos sobre venda (isento/SP), renda (25%) e contribuições sociais (9%) sobre a venda de fertilizantes | R\$ 833.000,00 | R\$ 1.004.500,00 | R\$ 1.004.500,00 | R\$ 1.004.500,00 | R\$ 1.004.500,00 | R\$ 1.004.500,00 | R\$ 1.004.500,00 | R\$ 1.004.500,00 | R\$ 1.004.500,00 | R\$ 1.004.500,00 | R\$ 1.004.500,00 | R\$ 1.004.500,00 | R\$ 1.004.500,00 | R\$ 1.004.500,00 | R\$ 1.004.500,00 | R\$ 1.004.500,00 | R\$ 1.004.500,00 | R\$ 1.004.500,00 | R\$ 1.004.500,00 | R\$ 1.004.500,00 |
| Total de despesa | R\$ 1.653.035,20 | R\$ 1.824.535,20 | R\$ 1.824.535,20 | R\$ 1.824.535,20 | R\$ 1.824.535,20 | R\$ 1.824.535,20 | R\$ 1.824.535,20 | R\$ 1.824.535,20 | R\$ 1.824.535,20 | R\$ 1.824.535,20 | R\$ 1.824.535,20 | R\$ 1.824.535,20 | R\$ 1.824.535,20 | R\$ 1.824.535,20 | R\$ 1.824.535,20 | R\$ 1.824.535,20 | R\$ 1.824.535,20 | R\$ 1.824.535,20 | R\$ 1.824.535,20 | R\$ 1.824.535,20 |
| Fluxo Líquido | R\$ 2.151.696,01 | R\$ 1.980.196,01 | R\$ 1.980.196,01 | R\$ 1.980.196,01 | R\$ 1.980.196,01 | R\$ 1.980.196,01 | R\$ 1.980.196,01 | R\$ 1.980.196,01 | R\$ 1.980.196,01 | R\$ 1.980.196,01 | R\$ 1.980.196,01 | R\$ 1.980.196,01 | R\$ 1.980.196,01 | R\$ 1.980.196,01 | R\$ 1.980.196,01 | R\$ 1.980.196,01 | R\$ 1.980.196,01 | R\$ 1.980.196,01 | R\$ 1.980.196,01 | R\$ 1.980.196,01 |

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Simões, Sena e Campos (2004), Macedo et al. (2004), Poveda (2014), Moares et al. (2014) e Silva (2015).

Tabela 76 - Fluxo e saldo simples e descontado

| Ano | Fluxo | Saldo | Fluxo descontado | Saldo descontado |
|-----|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 0 | -R\$ 20.000.000,00 | -R\$ 20.000.000,00 | -R\$ 20.000.000,00 | -R\$ 20.000.000,00 |
| 1 | R\$ 2.151.696,01 | -R\$ 17.848.303,99 | R\$ 1.871.040,01 | -R\$ 18.128.959,99 |
| 2 | R\$ 2.151.696,01 | -R\$ 15.696.607,97 | R\$ 1.626.991,31 | -R\$ 16.501.968,68 |
| 3 | R\$ 2.151.696,01 | -R\$ 13.544.911,96 | R\$ 1.414.775,06 | -R\$ 15.087.193,62 |
| 4 | R\$ 2.151.696,01 | -R\$ 11.393.215,95 | R\$ 1.230.239,18 | -R\$ 13.856.954,44 |
| 5 | R\$ 2.151.696,01 | -R\$ 9.241.519,94 | R\$ 1.069.773,20 | -R\$ 12.787.181,24 |
| 6 | R\$ 2.151.696,01 | -R\$ 7.089.823,92 | R\$ 930.237,56 | -R\$ 11.856.943,68 |
| 7 | R\$ 2.151.696,01 | -R\$ 4.938.127,91 | R\$ 808.902,23 | -R\$ 11.048.041,45 |
| 8 | R\$ 2.151.696,01 | -R\$ 2.786.431,90 | R\$ 703.393,24 | -R\$ 10.344.648,21 |
| 9 | R\$ 2.151.696,01 | -R\$ 634.735,89 | R\$ 611.646,30 | -R\$ 9.733.001,91 |
| 10 | R\$ 2.151.696,01 | R\$ 1.516.960,13 | R\$ 531.866,35 | -R\$ 9.201.135,56 |
| 11 | R\$ 2.151.696,01 | R\$ 3.668.656,14 | R\$ 462.492,48 | -R\$ 8.738.643,08 |
| 12 | R\$ 2.151.696,01 | R\$ 5.820.352,15 | R\$ 402.167,37 | -R\$ 8.336.475,72 |
| 13 | R\$ 2.151.696,01 | R\$ 7.972.048,16 | R\$ 349.710,76 | -R\$ 7.986.764,96 |
| 14 | R\$ 2.151.696,01 | R\$ 10.123.744,18 | R\$ 304.096,31 | -R\$ 7.682.668,65 |
| 15 | R\$ 2.151.696,01 | R\$ 12.275.440,19 | R\$ 264.431,57 | -R\$ 7.418.237,08 |
| 16 | R\$ 2.151.696,01 | R\$ 14.427.136,20 | R\$ 229.940,50 | -R\$ 7.188.296,58 |
| 17 | R\$ 2.151.696,01 | R\$ 16.578.832,21 | R\$ 199.948,26 | -R\$ 6.988.348,32 |
| 18 | R\$ 2.151.696,01 | R\$ 18.730.528,23 | R\$ 173.868,05 | -R\$ 6.814.480,26 |
| 19 | R\$ 2.151.696,01 | R\$ 20.882.224,24 | R\$ 151.189,61 | -R\$ 6.663.290,65 |
| 20 | R\$ 2.151.696,01 | R\$ 23.033.920,25 | R\$ 131.469,23 | -R\$ 6.531.821,43 |

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Simões, Sena e Campos (2004), Macedo et al. (2004), Poveda (2014), Moares et al. (2014) e Silva (2015).

Tabela 77 - Resultados financeiros

| | |
|--------------------|-------------------|
| VPL | -R\$ 6.531.821,43 |
| TIR | 9% |
| Payback | 5,79 |
| Payback descontado | 14,52 |

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Simões, Sena e Campos (2004), Macedo et al. (2004), Poveda (2014), Moares et al. (2014) e Silva (2015).

*Análise energética***Tabela 78 - Consumo de Diesel anual com transporte de vinhaça bio digerida**

| | |
|----------------------------------------------------------------------|--------|
| Consumo de Diesel anual de vinhaça biodigerida (m ³ /ano) | 222,13 |
|----------------------------------------------------------------------|--------|

Fonte: Poveda (2014).

Tabela 79 - Energia proveniente consumida do Diesel por ano

| | |
|-----------------------------------------------------|-------------|
| Consumo de Diesel anual (m ³ /ano) | 222,13 |
| Poder calorífico inferior do Diesel (kJ/litro) | 36.031,00 |
| Energia consumida do Diesel por ano (TJ/ano) | 8,00 |

Poveda (2014).

Tabela 80 - Consumo anual de eletricidade na biodigestão (MWh)

| | |
|-----------------------------------------------------------|-----------------|
| Potência elétrica do biodigestor (kW) | 400,00 |
| Dias de safra (horas/ano) | 4.800,00 |
| Consumo anual de eletricidade na biodigestão (MWh) | 1.920,00 |

Fonte: Procknor (2008), Moraes et al. (2014) e Poveda (2014).

Tabela 81 - Volume de biogás produzido (m³/ano)

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| Volume de vinhaça produzida por ano (m ³)/ano | 1.000.000,00 |
| Volume de biogás produzido por m ³ de vinhaça (Nm ³ /m ³) | 6,00 |
| Volume de biogás/ano (m³/ano) | 6.000.000,00 |

Fonte: Poveda (2014).

Tabela 82 - Energia térmica produzida pelo biogás (TJ/ano)

| | |
|---------------------------------------------------------|---------------|
| Volume de biogás produzido m ³ /ano | 6.000.000,00 |
| Porcentagem de volume de biogás vazado | 0,05 |
| PCI do biogás kJ/Nm ³ | 17.765,00 |
| Energia térmica produzida pelo biogás ano TJ/ano | 101,26 |

Fonte: Poveda (2014)

Tabela 83 - Energia elétrica exportada (MWh/ano)

| | |
|-----------------------------------------------------|-----------------|
| Energia termica produzida pelo biogás (MWh) | 28.127,94 |
| Rendimento termoelétrico do motor | 0,38 |
| Consumo anual de eletricidade na biodigestão (MWh) | 1.920,00 |
| Energia elétrica exportada por ano (MWh/ano) | 8.768,62 |

Fonte: Poveda (2014).

Tabela 84 - Potência elétrica de geração instalada (MW)

| | |
|----------------------------------------------------|-------------|
| Energia térmica produzida com biogás ano MW/ano | 28.127,92 |
| Rendimento termoelétrico do motor (%) | 0,38 |
| Duração da safra (horas) | 4.800,00 |
| Potência elétrica de geração instalada (MW) | 2,23 |

Fonte: Procknor (2008), Moraes et al. (2014) e Poveda (2014).

