UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA E SANEAMENTO

LUIZ FELIPE LOMANTO SANTA CRUZ

Viabilidade técnica/econômica/ambiental das atuais formas de aproveitamento da
vinhaça para o Setor Sucroenergético do Estado de São Paulo

SÃO CARLOS – SP
2011

LUIZ FELIPE LOMANTO SANTA CRUZ

Viabilidade técnica/econômica/ambiental das atuais formas de aproveitamento da vinhaça para o Setor Sucroenergético do Estado de São Paulo

Dissertação apresentada ao Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Mestre em Hidráulica e Saneamento.

Área de Concentração: Gestão de Resíduos Sólidos e Geração de Energia

Orientador: Prof. Titular Eduardo Cleto Pires

SÃO CARLOS – SP
2011

Nome: CRUZ, Luiz Felipe Lomanto Santa

Título: Viabilidade técnica/econômica/ambiental das atuais formas de aproveitamento da vinhaça para o Setor Sucroenergético do Estado de São Paulo.

Dissertação apresentada ao Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Mestre em Hidráulica e Saneamento.

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr. _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

“AQUILO QUE VOCÊ FAZ NÃO PODE SER
MAIOR DO QUE AQUILO QUE VOCÊ SIGNIFICA.”

Fábio de Melo

“TUDO NESTA VIDA É UM TÉDIO. O SEGREDO
É DESCOBRIR UM MOTIVO PARA SORRIR.”
Dr. Gregory House

RESUMO

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

O aproveitamento atual da vinhaça, subproduto da produção do álcool pelas Destilarias Autônomas e Usinas de Açúcar e Álcool, se faz tanto pelo seu valor nutricional quanto pelo seu potencial na geração de energia elétrica. A vinhaça, que antes era lançada diretamente nos cursos d'água, a partir da década de 70, com o aumento dos preços dos fertilizantes minerais, passou a ser reutilizada como subproduto para a adubação canavieira. Recentemente, com a evolução da política ambiental do Setor, suas práticas agroindústrias passaram a priorizar o uso eficiente de seus subprodutos, seja através da racionalização em suas aplicações ou pelo uso de tecnologias que potencializem os seus benefícios. Esse estudo resumiu-se em analisar a viabilidade técnica, mensurar os aspectos econômicos e caracterizar os aspectos ambientais das tecnologias de condicionamento e aproveitamento da vinhaça mais difundidas no Brasil e, em especial, no Estado de São Paulo: aplicação in natura no solo (fertirrigação in natura), biodigestão e concentração. A análise técnica se baseou na utilização dessas tecnologias pelas Unidades Agroindustriais estudadas e na oferta de mercado por parte de empresas de tecnologia. Para a análise econômica da fertirrigação in-natura, a substituição da adubação mineral e os lucros obtidos foram os parâmetros utilizados. Já na análise da biodigestão e da concentração, o modelo foi construído a partir dos seguintes indicadores econômicos: fluxo de caixa, valor presente líquido, método do custo/benefício, taxa interna de retorno e período de retorno. Como parte final, a análise ambiental foi direcionada para a mitigação dos impactos gerados pela aplicação in natura, em especial as emissões de gases de efeito estufa (GEE). A viabilidade técnica foi confirmada para as três tecnologias, seja pela utilização em campo e/ou pela diversificada oferta das tecnologias de biodigestão e concentração pelo mercado especializado. Quanto à viabilidade econômica, a fertirrigação in natura se demonstrou altamente lucrativa para o Brasil, Estado de São Paulo e Centro-Sul do País. Já a biodigestão, que necessitou de tecnologias complementares de geração

de energia para a análise de sua viabilidade, apresentou-se viável quando associada aos queimadores e turbinas em todas as condições estudadas. Quando associada aos motogeradores, a sua viabilidade foi atestada em duas ocasiões. Contudo, a inviabilidade apresentada quando os cálculos foram baseados em valores de venda de energia atualizados – média de R\$102,41 por MWh produzido - justificou a ausência desses projetos nos últimos leilões de energia. Ao contrário das outras tecnologias, a tecnologia da concentração se demonstrou completamente inviável a partir das condições econômicas utilizadas. Já na questão ambiental, a fertirrigação in natura apresentou diversas vantagens e desvantagens, ficando a sua utilização condicionada a estudos locais. Para a biodigestão e a concentração, essas tecnologias apresentaram diversos ganhos frente à utilização in natura, sendo a primeira responsável pela mitigação dos GEE e a segunda pela maior racionalização na aplicação de vinhaça e por um melhor equacionamento dos altos volumes de água utilizados pelas Usinas e Destilarias.

Palavras-chave: vinhaça, valores nutricionais, reutilização, in natura, biodigestão, concentração, técnica, econômica, geração de energia, ambiental, racionalização.

ABSTRACT

CRUZ, L. F. L. S. **Technical / economic / environmental feasibility of current forms of reclamation of vinasse to the sugarcane industry of São Paulo.** 2011. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

The current use of vinasse, a byproduct of ethanol production by independent distilleries and Sugar and Alcohol plants, is done both for its nutritional value as for its potential in generating electricity. By mid-century the vinasse was released directly into water streams as final disposal, resulting in serious environmental problems. From the 70's, with the rising prices of mineral fertilizers, the reuse of this byproduct fertilizer for sugar cane production became practical. Recently, with the evolution of environmental policy of this sector, agribusiness practices began to prioritize the efficient use of byproducts, either by rationalizing their application or by the use of technologies that enhance its benefits. This study is summarized in analyze the technical feasibility, measure the economic aspects and characterize the environmental aspects of the technologies of conditioning and reuse of vinasse more widespread in Brazil and, in particular, the state of São Paulo: natural application, biodigestion and concentration. Technical analysis was based on the use of these technologies by agro-industrial units studied and market supply by technology companies. For the economic analysis of the natural application, the substitution of mineral fertilizer and profits were the parameters used. For the analysis of biodigestion and concentration, the model was constructed from the following economic indicators: cash flow, net present value method, the cost / benefit ratio, internal rate of return and payback period. As the final part, the environmental analysis was aimed at mitigating the impacts generated by the natural application, in especial, the emissions of greenhouse gases (GHGs). The technical feasibility has been confirmed for the three technologies, either for the use in the field, by a wide advantage for the natural application, or the supply of biodigestion and concentration technologies by the specialized market. For the economic feasibility, natural application has been shown highly profitable for Brazil, Sao Paulo State and Center-South of the country. The biodigestion, which required complementary generate energy technologies for your viability analysis, presented feasible when combined

with the flares and turbines in all conditions studied. When associated with the motor generator, its feasibility was attested on two occasions. However, its feasibility wasn't reached when the calculations were based on recent values of power sales - an average of R\$ 102.41 per MWh produced - justifying the absence of these projects in recent energy auctions. Unlike other technologies, the technology of concentration is shown completely unfeasible from the economic conditions used. In the environmental issue, the natural application presented several advantages and disadvantages, being its use conditioned to local studies. For biodigestion and concentration, these technologies had several gains when compared with the natural application, being, the first, responsible for the mitigation of GHG's and, the second, responsible for an application more rational of vinasse and for a reduction of the high volumes of water used by plants and distilleries.

Keywords: vinasse, nutritional values, reuse, natural, biodigestion, concentration, technical, economic, power generation, environmental, rationalization.

LISTA DE ORGANOGRAMAS

Fluxograma 01 - Rota de geração e reuso dos subprodutos da produção canavieira	28
---	----

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 01- Panorama da produção canavieira brasileira, centro-sulista e paulistana desde a década de 90 até os dias de hoje.....	25
Gráfico 02 - Panorama do cultivo e da colheita da cultura da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo nas últimas quatro safras.....	27
Gráfico 03 - Panorama da produção de vinhaça pelo Setor Sucroenergético da década de 90 até os dias de hoje.....	32

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Desenho esquemático de um reator UASB.....	38
Figura 02 – Esquema do funcionamento de um queimador enclausurado.....	60
Figura 03 – Esquema do funcionamento dos quatro tempos do Motor Ciclo Otto	61
Figura 04 – Esquema do funcionamento de uma turbina a gás.....	62
Figura 05 – Diagrama de um fluxo de caixa padrão no tempo.....	64
Figura 06 – Aplicação racional da vinhaça concentrada.....	75
Figura 07 – Caminhão para transporte de vinhaça.....	77
Figura 08 – Hidroroll.....	77
Figura 09 – Representação das áreas de cultivo e fertirrigadas da Usina.....	80
Figura 10 – Biodigestores Dedini em escala industrial.....	89
Figura 11 – Desenhos esquemáticos dos reatores de leito de lodo com recirculação interna.....	89
Figura 12 – Fluxograma do sistema integrado Brasmetano.....	91
Figura 13 – Concentrador de vinhaça ECOVIN em escala industrial.....	94
Figura 14 – Desenhos esquemáticos dos concentradores – Ecovin e Ecovin JL.	95
Figura 15 – Concentrador de vinhaça Dedini- Benchmark em escala industrial...	96
Figura 16 – Fluxograma do sistema de concentração Dedini- Benchmark.....	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Composição da vinhaça gerada a partir de diferentes mostos.....	30
Tabela 02 - Área de cultivo e produção de álcool da região Centro-Sul e do Brasil.....	45
Tabela 03 - Quantidade e custo dos fertilizantes utilizados na cultura da cana....	46
Tabela 04 - Dosagens médias de aplicação de vinhaça in-natura.....	47
Tabela 05 - Nutrientes aplicados na adubação da cana-de-açúcar no Brasil.....	48
Tabela 06 - Relação entre as classes INPE e as classes definidas para o estudo.....	49
Tabela 07 - Caracterização físico-química da vinhaça.....	51
Tabela 08 - Unidade Produtiva Padrão (usina de médio porte).....	57
Tabela 09 - Parâmetros da planta de biodigestão	59
Tabela 10 - Parâmetros do processo de biodigestão.....	59
Tabela 11 - Comparação entre tecnologias de conversão.....	63
Tabela 12 - Posição quanto ao investimento baseado no VPL calculado.....	66
Tabela 13 - Posição entre investimento concorrentes baseado em VPL calculados.....	67
Tabela 14 - Módulo dos VPL calculados.....	67
Tabela 15 - Parâmetros da planta de concentração.....	76
Tabela 16 - Custo de transporte e aplicação de vinhaça - caminhões e hidroroll	78
Tabela 17 - Parâmetros e premissas (Receita do Subproduto).....	82
Tabela 18 - Unidades Agroindustriais aderentes ao Protocolo (safra 2009/2010)	85
Tabela 19 - Análise Econômica para o Cenário I da aplicação in-natura.....	99
Tabela 20 - Análise Econômica para o Cenário II da aplicação in-natura.....	100
Tabela 21 - Análise Econômica para o Cenário III da aplicação in-natura.....	101
Tabela 22 - Análise Econômica para o Cenário IV da aplicação in-natura.....	102
Tabela 23 - Variáveis calculadas para obtenção do custo do biogás.....	104

Tabela 24 - Estimativa de custos e receitas para os cenários estudados.....	106
Tabela 25 - Fluxo de caixa, valor presente e uniforme líquido Cenário 1.....	108
Tabela 26 - Variáveis Econômicas para o Cenário 1.....	108
Tabela 27 - Fluxo de caixa, valor presente e uniforme líquido Cenário 2 (PRO-INFA).....	110
Tabela 28 - Fluxo de caixa, valor presente e uniforme líquido Cenário 2 (A-3/2010).....	111
Tabela 29 - Fluxo de caixa, valor presente e uniforme líquido Cenário 2 (A-3/2011).....	111
Tabela 30 - Variáveis Econômicas para o Cenário 2.....	112
Tabela 31 - Fluxo de caixa, valor presente e uniforme líquido Cenário 3 PROIN-FA.....	114
Tabela 32 - Fluxo de caixa, valor presente e uniforme líquido Cenário 2 (A-3/2010).....	115
Tabela 33 - Fluxo de caixa, valor presente e uniforme líquido Cenário 2 (A-3/2011).....	116
Tabela 34 - Variáveis Econômicas para o Cenário 3.....	116
Tabela 35 - Fluxo de caixa, valor presente e uniforme líquido Concentrador.....	118
Tabela 36 - Variáveis Econômicas do Concentrador.....	118
Tabela 37 - Potenciais impactos no solo, na água e no ar ocasionados pela aplicação da vinhaça in natura no solo agrícola.....	121
Tabela 38 - Redução equivalente das emissões de GEE por tecnologia adotada.....	124
Tabela 39 - Valores de captação e consumo da unidade produtiva padrão.....	126
Tabela 40 - Economia de água com a reutilização do condensado.....	126

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 OBJETIVOS	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1 Histórico da Cana-de-Açúcar no Brasil	22
2.2 Do Proálcool aos dias de hoje	23
2.3 O Setor no Estado de São Paulo.....	24
2.3.1 Protocolo Agroambiental do Setor Sucroalcooleiro	26
2.4 Subprodutos do Setor Sucroenergético.....	27
2.5 Vinhaça e Aplicações.....	29
2.5.1 Vinhaça e seus aspectos ambientais.....	32
2.6 Técnicas de Reutilização da Vinhaça	34
2.6.1 Aplicação “in natura” no solo	34
2.6.2 Biodigestão anaeróbia	35
2.6.3 Concentração	38
2.7 Cenário Energético Atual do Estado de São Paulo	39
2.8 Geração de Energia Elétrica a partir da Biodigestão da Vinhaça	40
2.9 Avaliações Econômicas de Projetos	41
3 METODOLOGIA.....	42
3.1 Análises Técnicas	42
3.1.1 Aplicação “in natura” no solo	42
3.1.2 Biodigestão.....	42
3.1.3 Concentração	43
3.2 Análises Econômicas.....	44
3.2.1 Aplicação “in natura” no solo	44
3.2.2 Biodigestão.....	56
3.2.3 - Concentração	75
3.3 Análises Ambientais.....	83
3.3.1 Aplicação “in natura” no solo	83
3.3.2 Biodigestão.....	83
3.3.3 Concentração	84
4 RESULTADOS E ANÁLISES	85
4.1 Viabilidade Técnica.....	85
4.1.1 Aplicação “in natura” no solo	85

4.1.2 Biodigestão.....	87
4.1.3 Concentração	92
4.2 Viabilidade Econômica.....	98
4.2.1 Aplicação in-natura no solo.....	98
4.2.2 Biodigestão.....	104
4.2.3 Concentração	117
4.3 Viabilidade Ambiental	119
4.3.1 Aplicação in-natura no solo.....	119
4.3.2 Biodigestão.....	123
4.3.3 Concentração	124
5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	127
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	131

1 INTRODUÇÃO

Desde a Revolução Industrial Inglesa, em meados do século XVIII, até os dias de hoje, a humanidade vem se utilizando dos inúmeros recursos (naturais ou não) disponíveis a fim de alcançar níveis de desenvolvimento cada vez maiores, seja na busca de benfeitorias para os seres humanos em geral ou, em sua grande maioria, para o simples conforto da minoria concentradora de riquezas.

Durante todo este tempo, pouca atenção foi dada para as consequências que esta posição antropocêntrica poderia estar causando e, o mais importante, que compartimento espacial estaria recebendo o ônus desse abuso descontrolado no uso desses recursos. Essa falta de preocupação é injustificável quando se constata que nesta mesma época, mais precisamente a partir de 1760, já se tinha o conhecimento de que nunca se cria ou se elimina uma matéria, sempre se transforma em outra substância que traz consigo, muitas vezes, consequências prejudiciais para o planeta e para os próprios seres humanos (Lei de Conservação das Massas de Lavoisier).

Inclui-se nesse contexto a atuação dos grandes setores agrícola e industrial que sempre voltaram suas atenções para a busca de novas tecnologias e procedimentos mais eficazes, objetivando vantagens produtivo-econômicas, sem se comprometer com os prejuízos que poderiam estar gerando para a qualidade ambiental do planeta. Segundo Pereira (2009), predominavam práticas e discursos que revelavam um posicionamento antagônico a qualquer iniciativa de minimizar os impactos ambientais decorrentes da atividade produtiva. Os argumentos giravam em torno de que os custos adicionais para as empresas, resultantes dos gastos em controle da poluição, comprometeriam a lucratividade, a competitividade e a oferta de empregos e, deste modo, gerariam prejuízos às partes interessadas: trabalhadores, acionistas e consumidores.

Soma-se a isso, o total descaso, tanto público quanto da sociedade, com o posicionamento tomado por esses grandes setores, sendo que os primeiros movimentos contra esse padrão produtivo começaram apenas no final do século XX, mais especificamente em 1972, com a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano. Conhecida como Conferência de Estocolmo e realizada em 1972 em Estocolmo, na Suécia, foi a primeira Conferência Global voltada para o meio

ambiente, e é considerada um marco histórico político internacional, decisivo para o surgimento de políticas de gerenciamento ambiental, direcionando a atenção das nações para as questões ambientais. (PASSOS, 2009).

A partir desse período, os empreendimentos produtivos, sejam eles industriais ou agrícolas, passaram a sofrer pressões de uma sociedade mais consciente de seus deveres e pretensões. Essa nova sociedade, alicerçada pelo poder público, começou a exigir, desses setores, práticas produtivas mais racionais e ambientalmente corretas, ou seja, o comprometimento com questões que até algumas décadas atrás não estavam incluídas em seus planejamentos empresariais. Vale ressaltar que as reivindicações, até esse momento, voltavam-se para as questões sociais, ou seja, para as melhores condições do trabalhador, a integridade física do homem em seu ambiente de trabalho. Iniciava-se então uma nova era, na qual a busca pela eficiência econômica de uma empresa deveria estar atrelada as questões sociais e ambientais (responsabilidade sócio-ambiental). Muitos foram os desafios encontrados por esses setores para inserção do “comprometimento ambiental” no ambiente produtivo de suas atividades, confrontando-se muitas vezes com práticas inviáveis do ponto de vista econômico, mas necessários do ponto de vista ecológico.

Um dos setores que precisou readequar seu sistema produtivo às novas exigências ambientais, seja por pressões da sociedade ou visando ganhos em competitividade, uma vez que essas mudanças, quando bem gerenciadas, trazem consigo benefícios econômicos, foi o Setor Sucroenergético, principalmente, da região centro-sul do Brasil.

As preocupações sociais e ambientais eram tratadas como meras externalidades da agroindústria canavieira: custos indesejados; problemas ocultos, vistos com naturalidade pela sociedade em geral, mas esse cenário passou por fortes mudanças nas últimas décadas, graças ao avanço das discussões trabalhistas e ambientais, tanto no Brasil, quanto nos foros internacionais. (STRAPASSON, 2006).

Trazida para o Brasil durante o período colonial, a atividade canavieira foi a primeira atividade agroindustrial do Brasil, sendo que, ainda no século XVI, o Brasil já alcançava o monopólio da produção de açúcar (FIGUEIREDO, 2008).

Segundo o próprio Figueiredo (2008), após um período áureo que perdurou até 1630, a atividade sofreu com momentos de apogeu e declínio em solo brasileiro, seja pela competição com produtores estrangeiros (açúcar dos países europeus) ou

com culturas locais mais vantajosos (cultura do café), situação que se manteve até meados do século XX. A retomada do processo de valorização da atividade teve início nas últimas décadas do século XX, sendo desencadeada, de acordo com Ramos (2008), pela valorização do açúcar e os altos preços do petróleo no mercado mundial. A partir desse momento, favorecido pelas condições nacionais e internacionais, iniciou-se uma fase de estímulos governamentais para o Setor Sucroenergético, culminando com a implantação do programa nacional do álcool: “Pró-Álcool”. De acordo com Leite (2010), esse programa tinha a finalidade de fornecer ao mercado interno um combustível líquido alternativo a um dos derivados do petróleo, a gasolina.

Com os recursos financiados do Proálcool, ocorreu a instalação e/ou ampliação de destilarias anexas, bem como a instalação de destilarias autônomas a partir de 1977, principalmente para a fabricação de álcool hidratado, com o que surgiram novas fábricas principalmente na região Centro/Sul, montadas quer por tradicionais produtores, quer por novos, tanto em terras que eram utilizadas na pecuária extensiva como na produção de outras lavouras. (RAMOS, 2008).

Após sofrer com a retomada da produção petrolífera mundial e o desaquecimento do Setor, a atividade passou a atrair nesse novo século as atenções do setor privado e, sobretudo, do poder público, influenciado tanto pelo seu reduzido potencial poluidor, quando comparado à gasolina, quanto pelo seu alto potencial na geração renovável de energia elétrica.

Conhecida por ser uma atividade geradora de grandes quantidades de subprodutos, como por exemplo, bagaço, torta de filtro, cinzas da caldeira, areia de lavagem, fuligem e vinhaça, o Setor Sucroenergético precisou se adequar com o passar dos tempos, a fim de atender o novo modelo produtivo que se estabelecia no cenário mundial. Inúmeros avanços foram alcançados durante todo o período de desenvolvimento dessa atividade no país, quase sempre baseados no Princípio de Reuso desses subprodutos, favorecendo a ciclagem de nutrientes e reduzindo a supressão das jazidas minerais. Portanto, grande parte desses materiais já vem, com o passar dos tempos, sendo reaproveitado dentro da própria unidade produtiva, seja ela industrial ou agrícola.

Apesar do reaproveitamento de quase 100% de muitos desses materiais, alguns passaram a ocasionar problemas advindos dos novos usos atribuídos a eles. Encontra-se inserido nesse contexto o processo de aplicação da vinhaça

diretamente ao solo como mecanismo de fertirrigação. Caracterizada como um subproduto da produção do etanol, gerada durante a etapa de destilação do caldo da cana (mais especificamente do vinho), a vinhaça ou vinhoto tem sido largamente empregada nas áreas canavieiras como forma de substituição dos fertilizantes minerais, principalmente após o Decreto de Lei nº 303, de 28 de fevereiro de 1967, que proibiu definitivamente a sua disposição nos rios, lagos e cursos d'água, devido ao seu alto potencial poluidor (MUTTON, 2007).