Tabela 85 - Equivalente populacional de geração de eletricidade de vinhaça biodigerida (habitante)

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|
| Energia elétrica exportada por ano (MWh/ano) | 8.768,62 |
| Consumo de eletricidade residencial per capita anual no Brasil (MWh/ano) | 0,46 |
| Equivalente populacional de geração de eletricidade de vinhaça biodigerida (habitantes) | 19.229,42 |

Fonte: Moraes et al. (2014)

*Análise Ambiental***Tabela 86 - Equivalente populacional de vinhaça biodigerida (habitantes)**

| | |
|---------------------------------------------------------------------|-------------------|
| DQO de águas de esgoto (kg/m ³) | 0,43 |
| Média de consumo de água por habitante (litros/habitante) | 225,00 |
| Contribuição per capita de esgoto | 0,80 |
| Fluxo de vinhaça (litros/dia) | 5.000.000,00 |
| DQO de vinhaça biodigerida (kg/m ³) | 4,20 |
| Equivalente Populacional de vinhaça biodigerida (habitantes) | 271.317,83 |

Fonte: Moraes et al. (2014).

Tabela 87 - Emissão de NO_x por ano no motogerador de biogás (t/ano)

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Energia térmica produzido pelo biogás por ano (TJ/ano) | 101,26 |
| Fator de emissão NO _x do motogerador de biogás (kg NO _x /TJ) | 232,16 |
| Emissão de NO_x por ano no motogerador de biogás (tNO_x/ano) | 23,51 |

Fonte: Poveda (2014).

Tabela 88 - Emissão de SO_x por ano no motogerador de biogás (t/ano)

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Volume de biogás produzido por ano (m ³ /ano) | 6.000.000,00 |
| Porcentagem de volume de biogás vazado | 0,05 |
| Concentrador de H ₂ S no biogás (mg/m ³) | 113 |
| Massa molecular do H ₂ S (g/M) | 34,08 |
| Massa molecular do SO ₂ (g/M) | 64,06 |
| Emissão de SO_x por ano no motogerador de biogás (tSO₂/ano) | 1,21 |

Fonte: Poveda (2014).

Tabela 89 - Emissão de NO_x no transporte de vinhaça biodigerida com Diesel S500

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Kilometragem total percorrida pela frota de caminhões 2318 no ano (km) | 47.600,00 |
| Kilometragem total percorrida pela frota de rodotrens Volvo no ano (km) | 96.000,00 |
| Potência total consumida pelo motor MB OM 352 160 CV e Bomba EQ 9048 140M3/h (kWh) | 608.571,43 |
| Fator de emissão de NO _x por kilometro percorrido pelos caminhões 2318 (g/km) | 5,23 |
| Fator de emissão de NO _x por kilometro percorrido pelos rodotrens Volvo (g/km) | 5,14 |
| Fator de emissão de NO _x por kWh do motor MB OM 352 160 CV e bomba EQ 9048 140 m3/h (g/kWh) | 4,72 |
| Emissão de NO_x no transporte de vinhaça biodigerida com Diesel S500 (t/ano) | 3,61 |

Fonte: Poveda (2014).

Tabela 90 - Emissão de SO_x no transporte de vinhaça biodigerida para Diesel S500

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Consumo total de Diesel consumido pela frota de caminhões 2318, rodotrens Volvo e motores MB OM 352 160 CV e bombas EQ 9048 140 m ³ /h (m ³) | 222,13 |
| Densidade do Diesel (kg/m ³) | 840,00 |
| Quantidade SO _x por massa de Diesel (t/kg de Diesel) | 0,00 |
| Emissão de SO_x no transporte de vinhaça biodigerida com Diesel S500 (t/ano) | 0,09 |

Fonte: Poveda (2014).

Tabela 91 - Emissão de CO₂ eq no transporte de vinhaça biodigerida com Diesel S500

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| Consumo total de Diesel consumido pela frota de caminhões 2318, rodotrens Volvo e motores MB OM 352 160 CV e bombas EQ 9048 140 m ³ /h (m ³) | 222,13 |
| Densidade do Diesel (kg/m ³) | 840,00 |
| Quantidade CO ₂ eq por massa de Diesel (t/kg de Diesel) | 0,00 |
| Emissão de CO₂ eq no transporte de vinhaça biodigerida com Diesel S500 (t/ano) | 651,20 |

Fonte: Poveda (2014).

Tabela 92 - Emissão de NO_x evitada a partir do uso de vinhaça para geração de eletricidade (t/ano)

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| Geração de eletricidade (MWh/ano) | 10.688,62 |
| Fator de NO _x evitado a partir da geração de eletricidade (g/MWh) | 89,29 |
| Emissão de NO_x evitada a partir do uso de vinhaça para geração de eletricidade (tNO_x/ano) | 0,95 |
| Emissão de NO_x evitada a partir do uso de vinhaça para geração de eletricidade equivalente em CO₂ (tCO_{2eq}/ano) | 282,50 |

Fonte: Poveda (2014).

Tabela 93 - Emissão de SO_x evitada a partir do uso de vinhaça para geração de eletricidade (t/ano)

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Geração de eletricidade (MWh/ano) | 10.688,62 |
| Fator de SO _x evitado a partir do uso de vinhaça para geração de eletricidade (g/MWh) | 383,17 |
| Emissão de SO_x evitada a partir do uso de vinhaça para geração de eletricidade (t SO_x /ano) | 4,10 |

Fonte: Poveda (2014).

Tabela 94 - Emissão de CO_{2eq} evitada a partir do uso de vinhaça para geração de eletricidade (t/ano)

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| Geração de eletricidade (MWh/ano) | 10.688,62 |
| Fator de CO _{2eq} evitado a partir do uso de vinhaça para geração de eletricidade (tCO _{2eq} /MWh) | 0,08 |
| Emissão de CO₂ evitada a partir do uso de vinhaça para geração de eletricidade (tCO_{2eq}) | 876,47 |

Fonte: Poveda (2014).

Resumo dos resultados energéticos do biodigestor

Tabela 95 – Resumo dos resultados energéticos para o biodigestor

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Consumo de Diesel anual com transporte de de vinhaça biodigerida (m ³ /ano) | 222,13 |
| Balanco de energia gerada pelo biogás e consumida pelo Diesel por ano (TJ/ano) | 93,26 |
| Balanco de geração e consumo de eletricidade (MWh/ano) | 8.768,62 |
| Equivalente populacional de geração de eletricidade de vinhaça biodigerida (habitantes) | 19.229,42 |

Fonte: Adaptado de Procknor (2008), Moraes et al. (2014) e Poveda (2014).

Resumo dos resultados ambientais do biodigestor

Tabela 96 – Resumo dos resultados ambientais para o biodigestor

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| Equivalente Populacional de vinhaça biodigerida (habitantes) | 271.317,83 |
| Balanco de emissão e mitigação de NOx pelo motogerador, transporte de vinhaça biodigerida com Diesel S500 e geração de eletricidade a partir de vinhaça (t/ano) | 26,17 |
| Balanco de emissão e mitigação de SOx pelo motogerador, transporte de vinhaça biodigerida com Diesel S500 e geração de eletricidade a partir de vinhaça (t/ano) | -2,79 |
| Balanco das emissões e mitigações de CO ₂ evitada a partir do uso de vinhaça para transporte de vinhaça biodigerida e geração de eletricidade (tCO _{2eq} /ano) | -225,27 |

Fonte: Adaptado de Procknor (2008), Moraes et al. (2014) e Poveda (2014).

Biodigestor e concentrador

Análise econômica do conjugado biodigestor mais concentrador

Tabela 97 - Valor de investimento no biodigestor e motogerador

| Materiais | Preço Unitário | Unidade | Preço total |
|------------------------------------|-------------------|------------|--------------------------|
| Biodigestor IC e dessulfurificador | R\$85/(kgDQO/dia) | 105.000,00 | R\$ 8.925.000,00 |
| Motogerador | R\$ 1700/kW | 2.226,79 | R\$ 3.785.548,78 |
| Total de investimento | | | R\$ 12.710.548,78 |

Fonte: Procknor (2008), Moraes et al. (2014) e Poveda (2014).

Tabela 98 - Valor de operação e manutenção anual de biodigestor e motogerador

| Materiais | Preço unitário | Unidade | Preço total |
|---------------------------------------------|-----------------------|----------------|-----------------------|
| Biodigestor e dessulfurificador | R\$ 0,016/kg DQO | 21.000.000,00 | R\$ 336.000,00 |
| Motogerador | R\$ 40/MWh | 10.688,61 | R\$ 427.544,33 |
| Total anual de operação e manutenção | | | R\$ 763.544,33 |

Fonte: Procknor (2008), Moraes et al. (2014) e Poveda (2014).