Uma das principais características do subproduto vinhaça são os enormes volumes produzidos na própria fábrica processadora da cana-de-açúcar. Segundo Wilkie et al. (2000), apud Ribas (2006), outras características importantes são: o elevado teor orgânico, elevada temperatura, e a grande quantidade de sais minerais, com destaque para o potássio. No entanto, o uso descontrolado e fundamentado apenas na busca de novos patamares de produtividade/vantagens econômicas, vem levantando há muitos anos preocupações quanto a possíveis comprometimentos do próprio solo e de outros compartimentos ambientais, como por exemplo, as águas subterrâneas. Atribui-se a isso os altos valores de matéria orgânica, sais e de nutrientes existentes nesse subproduto. No Estado de São Paulo os órgãos ambientais já vêm há algum tempo se munindo de ferramentas legais a fim de regularizar o uso indiscriminado desse resíduo, culminado com a Portaria Estadual nº4.231, estabelecida pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), que definiu critérios e procedimentos para a aplicação da vinhaça no solo agrícola (CETESB, 2006).

Vale ressaltar que a produção canavieira brasileira vem apresentando um momento de expansão em termo de áreas e de produção nas últimas décadas, influenciada pelo aumento do uso de álcool tanto no mercado interno (carros flex-fuel e percentual de álcool na gasolina) quanto do mercado externo (busca por combustíveis mais limpos). Além disso, apesar dos altos volumes de vinhaça produzidos, a sua aplicação "in natura" se torna inviável a partir de distâncias maiores do que trinta e sete (37) quilômetros (NETO, 2008), visto que o custo com o transporte desse fertilizante representa grande parte do custo total para a fertilização dos canaviais, constatação esta que estimula a pesquisa por técnicas que viabilizem o seu uso em distâncias maiores.

Surge, portanto, como forma de readequar o uso da vinhaça para a recuperação da fertilidade do solo, a possibilidade de um tratamento preliminar desse produto antes de sua aplicação ao solo. Além disso, algumas técnicas apresentam ganhos econômicos suplementares uma vez que proporcionam desde a redução no volume a ser aplicado (consequente redução do custo no manuseio) até a geração de subprodutos com valor econômico agregado (biogás).

2 OBJETIVOS

Analisar a viabilidade técnica, mensurar os aspectos econômicos e caracterizar os aspectos ambientais das atuais formas de condicionamento e reutilização da vinhaça utilizadas pelas Unidades Agroindustriais Sucroenergéticas do Estado de São Paulo, do Centro-Sul e do Brasil, caracterizando-as da seguinte forma:

- Aplicação in natura no solo (fertirrigação in natura) visando à redução do uso de fertilizantes industriais;
- Biodigestão com utilização do biogás na geração de energia elétrica e aplicação no solo;
- Concentração (evaporação) objetivando a flexibilização e a redução dos custos no manuseio do subproduto; e aplicação no solo;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Histórico da Cana-de-Açúcar no Brasil

Segundo Figueiredo (2008), Martim Afonso de Souza foi o primeiro a trazer mudas de cana-de-açúcar para o Brasil, na capitania hereditária de São Vicente, São Paulo, onde alcançou prosperidade nos primeiros anos de exploração dessa cultura.

Favorecido pela política de colonização de Dom João III que tinha a finalidade de estimular a ocupação do território brasileiro garantindo assim a manutenção de seus limites territoriais nas Américas, a cana-de-açúcar expandiu-se rapidamente para outras regiões da costa brasileira. Bahia, Piauí, Alagoas, Paraíba, Pernambuco são exemplos claros dessa expansão com finalidades tanto políticas quanto econômicas.

A região de Pernambuco é intitulada como uma das regiões que mais retratavam o ambiente instável e de sucessivas mudanças que prevalecia sobre o Brasil Colônia nesse momento, principalmente pela ocupação holandesa nesse território. De acordo com Andrade (1965), apud Figueiredo (2008), essa ocupação foi motivada pelo bloqueio estabelecido por Felipe II, governante da Espanha e de Portugal na época, ao comércio do açúcar produzido em seus territórios por parte dos comerciantes holandeses e ingleses que já vinham realizando essa atividade por décadas. Decididos a não perder os lucros da comercialização do açúcar, os holandeses resolveram apoderar-se da área produtora em 1630, permanecendo até 1654.

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

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

Com a primeira crise do petróleo na década de 70, o país se viu na obrigação de buscar novas fontes de energia para substituí-lo, uma vez que o Brasil nessa época importava 79% de suas necessidades externas de petróleo (SÃO PAULO, 1976). Silva et al. (2005) ressalta que embora o Proálcool tenha sido criado em 1975, somente na década de 80, após o segundo choque do petróleo, em 1979, é que ocorreu um crescimento vigoroso em investimentos, subsídios e produtividade; em vista disso, as áreas de produção de cana aumentaram expressivamente no Brasil.

2.2 Do Proálcool aos dias de hoje

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

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

Outro ponto relevante desse processo foi o surgimento de motores especialmente desenvolvidos para funcionar com etanol hidratado. Em 1984, os

carros a etanol passaram a responder por 94,4% da produção das montadoras instaladas no Brasil (UNICA, 2008).

O programa brasileiro de álcool passou por fases distintas durante as mais de três décadas de implantação no país, desde expansões até momentos de estagnação, sendo todas influenciadas diretamente pela flutuação da oferta e dos preços do barril de petróleo no mercado mundial. Entretanto, nota-se hoje que associada ao fator econômico do petróleo encontra-se a preocupação ambiental da população mundial, ou seja, a escolha pelo uso de fontes de energia renováveis, menos poluentes. O aumento expressivo de automóveis que se utilizam tanto da gasolina quanto do álcool demonstra esse comprometimento.

Trinta anos depois do início do Proálcool, o Brasil vive agora uma nova expansão dos canaviais com o objetivo de oferecer, em grande escala, esse combustível alternativo. O plantio avança além das áreas tradicionais, do interior paulista e do Nordeste, e espalha-se pelos cerrados. A nova escalada não é um movimento comandado pelo governo, como a ocorrida no final da década de 70, quando o Brasil encontrou no álcool a solução para enfrentar o aumento abrupto dos preços do petróleo que importava. A corrida para ampliar unidades e construir novas Unidades Agroindustriais é movida por decisões da iniciativa privada, convicta de que o álcool terá, a partir de agora, um papel cada vez mais importante como combustível, no Brasil e no mundo. (Biodieselbr online LTDA, 2010).

2.3 O Setor no Estado de São Paulo

Preferencialmente, as Unidades Agroindustriais de açúcar e etanol situaram-se junto às regiões produtoras de cana. Favorecido pelas excelentes condições de solo e clima, a existência de uma adequada infraestrutura de transportes, a proximidade dos mercados consumidores e uma ativa base de desenvolvimento científico e tecnológico, o Estado de São Paulo absorveu grande parte das Unidades Agroindustriais nas últimas décadas. Segundo Neto (2009), das 356 Unidades Produtoras Sucroenergéticas do país, 196 se encontravam no Estado de São Paulo.

Por outro lado, Nogueira (2008) afirma que, nos últimos anos, com a relativa saturação das áreas disponíveis nesse estado e a elevação dos custos da terra, as novas unidades de produção têm se instalado em áreas anteriormente ocupadas por pastagens (ao contrário do declarado por muitas organizações que responsabilizam a expansão da cultura canavieira pela redução das áreas de cultura alimentícia) e, em menor grau, por cultivos anuais na região do Triângulo Mineiro, Sul de Goiás e Sudeste do Mato Grosso do Sul, áreas contíguas às tradicionais regiões produtoras de cana do Centro-Sul brasileiro. Dentre esses novos pilares do Setor Sucroenergético, Minas Gerais foi o Estado cuja produção mais cresceu nos últimos cinco anos, com aumento de 1,8% (seguido por Goiás, com 1,6%) (NEVES, 2010).

Apesar dessa reestruturação espacial da cultura canavieira, o Estado de São Paulo, continua apresentando participação significativa em relação à produção nacional. O Gráfico 01 destaca a alta participação do Estado de São Paulo em relação à produção de cana-de-açúcar brasileira (alcançando 61% na safra, 2008/2009) e, mais importante, demonstra que a produção paulista manteve-se em constante expansão desde o início da última década.

Gráfico 01 – Panorama da produção canavieira brasileira, centro-sulista e paulistana desde a década de 90 (dados: UNICA 2010).

2.3.1 Protocolo Agroambiental do Setor Sucroalcooleiro

Outro grande avanço alcançado pelo Setor Sucroenergético Paulistano, desta vez em parceria com a Secretaria de Meio Ambiente e a Secretaria de Agricultura, foi a assinatura de um Protocolo Agroambiental destinado a adequação ambiental das Unidades Agroindustriais e Associações de Fornecedores de Cana.

Em seu quinto ano de atuação no Estado de São Paulo, o instrumento abrange alguns dos principais pontos de redução de impactos dessa cultura. Entre eles, a antecipação dos prazos de eliminação da queima da palha da cana, a proteção dos remanescentes florestais (matas ciliares) de nascentes e de cursos d'água, o controle das erosões e melhores práticas de uso do solo, o adequado gerenciamento das embalagens de agrotóxicos, além da redução de consumo de água no processo industrial. O Protocolo Agroambiental visa reconhecer e premiar as boas práticas ambientais do Setor Sucroenergético com um certificado de conformidade, renovado anualmente. Por meio da publicidade do certificado concedido às Unidades Agroindustriais e às Associações de Fornecedores de Cana, o Protocolo influencia na imagem dessas organizações frente ao mercado interno e externo, determinando um padrão positivo de planos e metas de adequação ambiental a ser seguido (PROJETO ETANOL VERDE, 2011).

Vale ressaltar que esta é uma iniciativa pioneira entre as unidades federativas do território Brasileiro, apresentando resultados promissores dentro de um cenário que, até pouco tempo, era marcado pelo total descaso quanto às questões ambientais. Quanto aos avanços ambientais alcançados até o momento estão a ampliação do percentual da cana colhida crua (aproximadamente 55,6%) em todo o Estado, a redução no consumo específico de água da área industrial (média de 1,45 m³ de água/tonelada de cana processada), o comprometimento em proteger e favorecer a recuperação das áreas de mata ciliar (aproximadamente 250.000 hectares), etc. (PROJETO ETANOL VERDE, 2011).

O Gráfico 02 destaca a redução da área da cana-de-açúcar colhida com o uso do fogo no Estado de São Paulo para as quatro últimas safras. Ressalta-se também a área de expansão, a área colhida crua e a área total cultivada com a cana no Estado de São Paulo.

Gráfico 02 – Panorama do cultivo e da colheita da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo nas últimas cinco safras (dados: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, CANASAT 2010).

2.4 Subprodutos do Setor Sucroenergético

Desde a introdução da cultura da cana no país, pouca atenção foi dedicada ao aproveitamento comercial de seus principais subprodutos, sendo que muitos desses tem se destacado pela sua importância comercial e/ou mesmo por ajudar a reduzir custos pela substituição de seus produtos (CORTEZ, 1992). Dentre os subprodutos que mais vêm ganhando destaque no setor encontra-se: o bagaço, a torta de filtro, as cinzas e a fuligem das caldeiras, a levedura, a vinhaça e a palha.

O Organograma 1 visa exemplificar as fontes geradoras e as etapas que se reutilizam dos subprodutos gerados na planta industrial e na área agrícola das Unidades Agroindustriais Sucroenergéticas:

Organograma 01 – Rota de geração e reuso dos subprodutos da produção canieira (elaboração própria).

Segundo Soares (2009), a grande utilização do bagaço é o seu aproveitamento como combustível das caldeiras, gerando vapor para aquecimento e para a geração de energia elétrica para consumo na usina e para venda às concessionárias de energia elétrica. Agrega-se a esse fator, a crescente disponibilidade da palha da cana que antes era queimada quase em sua totalidade no campo e que passa, com a eliminação gradativa da queima no Estado de São Paulo, a ser utilizada tanto no condicionamento do solo quanto na geração de vapor e energia extra nas usinas.

A utilização do bagaço na geração de energia já é uma realidade e seu uso amplia-se a cada safra, principalmente com a substituição de caldeiras antigas por exemplares mais potentes. Segundo Szwarc (2009), os sistemas de queima de bagaço relativamente antigos estão sendo substituídos e as Unidades Agroindustriais precisam de menos bagaço para produzir a mesma quantidade de energia, começando a sobrar bagaço. A solução imediata para esse excesso de matéria prima é a venda de energia extra para o mercado consumidor próximo às Unidades Agroindustriais (Concessionárias de Energia Elétrica). Contudo, com a perspectiva de aumento da produção da cultura da cana e, conseqüentemente, de seus subprodutos, outros usos já vêm sendo pesquisados, sendo um deles os

biocombustíveis de segunda geração, advindo do material lignocelulósico¹ do bagaço e da palha da cana.

De acordo com Langer (2009), a segunda geração de combustíveis pode ser produzida a partir de uma variedade maior de matérias-primas, como a grama, lixo, estrume, palha, resíduo florestal e a planta inteira.

Szwar (2009) ressalta que com a viabilização econômica e produtiva dos processos de conversão da celulose em açúcares fermentáveis, a produção de álcool a partir da mesma área de terra praticamente dobraria.

No caso da levedura, a torta de filtro, as cinzas e a fuligem, a primeira vem sendo exportado na forma desidratada para o uso na alimentação animal (ração) e os últimos utilizados no condicionamento do solo depois de passarem por um pré-tratamento (condicionamento).

De acordo com Soares (2009), a vinhaça é na sua quase totalidade retornada para o setor agrícola, reduzindo a necessidade de adubação química. Seja pelo uso descontrolado desse subproduto ou pela falta de um condicionamento para sua aplicação, essa atividade se tornou, com o passar dos anos, fator de extrema preocupação por parte dos órgãos ambientais responsáveis pelo setor.

2.5 Vinhaça e Aplicações

A vinhaça é um resíduo líquido proveniente da destilação de uma solução alcoólica chamada vinho, obtida do processo de fermentação para obtenção do álcool. Esse resíduo pode ter como matéria-prima o caldo de cana, o melaço ou a mistura de proporções, ou de diluições destes. (Mutton, 2007).

Andrade (2009) ressalta que a vinhaça que é gerada numa razão de 10,3 a 11,9 litros por cada litro de álcool produzido, apresenta: temperatura elevada, pH ácido, corrosividade, alto teor de potássio, quantidades significativas de nitrogênio, fósforo, sulfatos e cloretos. Além disso, relatos históricos retratam que desde a década de 50 já era grande a preocupação quanto à disposição deste resíduo, seja pelo grande volume gerado e/ou pelas características poluentes que apresenta

¹ Material que apresenta em sua composição basicamente celulose, hemicelulose e lignina.

quando mal utilizado. A Tabela 01 apresenta a composição da vinhaça a partir de diversos mostos:

Tabela 01 – Composição da vinhaça gerada a partir de diferentes mostos (continua)

Referência	Tipo de Mosto de vinhaça	pH	DBO (g/l)	DQO (g/l)	N _{total} (g/l)	SO ₄ (g/l)	P _{total} (g/l)	K (K ₂ O ₅) (g/l)
Van Handel e Catunda (1994)	Caldo	3,50	12,00	25,00	0,40	0,20	0,80	-
Driessen et al., (1994)	Caldo	3,50	15,00	22,00	0,40	0,06	-	0,40
Costa et al., (1986)	Caldo	4,20	16,50	33,00	0,70	0,09	1,74	0,76
Callander e Badford, (1983)	Caldo	3,90	-	26,00	1,19	0,32	2,10	1,47
Lampoglia e Rossel, (1997)	Caldo	4,10	11,00	24,00	0,45	0,65	0,11	1,65
Lampoglia e Rossel, (1997)	Misto	4,50	19,80	45,00	0,60	3,70	0,10	4,00
Costa et al., (1986)	Misto	4,50	19,80	45,00	0,71	0,09	3,82	3,73
Souza et al., (1992)	Melaço	3,90	-	31,50	0,37	0,03	1,30	0,42
Costa et al., (1986)	Melaço	4,60	25,00	65,00	1,61	0,13	6,50	6,40
Menezes (1989)	Melaço	4,10	25,80	48,00	0,82	0,16	-	-
Harada et al., (1996)	Melaço	4,10	30,00	120,00	1,60	0,06	1,92	4,60
Sheehan e Greenfield, (1980)	Melaço	4,20	35,70	77,70	1,78	0,17	8,90	4,36
Driessen et al., (1994)	Melaço	3,90	39,00	100,00	1,03	0,03	7,00	9,50
Goyalet al., (1996)	Melaço	4,10	60,00	98,00	1,20	1,50	1,20	5,00
Sanchez Riera, (1985)	Melaço	4,80	-	100,00	2,50	0,30	1,75	0,70

Tabela 01 – Composição da vinhaça gerada a partir de diferentes mostos (conclusão)

Referência	Tipo de Mosto de vinhaça	pH	DBO (g/l)	DQO (g/l)	N _{total} (g/l)	SO ₄ (g/l)	P _{total} (g/l)	K (K ₂ O ₅) (g/l)
Casariniet al, (1987)	Melaço	4,20	-	24,60	0,81	0,03	1,98	0,61
Lampoglia e Rossel, (1997)	Melaço	4,60	25,00	65,00	1,03	6,40	0,20	5,60
deBazue et al., (1991)	Melaço	5,00	27,50	64,00	1,30		-	2,80

Fonte: Wilkie et al., (2000) apud Viana (2006).

Até quase o final da década de 70 o destino mais comum que se dava a esse resíduo era o lançamento direto nos rios, lagos e cursos de água, atividade que trazia impactos negativos tanto para a comunidade aquática desses habitats quanto para os seres humanos que sofriam com a deterioração da qualidade da água para usos diretos e indiretos.

Advinda da grande preocupação quanto aos impactos do uso da vinhaça no ambiente, foi instituída em 28 de fevereiro de 1967, o Decreto de Lei nº 303 que proibiu a disposição da vinhaça nos rios, lagos e cursos de água (ROSSETO, 2009). Posteriormente, a Portaria nº 323 de 29 de novembro de 1978, publicada pela Secretaria Especial do Meio Ambiente (SEMA) e vinculada ao Ministério do Interior, também proibiu o lançamento direto ou indireto de vinhaça em qualquer coleção hídrica, pelas destilarias de álcool, a partir da safra 1979/1980 (DAMIANO, 2005). Com a proibição, outros destinos tiveram que ser encontrados para a disposição da vinhaça. Inicialmente se utilizaram das áreas de sacrifício que, segundo Andrade (2009), eram áreas ditas de inundação, onde se formavam extensos alagados para permitir sua infiltração empírica no terreno, sem nenhum controle. No entanto, esse novo método de disposição também era improdutivo e ambientalmente impróprio, uma vez que indisponibilizava o solo para usos futuros além de causar a poluição das águas subterrâneas.

Com a proibição do lançamento nos cursos de água, a perda continua das áreas de sacrifício (já que se tornavam inutilizáveis para a agricultura) e o crescente

volume de vinhaça produzida, outra forma de disposição passou a ser prontamente utilizado a partir da década de 70: a fertirrigação.

Rosseto (2009) destaca que com o advento do Proálcool, e consequente expansão da indústria sucroalcooleira do país, ocorreu um aumento significativo da produção de álcool, e também da geração de vinhaça. Com a nova fase de crescimento pelo qual passa o Setor Sucroenergético, os volumes de vinhaça produzidos também alcançaram valores nunca antes obtidos. Na safra 2006/2007, foram produzidos sem âmbito nacional cerca de 180 bilhões de litros de vinhaça. O Gráfico 03 destaca esse aumento de produção obtido pelo setor, sobretudo na última década:

Gráfico 03 – Panorama da produção de vinhaça pelo Setor Sucroenergético desde a década de 90 (dados: UNICA 2010).

2.5.1 Vinhaça e seus aspectos ambientais

Os benefícios advindos da fertirrigação são tanto diretos, através da redução no custo com a adubação, quanto indiretos, visto que aumentam a fertilidade natural dos solos onde esse subproduto é aplicado. Segundo Andrade (2009), o uso da

vinhaça repõe ao solo os nutrientes que as plantas dele retiram, aumenta a produtividade agrícola, eleva o pH do solo, aumenta a disponibilidade de alguns nutrientes e imobiliza outros, eleva a população microbiana, o poder de retenção de água e melhora a estrutura física do solo.

Contudo, vale ressaltar que feita de maneira descontrolada (taxa de aplicação excessiva), o uso contínuo da vinhaça como fertilizante pode trazer efeitos negativos para o ambiente no qual é empregado. Madejon (2001) sugere que pode se esperar uma elevação na concentração de sais no solo e potencial risco de salinização com a aplicação de vinhaça ao longo dos anos.

De acordo com Pinto (1999), apud Damiano (2005), a disposição “in natura” da vinhaça na lavoura apesar de contribuir para livrar os cursos d’água superficiais do perigo de poluição, é uma alternativa que não pode ser aplicada arbitrariamente em todas as situações.

Segundo Meurer et al. (2000), apud Silva (2006), o fosfato e o nitrato, existentes em grandes concentrações na vinhaça, se destacam como possíveis contaminantes de águas superficiais e subterrâneas. Agrega-se a este potencial poluidor, as altas concentrações de potássio existentes na vinhaça que, apesar de não ser um poluente direto, favorece a formação de complexos químicos com compostos potencialmente poluidores das águas, como é o caso do nitrato. Portanto, a associação do potássio (K^+) ao nitrato (NO_3^-), por apresentar carga neutra, é facilmente lixiviado para as águas subterrâneas (ROSSETO, 2008).