Tabela 99 - Investimento e manutenção em concentrador de vinhaça

| | |
|--------------|-------------------|
| Investimento | R\$ 20.000.000,00 |
| Manutenção | R\$ 200.000,00 |

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Citrotec (2017).

Tabela 100 – Operação em concentrador de vinhaça

| | |
|-------------------------------------|----------------|
| Potência MW | 0,294 |
| Eletricidade MWh | R\$ 354.211,20 |
| Soda cáustica/ano (m ³) | R\$ 265.824,00 |

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Citrotec (2017).

Tabela 101 - Capacidade e número de concentradores

| | |
|--------------------------------------------------------------------|--------------|
| Capacidade de processamento do volume de vinhaça (m ³) | 1.751.896,00 |
| Capacidade de redução do volume de vinhaça (m ³) | 175.189,60 |
| Número de concentradores de vinhaça | 1,00 |

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Citrotec (2017).

Tabela 102 - Custo com transporte e mão de obra de vinhaça in natura

| Sistema de transporte e aplicação | Máquina | % de volume de vinhaça a ser transportado | Distância média percorrida para fertirrigação (km) | Velocidade média percorrida pelo caminhão(km/h) | Tempo médio de aplicação e recarga de vinhaça (horas) | Volume de vinhaça transportada por dia (m ³) | Número de viagens no transporte de vinhaça por dia | Número de viagens no transporte de vinhaça por ano | Número de caminhões necessários para transporte de vinhaça | Número de caminhoneiros necessários para o transporte de vinhaça em três turnos |
|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| Caminhão aplicando diretamente | Caminhão 2318 com tanque de 15 m ³ | 5% | 7,00 | 35 | 0,3 | 250,00 | 17,00 | 3.400,00 | 1,00 | 3,00 |
| Caminhão com aspersão combinado com motobomba | Caminhão Volvo rodotrem com dois tanques de 30m ³ cada e motobomba | 24% | 12,00 | 20 | 1,2 | 1.200,00 | 20,00 | 4.000,00 | 2,00 | 6,00 |
| Motobomba em canal com montagem direta ou rolão | Motor MB OM 352 160 CV e Bomba EQ 9048 140 m ³ /h | 71% | 63,00 | | | 3.550,00 | | | | |

Fonte: Adaptado Macedo et al. (2004) e Poveda (2014).

Tabela 103 - Dados com logística de vinhaça antes do concentrador

| Evento | Custo |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Custo mensal de motorista mais encargos trabalhistas e sociais sobre o salário (R\$) | R\$ 4.904,86 |
| Preço do Diesel pago pela usina R\$/litro | R\$ 2,77 |
| Consumo de combustível por safra - caminhão 2318, caminhão Volvo rodotrem e motor MB OM 352 e bomba EQ 9048 (litros) | 222.130,67 |
| Depreciação e O&M mensal por caminhão 2318 e caminhão Volvo rodotrem (R\$) | R\$ 6.000,00 |

Fonte: Adaptado Macedo et al. (2004), Poveda (2014) e Silva (2015).

Tabela 104 - Custos com logística de vinhaça antes do concentrador

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
| Custo anual de motorista mais encargos trabalhistas e sociais sobre o salário (R\$) | R\$ 309.006,37 |
| Consumo de combustível por safra - caminhão 2318, caminhão Volvo rodotrem e motor MB OM 352 e bomba EQ 9048 (litros) | 222130,67 |
| Custo de consumo de combustível por safra - caminhão 2318, caminhão Volvo rodotrem e motor MB OM 352 e bomba EQ 9048 (R\$) | R\$ 615.079,82 |
| Custo de depreciação por safra da frota de caminhões 2318 e Volvo rodotrem (R\$) | R\$ 126.000,00 |
| Total | R\$ 1.050.086,19 |

Fonte: Adaptado Macedo et al. (2004), Poveda (2014) e Silva (2015).

Tabela 105 - Volume de vinhaça concentrada por dia

| | |
|----------------------------------------------|---------------|
| Volume de vinhaça concentrada por dia | 500,00 |
|----------------------------------------------|---------------|

Fonte: Poveda (2014).

Tabela 106 - Custo com transporte e mão de obra de vinhaça concentrada

| Sistema de transporte e aplicação | Máquina | % de volume de vinhaça a ser transportado | Distância média percorrida para fertirrigação (km) | Velocidade média percorrida pelo caminhão(km/h) | Tempo médio de aplicação e recarga de vinhaça (horas) | Volume de vinhaça transportada por dia (m ³) | Número de viagens no transporte de vinhaça concentrada por dia | Número de viagens no transporte de vinhaça concentrada por ano | Número de caminhões necessários para transporte de vinhaça | Número de camioneiros necessários para o transporte de vinhaça em três turnos |
|-----------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| Caminhão aplicando diretamente | Caminhão 2318 com tanque de 15 m ³ | 100% | 7,00 | 35 | 0.3 | 500,00 | 34,00 | 6.800,00 | 2,00 | 6,00 |

Fonte: Adaptado Macedo et al. (2004) e Poveda (2014).

Tabela 107 - Custos com logística de vinhaça depois do concentrador

| Evento | Custo |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| Custo mensal de motorista mais encargos trabalhistas e sociais sobre o salário (R\$) | R\$ 206.004,25 |
| Custo de consumo de combustível por safra - caminhão 2318(R\$) | R\$ 169.160,73 |
| Custo de depreciação por safra da frota de caminhões 2328 e Volvo rodotrem (R\$) | R\$ 42.000,00 |
| Total | R\$ 417.164,97 |

Fonte: Adaptado Macedo et al. (2004), Poveda (2014) e Silva (2015).

Tabela 108 – Economia por safra

| | |
|---------------------------|-----------------------|
| Economia por safra | R\$ 632.921,21 |
|---------------------------|-----------------------|

Fonte: Silva (2015).

Tabela 109 - Dados e custo de fertilizantes e vinhaça concentrada

| Fertilizante | kg/m³ de vinhaça | Preço (R\$/t) | Preço/m³ (R\$) |
|-------------------------------------------------------|------------------------------------|----------------------|----------------------------------|
| Uréia | 0,615 | 767,03 | 0,47 |
| Superfosfato triplo | 0,435 | 838,45 | 0,36 |
| Cloreto de potássio | 2,45 | 664,55 | 1,62 |
| Vinhaça in natura | | | 2,45 |
| Vinhaça concentrada (concentração em 10 vezes) | | | 24,50 |

Fonte: Simoes, Sena e Campos (2004).

Tabela 110 - Volume de água permeada recuperada m³

| | |
|---------------------------------------------------------|-------------------|
| Volume de água permeada recuperada m³ | 720.000,00 |
|---------------------------------------------------------|-------------------|

Fonte: Simoes, Sena e Campos (2004).

Tabela 111 - Valor final de vinhaça concentrada e águas residuárias

| Produto | Preço | Quantidade | Valor final |
|-------------------------------------|--------------|-------------------|--------------------|
| Vinhaça concentrada | R\$ 24,50 | 100.000,00 | R\$ 2.450.000,00 |
| Recuperação de água | R\$ 1,00 | 720.000,00 | R\$ 720.000,00 |
| Ausência de multa (atualizado IGPM) | R\$ 1.810,00 | 1 | R\$ 1.810,00 |

Fonte: Simoes, Sena e Campos (2004).

Tabela 112 - Resumo dos dados financeiros

| | |
|--------------------------------------------------------|------------|
| Vida útil (anos) | 20 |
| Preço do MWh | R\$ 251,00 |
| Preço da soda cáustica (R\$/m ³) | R\$ 170,40 |
| Preço da tCO ₂ eq | R\$ 17,38 |
| Impostos sobre venda de eletricidade (ICMS, IR e CSLL) | 40% |
| Imposto sobre a venda de fertilizantes (IR e CSLL) | 34% |
| Taxa de desconto | 15,00% |

Fonte: ÚNICA (2014), Investing (2017) e Nogueira et al. (2015).