De acordo com Alaburda (1998), a presença de compostos de nitrogênio nos seus diferentes estados de oxidação é indicativo de contaminação do aquífero e de possíveis condições higiênico-sanitárias insatisfatórias. O nitrato está associado a dois efeitos adversos à saúde: a metemoglobinemia (doença que impossibilita o transporte de oxigênio para as células, afetando principalmente crianças) e doenças carcinogênicas.

Advindo da preocupação pelo uso descontrolado da vinhaça ao solo, outras tecnologias já vêm sendo utilizadas pelos grandes grupos do Setor Sucroenergético, seja substituindo as técnicas anteriormente expostas ou complementando-as.

2.6 Técnicas de Reutilização da Vinhaça

2.6.1 Aplicação “in natura” no solo

A disposição da vinhaça diretamente ao solo, sem nenhuma forma de pré-tratamento, é uma técnica que vem sendo utilizada pelo setor há algumas décadas, trazendo consigo, além de inúmeras vantagens, preocupações crescentes ao decorrer desse período.

De acordo com Andrade (2009), a alta disponibilidade de potássio ($\sim 4 \text{ kg de } K_2O/m^3$) desse subproduto associada à elevada exigência desse macronutriente por parte da cultura da cana ($\sim 185 \text{ kg de } K_2O/ha$), fez com que a Cooperativa de Produtores de Cana, Açúcar e Álcool do Estado de São Paulo (COPERSUCAR) adotasse, a partir de 1978, o uso da vinhaça como fertilizante, procedimento recomendado por Glória (1977).

Rosseto (2008) ressalta que é importante lembrar que a vinhaça é um material de origem orgânica, sem a presença de metais ou outros contaminantes que impeçam seu uso agrícola e, nesse sentido, é perfeitamente aceita pela agricultura orgânica, e não existem restrições ao seu uso como fonte de nutrientes pelas empresas certificadoras.

A aplicação da vinhaça “in natura” no solo, como já mencionado, traz inúmeros benefícios, desde o aumento da produtividade agrícola até melhorias nas condições estruturais do solo. Contudo, o uso excessivo e contínuo gerou preocupações ambientais até então negligenciadas pelo Setor Sucroenergético, resultando na elaboração da Normativa P.4.231 (CETESB 2005) que estabeleceu critérios e procedimentos para o armazenamento, transporte e aplicação da vinhaça no solo do Estado de São Paulo. Uma das limitações estabelecidas pela normativa diz respeito à dosagem máxima, em metro cúbico de vinhaça por hectare (m^3/ha), que cada área a ser fertirrigada pode receber, sendo esta calculada através da equação 01:

$$m^3 \text{vinhaça} / ha = [(0,05 \times CTC - ks) \times 3744 + 185] / kvi \quad (01)$$

CTC = Capacidade de Troca Catiônica, expressa em cmolc /dm³ a pH 7,0, dada pela análise de fertilidade do solo realizada por laboratório de análise de solo e utilizando metodologia do Instituto Agronômico de Campinas de Análise de Solo, devidamente assinado por responsável técnico.

ks = concentração de potássio no solo, expresso em cmolc /dm³, à profundidade de 0,80 metros, dada pela análise de fertilidade do solo realizada por laboratório de análise de solo utilizando metodologia de Análise de Solo do Instituto Agronômico de Campinas, devidamente assinado por responsável técnico.

3744 = constante para transformar os resultados da análise de fertilidade, expressos em cmolc/dm³ ou meq /100cm³, para kg de potássio em um volume de um hectare por 0,80 metros de profundidade.

185 = kg de K₂O extraído pela cultura por ha, por corte.

kvi = concentração de potássio na vinhaça, expressa em kg de K₂O /m³, apresentada em boletim de resultado analítico, assinado por responsável técnico.

2.6.2 Biodigestão anaeróbia

A biodigestão anaeróbia de efluentes é um processo de degradação bioquímica que se dá na presença de bactérias onde cada microrganismo desempenha função essencial. O resultado desse processo é a biodegradação da matéria orgânica do afluente, com a produção de biogás (CH₄, CO₂ e H₂S), além de um efluente com reduzida carga de matéria orgânica e rico em nutrientes.

O processo de biodigestão anaeróbia ocorre em duas etapas. Na primeira etapa do processo estão envolvidas bactérias fermentativas, não produtoras de metano, que atuam por hidrólise extracelular quebrando polímeros orgânicos em suas unidades fundamentais, incorporando e fermentando esses produtos de hidrólise em ácidos orgânicos, álcoois, hidrogênio e dióxido de carbono. No segundo estágio, tais produtos são transformados em metano e dióxido de carbono pela ação das bactérias acetogênicas e metanogênicas.

Chernicharo (1997) ressalta que a digestão anaeróbia vem sendo aplicada para o tratamento de efluentes de indústrias agrícolas (produção de álcool e de

açúcar), alimentícias e de bebidas, tanto em países desenvolvidos como em desenvolvimento.

Portanto, o uso dessa tecnologia no tratamento da vinhaça apresenta-se viável, uma vez que atua na remoção e reutilização da elevada carga orgânica presente (ao invés de apenas dispor esse subproduto, subutilizando-o frente às desconhecidas taxas de incorporação da matéria orgânica pelo solo), além de manter seu alto poder nutricional NPK (essenciais para a produtividade da cultura e a manutenção da fertilidade do solo).

A tecnologia de biodigestão tem como vantagens o baixo consumo de energia, a pequena produção de lodo (descarte), a grande eficiência na diminuição da carga orgânica, baixo potencial poluidor, sendo que o biogás produzido poderá ser empregado no processo de produção de energia (FREIRE & CORTEZ, 2000).

De acordo com Granato (2003), a China é um ótimo exemplo da utilização do biogás na geração de energia, já que cerca de 25 milhões de chineses usam biogás, principalmente para iluminação e cocção. Aproximadamente 10.000 digestores de médio e grande porte se encontram em funcionamento em fábricas de alimentos, destilarias, fazendas de gado, entre outros. O biogás produzido em grandes unidades é transferido para estações centralizadas, onde é aproveitado na geração de potência mecânica (existem cerca de 422 estações com capacidade instalada de 5.849 HP) e potência elétrica (822 estações responsáveis pela produção total de 7.836 kW).

A utilização do biogás para geração de energia aprimora o balanço energético da produção do álcool, o que o torna mais competitivo e eficiente quando comparado aos combustíveis fósseis mais utilizados na atualidade. Já do ponto de vista ambiental, a substituição parcial da energia advinda dos combustíveis fósseis, que representou 51,3% de toda a oferta energética brasileira no ano de 2009 (EPE, 2010), pela energia advinda do biogás proporcionaria a redução das emissões dos gases de efeito estufa (GEE), contribuindo para o controle da temperatura do planeta.

2.6.2.1 Reatores anaeróbios de fluxo ascendente e manta de lodo (UASB)

O processo de biodigestão, se conduzido em reatores convencionais, é relativamente lento, com tempos de retenção hidráulica do resíduo dentro do reator de vários dias, ou mesmo semanas, para se completar o processo. Este era, sem dúvida, o principal obstáculo técnico para uma eventual aplicação do processo de digestão anaeróbia para a vinhaça. No entanto, a redução do tempo de retenção pode ser obtida mantendo-se uma elevada concentração de microrganismos no interior do reator, o que pode ser conseguido por recirculação externa ou retenção interna dos microrganismos. Os biodigestores de alta eficiência, geralmente, com fluxo ascendente (Figura 1), podem alcançar este objetivo (PINTO, 1999).

Em 1976, na Holanda, Lettinga inovou o processo de tratamento anaeróbio com o reator de manta de lodo, desenvolvido para tratamento de despejos de uma refinaria de açúcar de beterraba (NETO, 1988).

De acordo com Neto (1988), em 1980, no Brasil, em plena crise energética o Proálcool estava no auge com a implantação e ampliação do parque sucroenergético, o que levava a preocupação sobre o destino da vinhaça produzida e também a procura de mais fontes alternativas de energia. Estes fatos, aliado ao desenvolvimento inicial do reator de manta de lodo para uma indústria de fabricação de açúcar de beterraba, foram responsáveis pela pronta adoção, por algumas entidades, do tratamento da vinhaça pelo sistema desenvolvido por Lettinga.

O processo do reator consiste de um fluxo ascendente do afluente através de um leito de lodo denso e de elevada atividade, sendo que o perfil de sólidos no reator varia de muito denso e com partículas granulares de elevada capacidade de sedimentação, próximas ao fundo, até o lodo mais disperso e leve, próximo ao topo. A estabilização da matéria orgânica ocorre em todas as zonas, sendo a mistura do sistema promovida pelo fluxo ascensional do afluente e das bolhas de gás. Um dispositivo de separação de gases e sólidos garante a sedimentação das partículas que se desgarram da manta de lodo, permitindo seu retorno à câmara de digestão. Todos esses dispositivos proporcionam um elevado tempo de residência de sólidos no reator, permitindo o crescimento de uma densa massa de microrganismos

formadores de metano, mesmo com o reduzido tempo de detenção hidráulica (CHERNICHARO, 1997).

Figura 01 - Desenho esquemático de um reator UASB (Fonte: Neto, 2009)

2.6.3 Concentração

A concentração da vinhaça é uma tecnologia utilizada para reduzir a quantidade de água presente neste subproduto, reduzindo o seu volume e consequentemente os custos com transporte e aplicação na fertirrigação. Era um processo de pouca abrangência no Setor Sucroenergético do país, visto seu alto custo energético, padrão que vem se alterando com a difusão da cogeração (produção de vapor e de eletricidade) nas Unidades Agroindustriais.

Segundo Rosseto (2008) a Usina Santa Elisa-SP instalou, ainda em 1978, uma unidade concentradora de vinhaça que ficou praticamente parada em função do custo energético, passando a funcionar em 1999 com a implantação do sistema de cogeração de energia elétrica.

A concentração da vinhaça, além de proporcionar uma maior flexibilização na logística de aplicação no solo (fertirrigação), também condiciona a vinhaça para outras utilizações, como por exemplo: ração animal, combustível para caldeiras especiais e posterior geração de energia. Agrega-se também o potencial de redução da captação de água pela usina, uma vez que o condensado retirado da vinhaça já retorna para o sistema produtivo das plantas industriais em algumas Usinas (ALBERS, 2007).

2.7 Cenário Energético Atual do Estado de São Paulo

Com 57% da sua Oferta Interna Bruta de Energia advinda de fontes energéticas renováveis, sendo 38,7% advinda da biomassa, a matriz energética do Estado de São Paulo pode ser considerada predominantemente limpa quando comparada as outras unidades da federação. Dentre as fontes de biomassa, estão os subprodutos canavieiros, a lenha e o carvão vegetal, entre outros, como a casca de arroz e resíduos vegetais. Apesar do padrão renovável demonstrado na matriz energética paulistana, quando se volta a atenção para o produção e o consumo de energia elétrica, a realidade se apresenta um pouco menos sustentável. Representando 30% do consumo do país e importando 47% de toda a energia consumida no Estado, sendo o setor industrial o maior consumidor com quase 43% de toda energia, o Setor Elétrico do Estado de São Paulo carece de medidas governamentais que incentivem a utilização de fontes alternativas renováveis (Secretaria de Saneamento e Energia do Estado de São Paulo, 2010).

A matéria-prima para a geração dessa energia renovável, em parte, já se encontra disponível e ociosa no campo e nas grandes cidades (resíduos orgânicos agrícolas e urbanos), ficando os empresários do Setor Elétrico na esperança de incentivos que possibilitariam a geração local (nos limites do Estado) de parte da

energia que hoje vem sendo importada. Nesse contexto, surgem duas possibilidades que se encaixam perfeitamente no cenário de excesso de demanda versus escassez de oferta atual do Estado de São Paulo: a geração de energia elétrica pela queima do bagaço e pela biodigestão de subprodutos agroindustriais, como a vinhaça.

2.8 Geração de Energia Elétrica a partir da Biodigestão da Vinhaça

Um dos subprodutos agroindustriais que apresenta alto potencial para geração de energia elétrica é a vinhaça advinda das Destilarias e Unidades Produtoras de Açúcar e Álcool. O processo de geração se inicia pela etapa de biodigestão da vinhaça dando origem ao biogás que, posteriormente, sofrerá combustão em equipamentos específicos (motores de combustão interna, microturbinas, turbo-geradores, etc.), proporcionando a produção de energia elétrica. Essa energia tanto pode servir para o auto consumo quanto para a inserção na rede de distribuição de concessionárias de energia elétrica.

De acordo com Salomon (2005), são claras as vantagens da produção de energia elétrica a partir de biogás, entre elas: geração descentralizada e próxima aos pontos de carga, a partir de uma fonte renovável que vem sendo tratada como resíduo; possibilidade de receita extra, proveniente da energia gerada com biogás e vendida às concessionárias; redução na quantidade de eletricidade comprada da concessionária; possibilidade de uso de processos de cogeração; redução das emissões de metano para a atmosfera, pois este também é um importante gás de efeito estufa; créditos de carbono; redução de odores etc. Por outro lado, existem alguns desafios a serem vencidos que impedem a ampla utilização do biogás, como: não disponibilidade de tecnologias nacionais de geração; limpeza do biogás; viabilidade econômica; falta de fiscalização; e penalidades por possíveis danos ambientais.

2.9 Avaliações Econômicas de Projetos

Em vista das inúmeras oportunidades que o biogás pode proporcionar para o empreendedor do Setor Sucroenergético, surge o potencial de se delinear projetos alternativos para o uso desse subproduto e, através da análise econômica de cada um deles, determinar a viabilidade econômica para a implantação dos mesmos. De acordo com Almeida (2006), o objetivo principal dos estudos de avaliação econômica de projetos é prover subsídios para a tomada de decisões. A definição prévia de cada um desses projetos será detalhada posteriormente através da idealização de cenários para a biodigestão (associada ao uso do biogás na geração de energia elétrica). Resta nesse momento, esclarecer os objetivos da “análise econômica” deste trabalho.

3 METODOLOGIA

Para este trabalho utilizou-se como base de estudo três das tecnologias de condicionamento/reutilização de vinhaça mais empregadas no Setor Sucroenergético na atualidade: **aplicação in natura no solo (fertirrigação in natura), biodigestão e concentração**. Os estudos realizados visaram analisar a viabilidade técnica, econômica e ambiental de cada uma dessas tecnologias e se utilizaram de três fontes de dados distintas: visitas de campo realizadas em 43 Unidades Agroindustriais Sucroenergéticas do Estado de São Paulo durante as safras 2009/2010 e 2010/2011, banco de dados do Projeto Estratégico Etanol Verde do Estado de São Paulo e literatura especializada sobre o setor.

3.1 Análises Técnicas

3.1.1 Aplicação “in natura” no solo

A viabilidade técnica foi analisada através de uma abordagem simplificada e realística de inter-relação entre a fertirrigação in natura nas Unidades Agroindustriais integrantes do Protocolo Agroambiental de São Paulo (165 Unidades Agroindustriais) e a sua efetiva aplicabilidade, ou seja, a disseminação da tecnologia no Setor atestando a sua viabilidade. Além disso, preocupou-se em avaliar, nesta fase inicial, o número de Unidades Agroindustriais que utilizavam técnicas preliminares para condicionamento ou reutilização da vinhaça.

3.1.2 Biodigestão

A viabilidade técnica foi analisada por meio de dois caminhos:

- Levantamento, entre as Unidades Agroindustriais pertencentes ao Protocolo Agroambiental de SP que foram visitadas durante o período de elaboração e desenvolvimento do projeto, daquelas que apresentaram um projeto de biodigestão, seja em fase de implantação ou que já estivesse em pleno funcionamento. Também foram coletados dados referentes ao volume médio de tratamento, subprodutos finais a serem reutilizados (biofertilizante² e/ou biogás, sendo o último destinado à geração de energia) tipo de investimento recebido (investimento próprio ou parceria), etc.
- Análise dos projetos de biodigestão disponibilizados no mercado pelas grandes empresas de tecnologia voltadas para o Setor Sucroenergético ou para o setor de tratamento de resíduos (subprodutos) agrícolas e industriais.

Por meio dessas duas abordagens procurou-se estabelecer uma relação direta entre a viabilidade técnica e a existência de projetos/tecnologias de biodigestão em utilização nas Unidades Agroindustriais ou disponíveis no mercado.

3.1.3 Concentração

A viabilidade técnica foi analisada por meio de dois caminhos:

- Levantamento, entre as Unidades Agroindustriais pertencentes ao Protocolo Agroambiental de São Paulo que foram visitadas durante o período de elaboração e desenvolvimento do projeto, daquelas que apresentaram um projeto de concentração, seja em fase de implementação ou que já estivesse em pleno funcionamento. Também foram coletados dados referentes ao volume médio de tratamento, produtos finais (subprodutos) a serem reutilizados, ganhos em relação à logística de aplicação da vinhaça, tipo de investimento recebido (investimento próprio ou parceria), etc.

² Subproduto líquido da biodigestão. Quando aplicado ao solo, traz tantos benefícios quanto à aplicação in natura visto a manutenção da sua carga nutricional inicial.

- Análise dos projetos de concentração disponibilizados no mercado pelas grandes empresas de tecnologia voltadas para o Setor Sucroenergético ou para o setor de tratamento de resíduos (subprodutos) agrícolas e urbanos.

Por meio dessas duas abordagens procurou-se estabelecer uma relação direta entre a viabilidade técnica e a existência de projetos/tecnologias de concentração em utilização nas Unidades Agroindustriais ou disponíveis no mercado.

3.2 Análises Econômicas

De forma ampla, as análises econômicas desenvolvidas neste trabalho tiveram como objetivos principais apresentar aos agentes do Setor Sucroenergético, indicadores econômicos utilizados em estudos de viabilidade de projetos para o Setor e os elementos necessários para o seu desenvolvimento.

3.2.1 Aplicação “in natura” no solo

Na análise econômica para a fertirrigação in natura, o objetivo principal foi de mensurar a economia (lucro) que as Unidades Agroindustriais do Setor Sucroenergético do Estado de São Paulo apresentaram na safra 2009/2010 por meio da substituição dos fertilizantes minerais (NPK) pela fertirrigação in natura da lavoura. Definida a metodologia de análise, esta também foi aplicada no âmbito da região Centro-Sul e Nacional.

3.2.1.1 Parâmetros utilizados na análise econômica

Para esta análise foram utilizados os seguintes parâmetros: área de cultivo e quantidade de cana processada pelas Unidades Agroindustriais signatárias do Protocolo Agroambiental para a safra 2009/2010, área de cultivo e produção total de álcool da região Centro-Sul e do Brasil para safra 2009/2010, quantidade e preço médio dos fertilizantes utilizados no ciclo produtivo da cana.

a) Área de cultivo e quantidade de cana processada pelas Usinas signatárias do Protocolo Agroambiental

A área de cultivo e a quantidade de cana processada foram obtidas por meio de dados públicos do Projeto Etanol Verde e são referentes à safra 2009/2010. Portanto, foram utilizadas para o estudo a área de cultivo total (incluindo áreas próprias e sob o regime de arrendamento/parcerias) e a cana total processada pelas Unidades Agroindustriais signatárias e em conformidade com as exigências do Protocolo neste período.

b) Área de cultivo e produção total de álcool da região Centro-Sul e do Brasil para safra 2009/2010

A área de cultivo e a produção de álcool total da região Centro-Sul e do Brasil para a safra 2009/2010 foram obtidas do “3º Levantamento da Companhia Nacional de Abastecimento sobre a cultura da cana-de-açúcar de Janeiro/2011” (CONAB, 2010) e são apresentadas na Tabela 02:

Tabela 02 - Área de cultivo e produção de álcool da região Centro-Sul e do Brasil (continua)

Região	Área de cultivo Safra 2009/2010 ha	Produção de Álcool Safra 2009/2010 m³
Centro-Sul	6.309.800,00	23.737.031,00

Tabela 02 - Área de cultivo e produção de álcool da região Centro-Sul e do Brasil (conclusão)

Região	Área de cultivo Safra 2009/2010 ha	Produção de Álcool Safra 2009/2010 m³
Brasil	7.409.600,00	25.762.622,70

Fonte: 3º Levantamento da CONAB sobre a cultura da cana-de-açúcar de Janeiro/2011

c) Quantidade e custo dos fertilizantes utilizado no ciclo produtivo da cana

A quantidade e o custo dos fertilizantes foram obtidos do trabalho publicado pela Pecege/ESALQ-USP intitulado “Custo de Produção de cana-de-açúcar, açúcar e etanol no Brasil”, referente à safra 2009/2010 e são apresentados na Tabela 03. Os valores utilizados foram discriminados pela fase da cultura, ou seja, tanto a cana planta quanto a cana soca apresentaram valores diferenciados; e se referem à região mais tradicional de produção de cana, onde se enquadram as áreas do Estado de São Paulo.

Tabela 03 - Quantidade e custo dos fertilizantes utilizados na cultura da cana

Fase da Cana	Quantidade t/ha	Preço R\$/ha
Cana Planta	450,00	496,50
Cana Soca	410,00	412,87

Fonte: Custo de Produção de cana-de-açúcar, açúcar e etanol no Brasil referente à safra 2009/2010, Pecege/ESALQ-USP, adaptado pelo autor.