Tabela 113 – Fluxo de caixa do conjugado biodigestor mais concentrador

| Receita | ano 1 | ano 2 | ano 3 | ano 4 | ano 5 | ano 6 | ano 7 | ano 8 | ano 9 | ano 10 | ano 11 | ano 12 | ano 13 | ano 14 | ano 15 | ano 16 | ano 17 | ano 18 | ano 19 | ano 20 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | R\$ | R\$ | R\$ | R\$ | R\$ | R\$ | R\$ | R\$ | R\$ | R\$ | R\$ | R\$ | R\$ | R\$ | R\$ | R\$ | R\$ | R\$ | R\$ | R\$ |
| Venda de fertilizantes | 2.450.000,00 | 2.450.000,00 | 2.450.000,00 | 2.450.000,00 | 2.450.000,00 | 2.450.000,00 | 2.450.000,00 | 2.450.000,00 | 2.450.000,00 | 2.450.000,00 | 2.450.000,00 | 2.450.000,00 | 2.450.000,00 | 2.450.000,00 | 2.450.000,00 | 2.450.000,00 | 2.450.000,00 | 2.450.000,00 | 2.450.000,00 | 2.450.000,00 |
| Venda de eletricidade (ACR) | 1.846.711,64 | 1.846.711,64 | 1.846.711,64 | 1.846.711,64 | 1.846.711,64 | 1.846.711,64 | 1.846.711,64 | 1.846.711,64 | 1.846.711,64 | 1.846.711,64 | 1.846.711,64 | 1.846.711,64 | 1.846.711,64 | 1.846.711,64 | 1.846.711,64 | 1.846.711,64 | 1.846.711,64 | 1.846.711,64 | 1.846.711,64 | 1.846.711,64 |
| Venda de crédito de carbono (MDL) | 20.142,81 | 20.142,81 | 20.142,81 | 20.142,81 | 20.142,81 | 20.142,81 | 20.142,81 | 20.142,81 | 20.142,81 | 20.142,81 | 20.142,81 | 20.142,81 | 20.142,81 | 20.142,81 | 20.142,81 | 20.142,81 | 20.142,81 | 20.142,81 | 20.142,81 | 20.142,81 |
| Água recuperada | 720.000,00 | 720.000,00 | 720.000,00 | 720.000,00 | 720.000,00 | 720.000,00 | 720.000,00 | 720.000,00 | 720.000,00 | 720.000,00 | 720.000,00 | 720.000,00 | 720.000,00 | 720.000,00 | 720.000,00 | 720.000,00 | 720.000,00 | 720.000,00 | 720.000,00 | 720.000,00 |
| Economia por ausência de multa | 1.810,00 | 1.810,00 | 1.810,00 | 1.810,00 | 1.810,00 | 1.810,00 | 1.810,00 | 1.810,00 | 1.810,00 | 1.810,00 | 1.810,00 | 1.810,00 | 1.810,00 | 1.810,00 | 1.810,00 | 1.810,00 | 1.810,00 | 1.810,00 | 1.810,00 | 1.810,00 |
| Economia com transporte de vinhaça in natura e biodigerida | 368.058,61 | 368.058,61 | 368.058,61 | 368.058,61 | 368.058,61 | 368.058,61 | 368.058,61 | 368.058,61 | 368.058,61 | 368.058,61 | 368.058,61 | 368.058,61 | 368.058,61 | 368.058,61 | 368.058,61 | 368.058,61 | 368.058,61 | 368.058,61 | 368.058,61 | 368.058,61 |
| Receita total | 5.406.723,06 | 5.406.723,06 | 5.406.723,06 | 5.406.723,06 | 5.406.723,06 | 5.406.723,06 | 5.406.723,06 | 5.406.723,06 | 5.406.723,06 | 5.406.723,06 | 5.406.723,06 | 5.406.723,06 | 5.406.723,06 | 5.406.723,06 | 5.406.723,06 | 5.406.723,06 | 5.406.723,06 | 5.406.723,06 | 5.406.723,06 | 5.406.723,06 |
| | R\$ | R\$ | R\$ | R\$ | R\$ | R\$ | R\$ | R\$ | R\$ | R\$ | R\$ | R\$ | R\$ | R\$ | R\$ | R\$ | R\$ | R\$ | R\$ | R\$ |
| Despesa | ano 1 | ano 2 | ano 3 | ano 4 | ano 5 | ano 6 | ano 7 | ano 8 | ano 9 | ano 10 | ano 11 | ano 12 | ano 13 | ano 14 | ano 15 | ano 16 | ano 17 | ano 18 | ano 19 | ano 20 |
| O&M do concentrador | 820.035,20 | 820.035,20 | 820.035,20 | 820.035,20 | 820.035,20 | 820.035,20 | 820.035,20 | 820.035,20 | 820.035,20 | 820.035,20 | 820.035,20 | 820.035,20 | 820.035,20 | 820.035,20 | 820.035,20 | 820.035,20 | 820.035,20 | 820.035,20 | 820.035,20 | 820.035,20 |
| O&M do biodigestor e dessulfurificador | 336.000,00 | 336.000,00 | 336.000,00 | 336.000,00 | 336.000,00 | 336.000,00 | 336.000,00 | 336.000,00 | 336.000,00 | 336.000,00 | 336.000,00 | 336.000,00 | 336.000,00 | 336.000,00 | 336.000,00 | 336.000,00 | 336.000,00 | 336.000,00 | 336.000,00 | 336.000,00 |
| O&M do motogerador | 427.544,33 | 427.544,33 | 427.544,33 | 427.544,33 | 427.544,33 | 427.544,33 | 427.544,33 | 427.544,33 | 427.544,33 | 427.544,33 | 427.544,33 | 427.544,33 | 427.544,33 | 427.544,33 | 427.544,33 | 427.544,33 | 427.544,33 | 427.544,33 | 427.544,33 | 427.544,33 |
| Impostos sobre venda (6%), renda (25%) e contribuições sociais (9%) sobre a venda de eletricidade | 738.684,66 | 738.684,66 | 738.684,66 | 738.684,66 | 738.684,66 | 738.684,66 | 738.684,66 | 738.684,66 | 738.684,66 | 738.684,66 | 738.684,66 | 738.684,66 | 738.684,66 | 738.684,66 | 738.684,66 | 738.684,66 | 738.684,66 | 738.684,66 | 738.684,66 | 738.684,66 |
| Impostos sobre venda (isento/SP), renda (25%) e contribuições sociais (9%) sobre a venda de fertilizantes | 833.000,00 | 833.000,00 | 833.000,00 | 833.000,00 | 833.000,00 | 833.000,00 | 833.000,00 | 833.000,00 | 833.000,00 | 833.000,00 | 833.000,00 | 833.000,00 | 833.000,00 | 833.000,00 | 833.000,00 | 833.000,00 | 833.000,00 | 833.000,00 | 833.000,00 | 833.000,00 |
| Total de despesa | 3.155.264,19 | 3.155.264,19 | 3.155.264,19 | 3.155.264,19 | 3.155.264,19 | 3.155.264,19 | 3.155.264,19 | 3.155.264,19 | 3.155.264,19 | 3.155.264,19 | 3.155.264,19 | 3.155.264,19 | 3.155.264,19 | 3.155.264,19 | 3.155.264,19 | 3.155.264,19 | 3.155.264,19 | 3.155.264,19 | 3.155.264,19 | 3.155.264,19 |
| Fluxo Líquido | 2.251.458,87 | 2.251.458,87 | 2.251.458,87 | 2.251.458,87 | 2.251.458,87 | 2.251.458,87 | 2.251.458,87 | 2.251.458,87 | 2.251.458,87 | 2.251.458,87 | 2.251.458,87 | 2.251.458,87 | 2.251.458,87 | 2.251.458,87 | 2.251.458,87 | 2.251.458,87 | 2.251.458,87 | 2.251.458,87 | 2.251.458,87 | 2.251.458,87 |

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Simões, Sena e Campos (2004), Macedo et al. (2004), Poveda (2014), Moares et al. (2014) e Silva (2015).