3.2.1.2 Considerações assumidas e premissas adotadas para a avaliação econômica

a) Dosagens médias de aplicação de vinhaça in-natura para São Paulo, Centro-Sul e Brasil

Quanto ao volume médio de aplicação da vinhaça in-natura utilizado em São Paulo, no Centro-Sul e no Brasil, a ser utilizado para o cálculo dos ganhos

econômicos advindo dessa prática, o presente estudo assumiu como referência os valores apresentados na Tabela 04:

Tabela 04 - Dosagens médias de aplicação de vinhaça in-natura (m ³ /ha)			
Fase da Cana	São Paulo	Centro-Sul	Brasil
Cana Planta	300,10	290,50	273,8
Cana Soca	270,00	252,90	250,3

Fonte: Luz, P. Novas tecnologias no uso da vinhaça e alguns aspectos legais. Pirassununga-SP: FZEA, USP. 2005.

b) Adubação complementar das áreas fertirrigadas

Diversas Usinas do Estado de São Paulo e do Brasil se utilizam da adubação complementar, principalmente nitrogenada, das áreas que passam pelo processo de fertirrigação por vinhaça, sendo esta prática diretamente relacionada com as características da propriedade. Grande parte delas se utiliza de pesquisas de campo para fundamentar essa complementação, seja pelo aumento da produtividade por safra ou da longevidade do canavial³. Para esse estudo, quando se fez uso da complementação, levaram-se em consideração dois tipos de fertilizantes:

- P₂O₅ (fósforo total) - fornecido em pequenas quantidades pela vinhaça;
- N (nitrogênio total) - recomendado pela literatura específica para o aumento da produtividade e prática comum entre as Usinas visitadas.

Quanto ao fósforo, as quantidades para a complementação foram calculadas pela relação entre a necessidade nutricional da planta, Tabela 05, e a quantidade fornecida através do volume de vinhaça aplicada na área. Para o nitrogênio, foi adotado um valor base de 60 kg N.ha⁻¹ somente para as áreas com cana soca, já que na literatura especializada⁴ não se recomenda a adubação complementar da cana planta com nitrogênio devido à baixa resposta a esse nutriente.

³ Maior número de cortes permitidos pela mesma planta durante seu ciclo produtivo.

⁴ OLIVEIRA, E. et al, **Uso da vinhaça de alambique e nitrogênio em cana de açúcar irrigada e não irrigada**; VITTI, A. et al, Nitrogênio. In: DINARDO, L. et al. Cana-de-açúcar; SCHULTZ, N. Efeito Residual da adubação em cana planta e adubação nitrogenada em cana de primeira soca com aplicação de vinhaça.

Tabelas 05 - Nutrientes aplicados na adubação da cana-de-açúcar no Brasil

Nutrientes	Cana Planta kg.ha ⁻¹	Cana Soca kg.ha ⁻¹
N	42	81
P ₂ O ₅	123	34
K ₂ O	109	114
Total	274	229

Fonte: Nunes Junior et al. (2005), apud Figueiredo P. (2008), adaptado pelo autor.

c) Classificação e percentual das áreas de cana utilizadas no estudo

As áreas utilizadas como referência para o cálculo dos ganhos econômicos advindos da fertirrigação a nível regional e nacional foram as áreas de cultivo. Por esta classe de área englobar mais do que aquela disponível para a colheita durante a safra, tornou-se necessário estabelecer algumas definições que serviram para nortear a análise econômica.

Segundo as definições do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), mais especificamente pelo Projeto CANASAT⁵, a área total cultivada pode ser entendida da seguinte forma:

- "Soca" é a classe de lavouras de cana que já passaram por mais de um corte, ou seja, é a cana que rebrotou de uma planta ou de uma soca. Nesta classe também se encontram as lavouras reformadas com cana planta de ano.
- "Reformada" é a classe das lavouras de cana planta de ano-e-meio que foram reformadas no ano safra anterior e que estão disponíveis para colheita na safra corrente.
- "Expansão" é a classe de lavouras de cana que pela primeira vez estão disponíveis para colheita. Lavouras de cana que foram convertidas em outro uso por um período igual ou maior a duas safras e voltaram a ser cultivadas com cana também se inserem nesta classe.

⁵ Projeto CANASAT – Mapeamento da cana via imagens de satélites de observação da terra.

- "Em reforma" é a classe das lavouras de cana que não serão colhidas devido à reforma com cana planta de ano-e-meio ou por serem destinadas a outro uso. Quando a lavoura da classe "em reforma" é de fato reformada com cana planta de ano-e-meio ela passa para a classe "Reformada" no ano safra seguinte.
- "Total cultivada" engloba todas as classes (soca + reformada + expansão + em reforma).

A fim de simplificar e viabilizar o estudo realizado, algumas definições estabelecidas pelo INPE foram reagrupadas, Tabela 06, resultando nas seguintes classes: área de reforma, área de cana planta, área de cana soca.

Tabela 06 - Relação entre as classes INPE e as classes definidas para o estudo

Classes INPE	Área de reforma (ha)	Cana planta (ha)	Cana Soca (ha)	Total Cultivada (ha)
"Soca"			Soca	Soca
"Reformada"		Reformada		Reformada
"Expansão"		Expansão		Expansão
"Em reforma"	Em reforma			Em reforma

* Fonte: INPE/CANASAT (2009/2010), modificado pelo autor.

A partir desse reagrupamento e do levantamento realizado pelo INPE/CANASAT 2009/2010 para a área de cana do Estado de São Paulo, foi possível definir as seguintes informações referentes à área total cultivada do Estado para a safra 2009/2010:

- 6,58 % foi destinada à reforma dos canaviais;
- 13,50 % foi destinada ao cultivo da cana planta;
- 79,92 % foi destinada ao cultivo da cana soca.

Estes percentuais foram utilizados na análise econômica da fertirrigação in natura, inicialmente no âmbito do Protocolo Agroambiental e depois extrapolado para as regiões do Centro-Sul e do Brasil.

3.2.1.3 Cenários para a análise econômica da fertirrigação in-natura

Foram definidos quatro cenários para a análise econômica da fertirrigação in-natura, sendo que o volume de aplicação utilizado e a adubação complementar (fósforo e nitrogênio) são as bases para a diferenciação entre eles.

- Cenário I: Fertirrigação in-natura com a taxa de aplicação definida a partir da quantidade de nutrientes aplicados na adubação convencional, sem adubação complementar;
- Cenário II: Fertirrigação in-natura com a taxa de aplicação definida a partir da quantidade de nutrientes aplicados na adubação convencional, com adubação complementar;
- Cenário III: Fertirrigação in-natura com a taxa de aplicação definida a partir de dosagens médias regionais, sem adubação complementar;
- Cenário IV: Fertirrigação in-natura com a taxa de aplicação definida a partir de dosagens médias regionais, com adubação complementar.

Os dois primeiros cenários apresentam como particularidade a metodologia de cálculo da taxa de vinhaça a ser aplicado na área. Essa metodologia tem como base a Tabela 05, que define os três nutrientes mais expressivos aplicados na adubação convencional da cana-de-açúcar no Brasil e a quantidade de cada um deles, dependendo do tipo de cana a ser adubado. Estes mesmos cenários apresentam como diferenciação a utilização da adubação complementar.

Quanto aos dois outros cenários, a definição da taxa de vinhaça a ser aplicado se baseia em dosagens médias regionais definidas por pesquisadores⁶ do Setor Sucroenergético e apresentados na Tabela 04. Quanto à diferenciação, esta também é definida pela utilização da adubação complementar.

Ressalta-se que todos os cenários foram analisados para as três dimensões territoriais citadas anteriormente: Usinas do Protocolo Agroambiental (SP), região Centro-Sul e Brasil.

⁶ NUNES, Jr. D. et al. 2004.

3.2.1.4 Métodos utilizados na análise econômica

a) Cálculo da taxa de aplicação de vinhaça (Cenários I e II)

Por meio da Tabela 07 que estabelece a caracterização físico-química da vinhaça por meio de 64 amostras de 24 Usinas do Estado de São Paulo, foi possível obter a quantidade de nutrientes (NPK) disponibilizada para a cultura da cana-de-açúcar em cada volume de vinhaça utilizado na fertirrigação.

Tabela 07 - Caracterização físico-química da vinhaça

Nutriente	Concentração Média	Unidade
Fósforo Total	$60,41 \times 10^{-3}$	kg/m ³ de P ₂ O ₅
Nitrogênio	$356,63 \times 10^{-3}$	kg/m ³ de N
Potássio Total	$2034,89 \times 10^{-3}$	kg/m ³ de K ₂ O

Fonte: Elia Neto e Nakahondo, 1995. Modificado pelo autor.

Portanto, através do nível de adubação nitrogenada utilizado no Brasil, Tabela 05, e a quantidade deste nutriente potencialmente fornecida pela vinhaça, inferiram-se os volumes necessários para aplicação por fase de cultivo da cana-de-açúcar. Os cálculos são apresentados nas equações 02 e 03; e se basearam exclusivamente na adubação nitrogenada, visto que as taxas de aplicação de vinhaça obtidas foram as que mais se aproximaram das taxas verificadas no dia-a-dia do setor.

- Taxa de aplicação de vinhaça para a cana planta

$$T.V^P = \frac{Q.A^P}{C.V} \quad (02)$$

T.V^P = taxa de aplicação de vinhaça em cana planta (m³. ha⁻¹)

Q.A^P = quantidade de nutriente N fornecido para cana planta no Brasil (kg.ha⁻¹)

C.V = concentração média de N presente na vinhaça (kg.m⁻³)

- Taxa de aplicação de vinhaça para cana soca

$$T.V^c = \frac{Q.A^c}{C.V} \quad (03)$$

$T.V^c$ = taxa de aplicação de vinhaça em cana soca ($m^3.ha^{-1}$)

$Q.A^c$ = quantidade de nutriente N fornecido para cana soca no Brasil ($kg.ha^{-1}$)

$C.V$ = concentração média de N presente na vinhaça ($kg.m^{-3}$)

- b) Cálculo das áreas de reforma, de cana planta e de cana soca para a safra 2009/2010 no âmbito do Protocolo, do Centro-Sul e do Brasil

Através dos valores percentuais das classes da lavoura de cana-de-açúcar para o Estado de São Paulo na safra 2009/2010 (alínea “c” do item 3.2.1.2), em associação com as áreas de cultivo total apresentadas anteriormente, foram obtidas as áreas de reforma, de cana planta e de cana soca para o Protocolo Agroambiental (referente às áreas de cultivo das Usinas signatárias), para a região Centro-Sul e para o Brasil, conforme demonstrado nas equações 04 a 06:

$$A.R = \frac{A.C \times 6,58}{100} \quad (04)$$

$$A.P = \frac{A.C \times 13,50}{100} \quad (05)$$

$$A.S = \frac{A.C \times 79,92}{100} \quad (06)$$

$A.R$ = área de reforma (ha)

$A.P$ = área de cana planta (ha)

$A.S$ = área de cana soca (ha)

$A.C$ = área de cultivo (ha)

- c) Cálculo da produção total de vinhaça para a safra 2009/2010

- Protocolo Agroambiental

Estimou-se a produção de álcool total referente ao Protocolo Agroambiental a partir da quantidade total de cana processada pelas Usinas, para isso se fez uso de um valor médio de moagem destinada à produção de álcool para a safra 2009/2010. O valor adotado foi de 0,57%⁷ e se refere ao percentual de cana destinado à produção de álcool, tendo como referência toda a cana processada na região Centro-Sul do país nessa mesma safra.