Tabela 114 - Fluxo de caixa e saldo simples e descontado

| Ano | Fluxo | Saldo | Fluxo descontado | Saldo descontado |
|-----|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 0 | -R\$ 32.710.548,78 | -R\$ 32.710.548,78 | -R\$ 32.710.548,78 | -R\$ 32.710.548,78 |
| 1 | R\$ 2.251.458,87 | -R\$ 30.459.089,91 | R\$ 1.957.790,32 | -R\$ 30.752.758,46 |
| 2 | R\$ 2.251.458,87 | -R\$ 28.207.631,04 | R\$ 1.702.426,37 | -R\$ 29.050.332,10 |
| 3 | R\$ 2.251.458,87 | -R\$ 25.956.172,17 | R\$ 1.480.370,75 | -R\$ 27.569.961,34 |
| 4 | R\$ 2.251.458,87 | -R\$ 23.704.713,30 | R\$ 1.287.278,92 | -R\$ 26.282.682,43 |
| 5 | R\$ 2.251.458,87 | -R\$ 21.453.254,43 | R\$ 1.119.372,97 | -R\$ 25.163.309,46 |
| 6 | R\$ 2.251.458,87 | -R\$ 19.201.795,56 | R\$ 973.367,80 | -R\$ 24.189.941,66 |
| 7 | R\$ 2.251.458,87 | -R\$ 16.950.336,70 | R\$ 846.406,78 | -R\$ 23.343.534,87 |
| 8 | R\$ 2.251.458,87 | -R\$ 14.698.877,83 | R\$ 736.005,90 | -R\$ 22.607.528,97 |
| 9 | R\$ 2.251.458,87 | -R\$ 12.447.418,96 | R\$ 640.005,13 | -R\$ 21.967.523,84 |
| 10 | R\$ 2.251.458,87 | -R\$ 10.195.960,09 | R\$ 556.526,20 | -R\$ 21.410.997,65 |
| 11 | R\$ 2.251.458,87 | -R\$ 7.944.501,22 | R\$ 483.935,83 | -R\$ 20.927.061,82 |
| 12 | R\$ 2.251.458,87 | -R\$ 5.693.042,35 | R\$ 420.813,76 | -R\$ 20.506.248,06 |
| 13 | R\$ 2.251.458,87 | -R\$ 3.441.583,48 | R\$ 365.925,01 | -R\$ 20.140.323,05 |
| 14 | R\$ 2.251.458,87 | -R\$ 1.190.124,61 | R\$ 318.195,66 | -R\$ 19.822.127,39 |
| 15 | R\$ 2.251.458,87 | R\$ 1.061.334,26 | R\$ 276.691,88 | -R\$ 19.545.435,51 |
| 16 | R\$ 2.251.458,87 | R\$ 3.312.793,13 | R\$ 240.601,63 | -R\$ 19.304.833,88 |
| 17 | R\$ 2.251.458,87 | R\$ 5.564.252,00 | R\$ 209.218,81 | -R\$ 19.095.615,06 |
| 18 | R\$ 2.251.458,87 | R\$ 7.815.710,87 | R\$ 181.929,40 | -R\$ 18.913.685,66 |
| 19 | R\$ 2.251.458,87 | R\$ 10.067.169,74 | R\$ 158.199,48 | -R\$ 18.755.486,18 |
| 20 | R\$ 2.251.458,87 | R\$ 12.318.628,61 | R\$ 137.564,76 | -R\$ 18.617.921,42 |

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Simões, Sena e Campos (2004), Macedo et al. (2004), Poveda (2014), Moares et al. (2014) e Silva (2015).

Tabela 115 - Resultados financeiros

| | |
|---------------------------|--------------------|
| VPL | -R\$ 18.617.921,42 |
| TIR | 3% |
| <i>Payback</i> | 14,53 |
| <i>Payback</i> descontado | ND |

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Simões, Sena e Campos (2004), Macedo et al. (2004), Poveda (2014), Moares et al. (2014) e Silva (2015).

Avaliação energética do conjugado biodigestor mais concentrador

Tabela 116 - Consumo anual de eletricidade na biodigestão (MWh)

| | |
|-----------------------------------------------------------|-----------------|
| Potência elétrica do sistema de biodigestores (kw) | 400,00 |
| Dias de safra (horas/ano) | 4.800,00 |
| Consumo anual de eletricidade na biodigestão (MWh) | 1.920,00 |

Fonte: Procknor (2008), Moraes et al. (2014) e Poveda (2014).

Tabela 117 - Consumo de eletricidade do concentrador (MWh)

| | |
|----------------------------------------------------------|-----------------|
| Dias de safra (horas/ano) | 4.800,00 |
| Potência do concentrador (MW) | 0,294 |
| Número de concentradores | 1,00 |
| Consumo de eletricidade do concentrador (MWh/ano) | 1.411,20 |

Fonte: Poveda (2014).

Tabela 118 - Volume de biogás produzido (m³/ano)

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| Volume de vinhaça produzida por ano (m ³)/ano | 1.000.000,00 |
| Volume de biogás produzido por m ³ de vinhaça (Nm ³ /m ³) | 6,00 |
| Volume de biogás/ano (m³/ano) | 6.000.000,00 |

Fonte: Poveda (2014).

Tabela 119 - Energia térmica produzida pelo biogás (TJ/ano)

| | |
|---------------------------------------------------------|---------------|
| Volume de biogás produzido m ³ /ano | 6.000.000,00 |
| Porcentagem de volume de biogás vazado | 0,05 |
| PCI do biogás kJ/Nm ³ | 17.765,00 |
| Energia térmica produzida pelo biogás ano TJ/ano | 101,26 |

Fonte: Poveda (2014).

Tabela 120 - Energia elétrica exportada (MWh/ano)

| | |
|-----------------------------------------------------|-----------|
| Energia produzida pelo biogás (MWh) | 28.127,94 |
| Rendimento termoelétrico do motor | 0,38 |
| Consumo anual de eletricidade do concentrador (MWh) | 1.411,20 |
| Consumo anual de eletricidade na biodigestão (MWh) | 1.920,00 |

Fonte: Poveda (2014).

Tabela 121 - Energia elétrica exportada por ano

| | |
|-----------------------------------------------------|-----------------|
| Energia elétrica exportada por ano (MWh/ano) | 7.357,42 |
|-----------------------------------------------------|-----------------|

Fonte: Procknor (2008), Moraes et al. (2014) e Poveda (2014).

Tabela 122- Potência elétrica de geração instalada

| | |
|----------------------------------------------------|-------------|
| Energia térmica produzida com biogás ano MW/ano | 28.127,92 |
| Rendimento termoelétrico do motor | 0,38 |
| Duração da safra (horas) | 4.800,00 |
| Potência elétrica de geração instalada (MW) | 2,23 |

Fonte: Procknor (2008), Moraes et al. (2014) e Poveda (2014).

Tabela 123 - Consumo de Diesel anual com transporte de vinhaça concentrada (m³/ano)

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Consumo de Diesel anual com transporte de vinhaça concentrada (m ³ /ano) | 43,25 |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------|

Fonte: Poveda (2014).

Tabela 124 - Energia proveniente consumida do Diesel por ano

| | |
|-----------------------------------------------------|-------------|
| Consumo de Diesel anual (m ³ /ano) | 43,25 |
| Poder calorífico inferior do Diesel (kJ/litro) | 36.031,00 |
| Energia consumida do Diesel por ano (TJ/ano) | 1,56 |

Fonte: Poveda (2014).

Tabela 125 - Equivalente populacional de geração de eletricidade de vinhaça biodigerida e concentrada

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|
| Energia elétrica exportada por ano (MWh/ano) | 7.357,42 |
| Consumo de eletricidade residencial per capita anual no Brasil (MWh/ano) | 0,46 |
| Equivalente populacional de geração de eletricidade de vinhaça biodigerida e concentrada (habitantes) | 16.134,69 |

Fonte: Moraes et al. (2014).

Avaliação ambiental do conjugado biodigestor mais concentrador

Tabela 126 - Equivalente populacional de vinhaça biodigerida concentrada (habitantes)

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| DQO de águas de esgoto (kg/m ³) | 0,43 |
| Média de consumo de água por habitante (litros/habitante) | 225,00 |
| Contribuição per capita de esgoto | 0,80 |
| Fluxo de vinhaça concentrada (litros/dia) | 500,00 |
| DQO de vinhaça biodigerida (kg/m ³) | 4,20 |
| Equivalente Populacional de vinhaça biodigerida concentrada (habitantes) | 27,13 |

Fonte: Moraes et al. (2014).

Tabela 127 - Emissão de NO_x pelo concentrador (t/ano)

| | |
|-------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Consumo de eletricidade pelo concentrador (MWh/ano) | 1.411,20 |
| Fator de emissão de NO _x por consumo de eletricidade (g/MWh) | 89,29 |
| Emissão de NO_x pelo concentrador (t/ano) | 0,13 |

Fonte: Poveda (2014).

Tabela 128 - Emissão de NO_x no transporte de vinhaça concentrada com Diesel S500 (t/ano)

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Kilometragem total percorrida pela frota de caminhões 2318 no ano (km) | 95.200,00 |
| Fator de emissão de NO _x por kilometro percorrido (g/km) | 5,23 |
| Emissão de NO_x no transporte de vinhaça concentrada (t/ano) | 0,50 |

Fonte: Poveda (2014).

Tabela 129 - Emissão de NO_x por ano no motogerador de biogás (t/ano)

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Energia térmica produzido pelo biogás por ano (TJ/ano) | 101,26 |
| Fator de emissão NO _x do motogerador de biogás (kg NO _x /TJ) | 232,16 |
| Emissão de NO_x por ano no motogerador de biogás (tNO_x/ano) | 23,51 |

Fonte: Poveda (2014).

Tabela 130 - Emissão de SO_x pelo concentrador (t/ano)

| | |
|-------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Consumo de eletricidade pelo concentrador (MWh/ano) | 1.411,20 |
| Fator de emissão de SO _x por consumo de eletricidade (g/MWh) | 383,17 |
| Emissão de SO_x pelo concentrador (t/ano) | 0,54 |

Fonte: Poveda (2014).

Tabela 131 - Emissão de SO_x no transporte de vinhaça concentrada com Diesel S500 (t/ano)

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Consumo total de Diesel pela frota de caminhões 2318 anual (m ³) | 43,25 |
| Densidade do Diesel (kg/m ³) | 840,00 |
| Quantidade SO _x por massa de Diesel (t/kg de Diesel) | 0,00 |
| Emissão de SO_x no transporte de vinhaça concentrada com Diesel S500 (t/ano) | 0,02 |

Fonte: Poveda (2014).

Tabela 132 - Emissão de SO_x por ano no motogerador de biogás (t/ano)

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Volume de biogás produzido por ano (m ³ /ano) | 6.000.000,00 |
| Porcentagem de volume de biogás vazado | 0,05 |
| Concentrador de H ₂ S no biogás (mg/m ³) | 113 |
| Massa molecular do H ₂ S (g/M) | 34,08 |
| Massa molecular do SO ₂ (g/M) | 64,06 |
| Emissão de SO_x por ano no motogerador de biogás (tSO₂/ano) | 1,21 |

Fonte: Poveda (2014).

Tabela 133 - Emissão de CO₂ eq pelo concentrador (t/ano)

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| Consumo de eletricidade pelo concentrador (MWh/ano) | 1.411,20 |
| Fator de emissão de CO ₂ eq por consumo de eletricidade (tCO ₂ eq/MWh) | 0,08 |
| Emissão de CO₂ eq pelo concentrador (t/ano) | 115,72 |

Fonte: Poveda (2014).

Tabela 134 - Emissão de CO₂ eq no transporte de vinhaça concentrada com Diesel S500 (t/ano)

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| Consumo total de Diesel pela frota de caminhões 2318 anual (m ³) | 43,25 |
| Densidade do Diesel (kg/m ³) | 840,00 |
| Quantidade CO ₂ eq por massa de Diesel (t/kg de Diesel) | 0,00 |
| Emissão de CO₂ eq no transporte de vinhaça concentrada com Diesel S500 (t/ano) | 126,79 |

Fonte: Poveda (2014).

Tabela 135 - Emissão de NO_x evitada a partir do uso de vinhaça para geração de eletricidade (t/ano)

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Geração de eletricidade (MWh/ano) | 10.688,62 |
| Fator de NO _x evitado a partir da geração de eletricidade (g/MWh) | 89,29 |
| Emissão de NO_x evitada a partir do uso de vinhaça para geração de eletricidade (tNO_x/ano) | 0,95 |

Emissão de NO_x evitada a partir do uso de vinhaça para geração de eletricidade equivalente em CO₂ (tCO_{2eq}/ano) **282,50**

Fonte: Poveda (2014).

Tabela 136 - Emissão de SO_x evitada a partir do uso de vinhaça para geração de eletricidade (t/ano)

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Geração de eletricidade (MWh/ano) | 10.688,62 |
| Fator de SO _x evitado a partir do uso de vinhaça para geração de eletricidade (g/MWh) | 383,17 |
| Emissão de SO_x evitada a partir do uso de vinhaça para geração de eletricidade (tSO_x/ano) | 4,10 |

Fonte: Poveda (2014).

Tabela 137 - Emissão de CO_{2eq} evitada a partir do uso de vinhaça para geração de eletricidade (t/ano)

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| Geração de eletricidade (MWh/ano) | 10.688,62 |
| Fator de CO _{2eq} evitado a partir do uso de vinhaça para geração de eletricidade (tCO _{2eq} /MWh) | 0,08 |
| Emissão de CO₂ evitada a partir do uso de vinhaça para geração de eletricidade (tCO_{2eq}) | 876,47 |

Fonte: Poveda (2014).

Resumo dos resultados energéticos do conjugado biodigestor mais concentrador

Tabela 138 - Resumo dos resultados energéticos

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Consumo de Diesel anual com transporte de vinhaça concentrada (m ³ /ano) | 43,25 |
| Balanco de energia consumida pelo Diesel e gerada pelo biogás por ano (TJ/ano) | 99,70 |
| Balanco de geração e consumo de eletricidade (MWh/ano) | 7.357,42 |
| Equivalente populacional de geração de eletricidade de vinhaça biodigerida e concentrada (habitantes) | 16.134,69 |

Fonte: Adaptado de Procknor (2008), Moraes et al. (2014) e Poveda (2014).

*Resumo dos resultados ambientais do conjugado biodigestor mais condensador***Tabela 139 – Resumo dos resultados ambientais para o conjugado biodigestor concentrador**

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| Equivalente Populacional de vinhaça biodigerida concentrada (habitantes) | 27,13 |
| Balanco de emissão e mitigação de NO _x pelo concentrador, transporte de vinhaça concentrada com Diesel S500, motogerador e geração de eletricidade a partir de vinhaça (t/ano) | 23,18 |
| Balanco de emissão e mitigação de SO _x pelo concentrador, transporte de vinhaça concentrada com Diesel S500, motogerador e geração de eletricidade a partir de vinhaça (t/ano) | -2,33 |
| Balanco de emissão e mitigação de CO ₂ eq pelo concentrador, transporte de vinhaça concentrada com Diesel S500 e geração de eletricidade a partir de vinhaça (t/ano) | -633,96 |

Fonte: Adaptado de Moraes et al. (2014) e Poveda (2014).

Linhas de crédito dos principais bancos de desenvolvimento do país

Quadro 17 – BNDES - Finem Geração de Energia

| Linha | Instituição | Porte | Setor | Instrumento | Itens financiáveis | Nível de participação | | Taxa de juros | Prazo de pagamento | Limite Financiamento |
|-------------------------------------------|-------------|-------|----------------------------------------------------------------------------|-------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
| BNDES Finem - Geração de energia | BNDES | Todos | Empresas sediadas no País; Entidades e órgãos públicos. | Recursos financeiros | Implantação ou ampliação de negócios destinados à geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis e termelétricas a gás natural em ciclo combinado. | Solar | 80% | Apoio direto Empresas TJLP (7,5% a.a) + Taxa do BNDES 2,1% a 6,56% a.a; | Fontes alternativas: 20 anos; Energia eólica e termelétricas a gás natural em ciclo combinado: 16 anos. | A partir de R\$ 20 milhões. |
| | | | | | | Outras fontes alternativas | 70% | Unidades federativas e municípios TJLP (7,5% a.a) + Taxa do BNDES 2,7% a.a. | | |
| | | | | | | Hidrelétricas acima de 30MW | 50% | Apoio indireto Micro, pequenas e médias empresas TJLP (7,5% a.a) +Taxa do BNDES 2,1% ao ano + Taxa do Agente Financeiro | | |
| | | | | | | Termelétricas a gás natural em ciclo combinado | 50% | Demais clientes TJLP (7,5% a.a) + Taxa do BNDES 2,1% ao ano + Taxa do Agente Financeiro. | | |

Fonte: BNDES (2017a).

Quadro 18 – BNDES -Finem Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos

| Linha | Instituição | Porte | Setor | Instrumento | Itens financiáveis | Nível de participação | Taxa de juros | Prazo de pagamento | Limite Financiamento |
|-----------------------------------------------------------------------|-------------|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
| BNDES Finem - Saneamento ambiental e recursos hídricos | BNDES | Todos | Empresas sediadas no País; Pessoa física ou jurídica; Entidades e órgãos públicos; Organizações do terceiro setor | Recursos financeiros | Abastecimento de água; Esgotamento sanitário; Efluentes e subproduto industriais; resíduos sólidos; Gestão de recursos hídricos (tecnologias e processos, bacias hidrográficas); Recuperação de áreas ambientalmente degradadas; Desenvolvimento institucional; Despoluição de bacias, em regiões onde já estejam constituídos Comitês e Macro drenagem. | Até 80% | Apoio direto Empresas TJLP (7,5% a.a) + Taxa do BNDES de 2,1% a 6,56% a.a Unidades federativas e municípios TJLP (7,5% a.a) + Taxa do BNDES 2,7% a.a Apoio Indireto TJLP (7,5% a.a) +Taxa do BNDES 2,1% a.a +Taxa do Agente Financeiro | 20 anos para projetos de água e esgoto e 15 anos para demais projetos. | A partir de R\$ 20 milhões. |

Fonte: BNDES (2017b).

Quadro 19 - BNDES Finem - Aquisição de Bens de Capital

| Linha | Instituição | Porte | Setor | Instrumento | Itens financiáveis | Nível de participação | | Taxa de juros | Prazo de pagamento | Limite Financiamento |
|--------------------------------------------|-------------|-------|--------------------------------------------------------|----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|---------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| | | | | | | | | | | |
| BNDES Finem - Aquisição de bens de capital | BNDES | Todos | Empresas sediadas no País; Entidades e órgãos públicos | Recursos financeiros | Máquinas e equipamentos; Bens de informática e automação com tecnologia nacional; Ônibus elétricos, híbridos ou outros modelos com tração elétrica e demais máquinas e equipamentos com maiores índices de eficiência energética e/ou redução de emissão de gases de efeito estufa. | Micro, pequenas e médias empresas. | até 80% | Apoio direto Empresas TJLP (7,5% a.a) + Taxa do BNDES de 2,1% a 6,56% a.a | O prazo total de financiamento será determinado em função da capacidade de pagamento do empreendimento, da empresa e do grupo econômico. | a partir de R\$ 20 milhões |
| | | | | | | Grandes empresas | | | | |
| | | | | | | Bens de informática e automação com tecnologia nacional | até 80% | Unidades federativas e municípios TJLP (7,5% a.a) + Taxa do BNDES 2,7% a.a | | |
| | | | | | | Equipamentos com maiores índices de eficiência energética e/ou redução de emissão de GEE | até 80% | Apoio Indireto TJLP (7,5% a.a) + Taxa do BNDES 2,1% a.a + Taxa do Agente Financeiro | | |

Fonte: BNDES (2017c).

Quadro 20 - BNDES Finame - BK Aquisição e Comercialização

| Linha | Instituição | Porte | Setor | Instrumento | Itens financiáveis | Nível de participação | | Taxa de juros | Prazo de pagamento | Limite Financiamento |
|-----------------------------------------------|-------------|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|---------|----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|----------------------------|
| | | | | | | | | | | |
| BNDES Finame - BK Aquisição e Comercialização | BNDES | Todos | Empresas sediadas no País; Administração Pública; Empresários individuais e micro empreendedores; Fundações, associações, sindicatos, cooperativas, condomínios e assemelhados e clubes. | Recursos Financeiros | Máquinas e equipamentos; Sistemas industriais; | Micro, pequenas e médias empresas. | até 80% | TJLP (7,5% a.a) + Taxa do BNDES 2,1% a.a + Taxa do agente financeiro | Até 10 anos, com carência de até 2 anos. | a partir de R\$ 20 milhões |
| | | | | | Componentes; | | | | | |
| | | | | | Bens de informática e de automação; | Bens de informática e automação com tecnologia nacional | até 80% | | | |
| | | | | | Ônibus, caminhões e aeronaves executivas; | | | | | |
| | | | | | Capital de giro associado, para micro, pequenas e médias empresas (até 30% do valor financiado). | | | | | |

Fonte: BNDES (2017d).

Quadro 21 – Desenvolve SP - Linha FIP Simplificado

| Linha | Instituição | Porte | Setor | Instrumento | Itens financiáveis | Nível de participação | Taxa de juros | Prazo de pagamento | Limite Financiamento |
|------------------|--------------------|---------------------------------------------------|--------------|----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|----------------------------------|----------------------------------------------------------|-----------------------------|
| FIP Simplificado | Desenvolve SP | Pequenas e médias empresas do estado de São Paulo | Todos | Recursos financeiros | Aquisição de máquinas e equipamentos novos ou usados; Veículos utilitários novos para transporte de carga; Tratores agrícolas; Implementos agrícolas; Plataformas de corte; Colheitadeiras; Equipamentos para preparo, secagem e beneficiamento de café | Até 90% | A partir de 0,68 % a.m mais IPCA | Até 60 meses incluindo o período de carência de 12 meses | Até 30 milhões |

Fonte: Desenvolve SP (2017a).

Quadro 22 - Desenvolve SP - Linha Economia Verde Máquinas

| Linha | Instituição | Porte | Setor | Instrumento | Itens financiáveis | Nível de participação | Taxa de juros | Prazo de pagamento | Limite Financiamento |
|-------------------------|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|---------------------------------|----------------------------------------------------------|-----------------------------|
| Economia Verde Máquinas | Desenvolve SP | Pessoa jurídica de direito privado, com sede e administração no Estado de São Paulo. Os beneficiários podem ser proprietários dos empreendimentos financiados ou prestadores de serviço contratados para executar projetos em unidades de terceiros | Todos | Recursos financeiros | Edificações, com foco em condicionamento de ar, iluminação, envoltória e geração distribuída; incluindo cogeração, para unidades novas ou já existentes (retrofit); Processos produtivos, com foco em cogeração, aproveitamento de gases de processo como fonte energética e outras intervenções; Repotênciação de usinas; e Redes elétricas inteligentes. | Até 100% | A partir de 0,53% a.m mais IPCA | Até 60 meses incluindo o período de carência de 12 meses | De 100 mil até 30 milhões |

Fonte: Desenvolve SP (2017b).

Quadro 23 - Desenvolve SP - Linha Economia Verde

| Linha | Instituição | Porte | Setor | Instrumento | Itens financiáveis | Nível de participação | Taxa de juros | Prazo de pagamento | Limite Financiamento |
|----------------|--------------------|--------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|
| Economia Verde | Desenvolve SP | Todos | Construção civil, manejo de resíduos, transporte, indústria, agroindústria, saneamento básico e geração de energia | Recursos financeiros | Financia projetos sustentáveis que promovam a redução de emissões de GEE a e que minimizem o impacto da atividade produtiva no meio ambiente. Por meio de redução de consumo de energia, troca de combustíveis fósseis por renováveis, reflorestamento e preservação dos recursos naturais, alinhada com a Política Estadual de Mudanças Climáticas (PEMC) | Até 100% | A partir de 0,53% a.m mais IPCA | Até 120 meses incluindo a carência | Até 30 milhões |

Fonte: Desenvolve SP (2017c).

Quadro 24 - Banco de Desenvolvimento do Espírito Santo e BNDES - Linha BNDES Automático/ABC Integração

| Linha | Instituição | Porte | Setor | Instrumento | Itens financiáveis | Nível de participação | Taxa de juros | Prazo de pagamento | Limite Financiamento |
|---------------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------|---------------------------|----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|----------------------|------------------------------------|-----------------------------|
| BNDES Automático/ABC Integração | BNDES e Banco de desenvolvimento do Espírito Santo | Produtores rurais, pessoas físicas ou jurídicas. | Agrícola e agroindustrial | Recursos financeiros | Aquisição de máquinas, implementos e equipamentos de fabricação nacional, inclusive para a implantação de sistemas de irrigação, para a agricultura e pecuária, biodigestores, máquinas e equipamentos para a realização da compostagem e para produção e armazenamento de energia | Até 100% | 8% a.a | Até 144 meses incluindo a carência | Máximo de até R\$ 2 milhões |

Fonte: Banco de Desenvolvimento do Espírito Santo (2017a).

Quadro 25 - BNDES e Banco de Desenvolvimento do Espírito Santo - Linha BNDES Automático/ABC Florestas 2016/2017

| Linha | Instituição | Porte | Setor | Instrumento | Itens financiáveis | Nível de participação | Taxa de juros | Prazo de pagamento | Limite Financiamento |
|------------------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------|---------------------------|----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|----------------------|------------------------------------|-----------------------------|
| BNDES Automático/ABC Florestas 2016/2017 | BNDES e Banco de Desenvolvimento do Espírito Santo | Produtores rurais, pessoas físicas ou jurídicas | Agrícola e agroindustrial | Recursos Financeiros | Aquisição de máquinas, implementos e equipamentos de fabricação nacional, inclusive para a implantação de sistemas de irrigação, para a agricultura e pecuária, biodigestores, máquinas e equipamentos para a realização da compostagem e para produção e armazenamento de energia | Até 100% | 8% a.a | Até 144 meses incluindo a carência | Máximo de até R\$ 2 milhões |

Fonte: Banco de Desenvolvimento do Espírito Santo (2017b).

Quadro 26 - BNDES/ Banco de Desenvolvimento do Espírito Santo - Linha BNDES Automático/ABC Recuperação 2016/2017

| Linha | Instituição | Porte | Setor | Instrumento | Itens financiáveis | Nível de participação | Taxa de juros | Prazo de pagamento | Limite Financiamento |
|--------------------------------------------|---------------------------------------------------|-------------------------------------------------|---------------------------|----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|----------------------|------------------------------------|-----------------------------|
| BNDES Automático/ABC Recuperação 2016/2017 | BNDES/ Banco de Desenvolvimento do Espírito Santo | Produtores rurais, pessoas físicas ou jurídicas | Agrícola e agroindustrial | Recursos Financeiros | Aquisição de máquinas, implementos e equipamentos de fabricação nacional, inclusive para a implantação de sistemas de irrigação, para a agricultura e pecuária, biodigestores, máquinas e equipamentos para a realização da compostagem e para produção e armazenamento de energia | Até 100% | 8% a.a | Até 144 meses incluindo a carência | Máximo de até R\$ 2 milhões |

Fonte: Banco de Desenvolvimento do Espírito Santo (2017c).

Quadro 27 - Banco de Desenvolvimento do Extremo Sul - Linha MPME

| Linha | Instituição | Porte | Setor | Instrumento | Itens financiáveis | Nível de participação | Taxa de juros | Prazo de pagamento | Limite Financiamento |
|--------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|--------------|----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|---------------------------|-----------------------------|
| MPME | Banco de Desenvolvimento do Extremo Sul | Micro, pequenas e médias com faturamento inferior a R\$ 90 milhões | Todos | Recursos financeiros | Obras civis, montagens e instalações; Máquinas e equipamentos novos; Máquinas e equipamentos usados, de fabricação nacional; Gastos com Estudos e Projetos de Engenharia; Gastos com: Qualidade e Produtividade, Pesquisa e Desenvolvimento, Atualização Tecnológica e Reforma de equipamentos e instalações de grande porte | Até 90%, com exceção de projetos de implantação em que o limite de participação seja de 50%; | TJLP + 5,1% a.a. | Até 120 meses | Não informado |

Fonte: Banco de Desenvolvimento do Extremo Sul (2017a).

Quadro 28 - Banco de Desenvolvimento do Extremo Sul - Linha Média Grande e Grande Empresa

| Linha | Instituição | Porte | Setor | Instrumento | Itens financiáveis | Nível de participação | Taxa de juros | Prazo de pagamento | Limite Financiamento |
|-------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|--------------|----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| Média grande e grande empresa | Banco de Desenvolvimento do Extremo Sul | Médias e grandes empresas com faturamento superior a R\$ 90 milhões | Todos | Recursos Financeiros | <p>Obras civis, montagens e instalações; Máquinas e equipamentos novos;</p> <p>Máquinas e equipamentos usados, de fabricação nacional;</p> <p>Gastos com Estudos e Projetos de Engenharia;</p> <p>Gastos com: Qualidade e Produtividade, Pesquisa e Desenvolvimento. Atualização Tecnológica e</p> <p>Reforma de equipamentos e instalações de grande porte</p> | De 50% a 90%, dependendo do setor de atividade e local do projeto. Os projetos de implantação terão participação máxima de financiamento de 50% | Variáveis conforme o porte, o setor de atividade e o local do projeto. | Até 120 meses | Não informado |

Fonte: Banco de Desenvolvimento do Extremo Sul (2017b).

Quadro 29 - Banco de Desenvolvimento do Nordeste - Linha Programa de Apoio ao Desenvolvimento da Agroindústria do Nordeste

| Linha | Instituição | Porte | Setor | Instrumento | Itens financiáveis | Nível de participação | Taxa de juros | Prazo de pagamento | Limite Financiamento |
|-------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------|---------------|----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|----------------------|
| Programa de Apoio ao Desenvolvimento da Agroindústria do Nordeste | Banco de Desenvolvimento do Nordeste | Pequena, média e grande | Agroindústria | Recursos financeiros | Implantação, expansão, modernização de empreendimentos agroindustriais; Gastos com construção para reforma e/ou ampliação de benfeitorias e instalações. Aquisição de veículos; Modernização de máquinas e equipamentos; Gastos com frete para transporte e/ou montagem de máquinas e equipamentos; Elaboração de estudos ambientais e Capital de giro. | Entre 80% e 100%, de acordo com o porte da organização | Entre 9% a.a e 15,9% a.a, de acordo com a finalidade do projeto e porte da organização | Entre 8 meses e 15 anos, de acordo com a finalidade do projeto | Não informado |

Fonte: Banco de Desenvolvimento do Nordeste (2017a).

Quadro 30 - Banco de Desenvolvimento do Nordeste - Linha Proinf

| Linha | Instituição | Porte | Setor | Instrumento | Itens financiáveis | Nível de participação | Taxa de juros | Prazo de pagamento | Limite Financiamento |
|--------|--------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Proinf | Banco de Desenvolvimento do Nordeste | Micro, pequenas, médias, grandes empresas e administração pública direta | Energia, telecomunicação, saneamento, transporte e logística | Recursos Financeiros | Implantação, ampliação, recuperação e modernização de ativos fixos; Investimentos em máquinas e equipamentos novos produzidos no Brasil Gastos com estudo de projetos de engenharia; Gastos com a implantação de qualidade e produtividade; pesquisa e desenvolvimento; atualização tecnológica; e tecnologia da informação; | Entre 80% e 100%, de acordo com o porte da organização | TJLP + 4% a.a + IOF e tarifas | O prazo máximo das operações será determinado de acordo com o fluxo de caixa do projeto e a capacidade de pagamento do proponente, sendo limitado a 15 anos, aí já incluídos até 3 anos de carência. | Máximo de R\$ 150 milhões, valor superior a esse limite poderão ser contratados, desde que considerados relevantes pelo Banco e atendam a premissa de geração ou manutenção de emprego e renda |

Fonte: Banco de Desenvolvimento do Nordeste (2017b).

Quadro 31 - Banco de Desenvolvimento do Nordeste - Linha Pro infra

| Linha | Instituição | Porte | Setor | Instrumento | Itens financiáveis | Nível de participação | Taxa de juros | Prazo de pagamento | Limite Financiamento |
|--------------|--------------------------------------|---------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| Pro infra | Banco de Desenvolvimento do Nordeste | Micro, pequenas, médias, grandes empresas e empresas públicas | Energia, telecomunicação, saneamento, transporte e logística | Recursos Financeiros | Geração, transmissão e distribuição de energia oriunda de fontes convencionais e de fontes renováveis; Obras de expansão da rede de distribuição de energia elétrica; Oferta de água para uso múltiplo; Infraestrutura de transporte; Saneamento básico; Telefonia fixa e móvel e exploração de gás natural | De 70% até 100% de acordo com o porte da organização | De 9% a.a até 10, 59% a.a dependendo da finalidade do projeto | De 12 até 20 anos dependendo da finalidade do projeto. Projetos de geração de eletricidade a partir de fontes renováveis podem obter até 8 anos de carência. | Não informado |

Fonte: Banco de Desenvolvimento do Nordeste (2017c).

Quadro 32 - Banco de Desenvolvimento do Nordeste - Linha Programa de Apoio ao Setor Industrial do Nordeste

| Linha | Instituição | Porte | Setor | Instrumento | Itens financiáveis | Nível de participação | Taxa de juros | Prazo de pagamento | Limite Financiamento |
|---------------------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------|----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------|
| Programa de Apoio ao Setor Industrial do Nordeste | Banco de Desenvolvimento do Nordeste | Empresas de pequeno, médio e grande porte | Indústria e mineração | Recursos financeiros | Investimentos, inclusive a aquisição de empreendimentos com unidades industriais já construídas ou em construção; Capital de giro; Gastos com construção, reforma e ampliação; Aquisição de veículos utilitários; Gastos com pesquisa mineral e caracterização de minérios; Modernização de máquinas e equipamentos. | De 70% até 100% dependendo do porte da empresa | De 9% a.a até 10,59% a.a dependendo do porte da empresa | De 12 até 15 anos dependendo da natureza do projeto | Não informado |

Fonte: Banco de Desenvolvimento do Nordeste (2017d).

Quadro 33 - Banco de Desenvolvimento do Nordeste - Linha Programa de Apoio ao Desenvolvimento Rural do Nordeste

| Linha | Instituição | Porte | Setor | Instrumento | Itens financiáveis | Nível de participação | Taxa de juros | Prazo de pagamento | Limite Financiamento |
|--------------------------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------|--------------|----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| Programa de Apoio ao Desenvolvimento Rural do Nordeste | Banco de Desenvolvimento do Nordeste | Micro, pequeno, médio e grande produtor | Agrícola | Recursos financeiros | <p>Construção, reforma e ampliação de benfeitorias e instalações permanentes;</p> <p>Instalações, máquinas, implementos, equipamentos, inclusive para beneficiamento ou industrialização exclusivamente da produção própria, tratores, colheitadeiras, veículos e embarcações.</p> | De 70% até 100% dependendo do porte da empresa | De 7,65% a.a até 10% dependendo do porte da empresa | <p>Investimentos fixos: até 12 anos, já carência.</p> <p>Investimentos semifixos: até 8 anos, incluídos até 3 anos de carência.</p> <p>Investimentos em armazenagem: até 15 anos, incluídos até 5 de carência.</p> | Não informado |

Fonte: Banco de Desenvolvimento do Nordeste (2017e).

Quadro 34 - Banco de Desenvolvimento do Nordeste - Linha Programa de Aplicação de Recursos Obrigatórios

| Linha | Instituição | Porte | Setor | Instrumento | Itens financiáveis | Nível de participação | Taxa de juros | Prazo de pagamento | Limite Financiamento |
|------------------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|--------------------------|----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|---------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| Programa de Aplicação de Recursos Obrigatórios | Banco de Desenvolvimento do Nordeste | Pequeno, médio e grande produtor | Agricultura e psicultura | Recursos financeiros | Construção, reforma e ampliação de benfeitorias e instalações permanentes, aquisição de máquinas, implementos e equipamentos, aquisição de animais para reprodução, cria ou serviço, aquisição de veículos com capacidade superior a 04 toneladas, bem como outros itens necessários ao desenvolvimento da atividade agropecuárias. | Não informado | 9,50% a.a + tarifas e IOF | Investimento fixo: até 12 anos, incluída a carência de até 4 anos; Investimento semifixo: até 6 anos, incluída a carência de até 3 anos. | Não informado |

Fonte: Banco de Desenvolvimento do Nordeste (2017f).