Assim como a produção de álcool, a produção de vinhaça para a safra 2009/2010 foi estimada levando em consideração um valor médio de produção. Neste caso, realizou-se um levantamento da produção de vinhaça por litro de álcool de todas as Usinas signatárias ao Protocolo Agroambiental e, a partir desses dados, foi calculado um valor médio de produção de 12 m³ de vinhaça por 1 m³ de álcool. As equações 07 e 08 representam os cálculos realizados:

$$V.A.P = Q.C.P \times V.R^a \quad (07)$$

$$V.V.P = V.A.P \times V.R^v \quad (08)$$

Q.C.P = quantidade de cana processada (ton)

V.V.P = volume de vinhaça produzida (m³)

V.A.P = volume de álcool produzido (m³)

V.R^a = percentual de cana destinado à produção de álcool (%)

V.R^v = relação de produção entre vinhaça e álcool (m³/m³)

- Centro-Sul e Brasil

No caso da região Centro-Sul e do Brasil, os valores de produção de álcool para a safra 2009/2010 foram obtidos da Tabela 02 e o volume de vinhaça produzida

⁷ Fonte: Informe de fechamento de safra da UNICA – União das Indústrias de Cana-de-açúcar, maior representante do setor de açúcar e Bioetanol do Brasil.

foi obtido através da equação 09. Quanto ao valor de referência, utilizou-se o mesmo valor adotado para o Protocolo Agroambiental.

$$V.V.P = V.A.P \times V.R^v \quad (09)$$

V.V.P = volume de vinhaça produzida (m³)

V.A.P = volume de álcool produzido (m³)

V.R^v = relação de produção entre vinhaça e álcool (m³/m³)

d) Cálculo das áreas totais de cana planta e de cana soca fertirrigadas para a safra 2009/2010 (cenários I, II, III e IV)

A metodologia utilizada para o cálculo das áreas fertirrigadas foi a mesma para o Protocolo Agroambiental, para o Centro-Sul e para o Brasil. Primeiramente, definiu-se que as áreas prioritárias para a fertirrigação seriam as de cana planta já que o Setor não apresenta um padrão definido quanto ao assunto. Apesar de alguns trabalhos de pesquisa ressaltarem que a fertirrigação com vinhaça é priorizada para as área de cana soca, esse padrão não foi verificado nas visitas de campo. Portanto, para os quatro cenários analisados, toda a área de cana planta foi incluída como área efetivamente fertirrigada.

Posteriormente, as áreas totais de cana soca efetivamente fertirrigada foram calculadas da seguinte forma:

- Cálculo do volume total de vinhaça aplicado em área de cana planta

$$V.A^P = T.V^P \times A.F^P \quad \text{Cenários I e II} \quad (10)$$

ou

$$V.A^P = D.V^P \times A.P \quad \text{Cenários III e IV} \quad (11)$$

T.V^P = taxa de aplicação de vinhaça em cana planta (m³. ha⁻¹; alínea “a” do item 3.2.1.4)

$D.V^P$ = dosagem (taxa) de aplicação em cana planta ($m^3 \cdot ha^{-1}$, Tabela 04)

$A.F^P$ = $A.P$ = área total de cana planta fertirrigada (ha)

$V.A^P$ = volume total de vinhaça aplicado em área de cana planta (m^3).

- Cálculo do volume total de vinhaça aplicado em área de cana soca

$$V.A^S = V.V.P - V.A^P \quad (12)$$

$V.V.P$ = volume total de vinhaça produzida (m^3)

$V.A^P$ = volume total de vinhaça aplicado em área de cana planta (m^3)

$V.A^S$ = volume total de vinhaça aplicado em área de cana soca (m^3).

- Cálculo da área total de cana soca fertirrigada

$$A.F^S = V.A^S / T.V^S \quad \text{Cenários I e II} \quad (13)$$

ou

$$A.F^S = V.A^S / D.V^S \quad \text{Cenários III e IV} \quad (14)$$

$V.A^S$ = volume total de vinhaça aplicado em cana soca (m^3)

$T.V^S$ = taxa de aplicação de vinhaça na cana soca ($m^3 \cdot ha^{-1}$; alínea “a” do item 3.2.1.4)

$D.V^S$ = dosagem (taxa) de aplicação em cana soca ($m^3 \cdot ha^{-1}$, Tabela 04)

$A.F^S$ = área total de cana soca fertirrigada (ha).

- e) Cálculo dos ganhos econômicos advindos da fertirrigação

Os ganhos econômicos obtidos com a substituição da adubação mineral dos canaviais pelo uso da fertirrigação com vinhaça foram obtidos através da inter-relação entre as áreas de cana soca e cana planta fertirrigada na safra 2009/2010 (alínea “d” do item 3.2.1.4) e os custos apresentados na Tabela 03 para a adubação mineral da cultura da cana na mesma safra.

Para os cenários I e II, nos quais a adubação complementar não foi considerada, os cálculos foram realizados a partir da equação 15:

$$L.T = (A.F^P \times C.F^P) + (A.F^S \times C.F^S) \quad (15)$$

L.T = lucro total obtido com a substituição da adubação mineral (R\$)

A.F^P = área total de cana planta fertirrigada (ha)

A.F^S = área total de cana soca fertirrigada (ha)

C.F^P = custo dos fertilizantes utilizados na cana planta (R\$/ha, Tabela 03)

C.F^S = custo dos fertilizantes utilizados na cana soca (R\$/ha, Tabela 03).

Para os cenários III e IV, a adubação complementar foi incluída no balanço econômico. Portanto, os custos com nitrogênio e o fósforo adicionais, resultaram na redução dos ganhos econômicos obtidos com a substituição da adubação mineral. O cálculo utilizado para estes dois últimos cenários é apresentado na equação 16:

$$L.T = [A.F^P \times (C.F^P - C.C^P)] + [A.F^S \times (C.F^S - C.C^S)] \quad (16)$$

L.T = Lucro total obtido com a substituição da adubação mineral (R\$)

A.F^P = área total de cana planta fertirrigada (ha)

A.F^S = área total de cana soca fertirrigada (ha)

C.F^P = custo dos fertilizantes utilizados na cana planta (R\$/ha, Tabela 03)

C.F^S = custo dos fertilizantes utilizados na cana soca (R\$/ha, Tabela 03)

C.C^P = custo da adubação complementar na cana planta (R\$/ha)

C.C^S = custo da adubação complementar na cana soca (R\$/ha)

3.2.2 Biodigestão

A análise para a biodigestão teve como finalidade identificar a viabilidade econômica de projetos que se utilizam do biogás, advindo do processo de

biodigestão da vinhaça, para a geração de energia elétrica, sendo este um insumo essencial para o desenvolvimento do processo industrial do Setor Sucroenergético.

A seguir estão representadas etapas anteriores à aplicação da análise econômica e comum a todos os projetos analisados neste estudo.

3.2.2.1 Unidade produtiva padrão

A definição de uma unidade produtiva padrão permitiu que estudos comparativos fossem aplicados aos diversos projetos propostos para a geração de energia elétrica a partir do biogás. A Tabela 08 apresenta a unidade produtiva padrão estabelecida para este trabalho e algumas variáveis produtivas a ela associadas:

Tabela 08 - Unidade Produtiva Padrão (Usina de médio porte)

Moagem na safra (mil ton)	Período de safra (dias)	Álcool/cana Process. (l/t)	Produção de álcool (m³/dia)	Vinhaça/Etanol (m³/m³)	Produção de vinhaça (m³/dia)
1.500,00	275 ¹	82	254,95	12	3.069,54

¹Dias de safra, descontados os meses de dezembro, janeiro e fevereiro.

3.2.2.2 Cenários para o aproveitamento energético do biogás

A fim de viabilizar economicamente o processo de biodigestão da vinhaça nas unidades agroindústrias do Setor Sucroalcooleiro, optou-se pela utilização do biogás na geração de energia elétrica, proporcionando retorno econômico para os empreendedores que optarem por esta tecnologia. Uma vez gerada dentro da própria unidade, esse insumo energético poderá vir a substituir parte da energia comprada de terceiros e, em especial para a energia elétrica, ser exportada para as redes das concessionárias locais.

A tecnologia da biodigestão foi o alicerce estabelecido para a construção de todos os cenários propostos, já que proporciona a produção do insumo energético secundário para as tecnologias geradoras de energia elétrica - o biogás. Portanto, para o aproveitamento energético do biogás, foram estabelecidos os seguintes cenários:

- Cenário/Projeto I: queima do biogás em queimadores (flares) com venda do crédito de carbono;
- Cenário/Projeto II: geração de energia por meio de motores à combustão interna e venda dos créditos de carbono (motogerador de ciclo otto);
- Cenário/Projeto III: geração de energia por meio de turbinas a biogás e venda dos créditos de carbono.

Os cenários apresentados se assemelham muito a diversos trabalhos já publicados no campo do aproveitamento energético do biogás. Contudo, a análise desenvolvida neste estudo objetivou reavaliar a viabilidade econômica dessas tecnologias através de parâmetros econômicos atuais e, sobretudo, se utilizando de novos programas de incentivo das Agências/Empresas responsáveis pela regulamentação do Setor Energético.

3.2.2.3 Tecnologias recomendadas para o aproveitamento energético do biogás

a) Biodigestor

A tecnologia de biodigestão recomendada para integrar os cenários propostos foi o reator UASB (RAFA - Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente), fornecido por empresas de tecnologia ligadas ao Setor Sucroenergético, como a Brasmetano LTDA de Piracicaba – SP e a DEDINI S.A. de Ribeirão Preto – SP. As Tabelas 09 e 10 apresentam parâmetros técnicos referentes à planta recomendada (valores calculados) e valores de referência adotados para o processo de biodigestão em reatores UASB (literatura especializada) respectivamente:

Tabela 09 - Parâmetros da planta de biodigestão

Parâmetros	Unidade	Valor
Volume do Reator	m ³	1.540,00
Dimensões (altura X diâmetro)	m/m	10 X 14
Vazão de Vinhaça	m ³ /dia	3.069,54
Tempo de Detenção Hidráulica (TDH)	h	12,04
Produção de biogás	Nm ³ /dia	36.834,52
Produção de metano (CH ₄)	Nm ³ /dia	22.100,71
Energia disponível biogás (60% de metano)	MJ/dia	847.635,96
Potencial disponível no biogás	MW	9,81

Fonte: Próprio autor.

Tabela 10 - Parâmetros do processo de biodigestão

Parâmetros/Valores de Referência	Unidade	Valor
Concentração da vinhaça*	kg DQO/m ³	30,00
Eficiência da biodigestão	% de remoção	80,00
Taxa de conversão 1	NI** Biogás/g DQO _{Removida}	0,50
Taxa de conversão 2***	NI CH ₄ /g DQO _{Removida}	0,30
Densidade do Metano	kg/m ³	0,714
PCI do Biogás (60% de metano)	kJ/Nm ³	23.012,00

*Considerando a produção a partir do caldo;

***NI (Normal Litro)

***Considerando o biogás com 60% de CH₄;

Fonte: Adaptado de CTC (2009).

b) Queimadores

São estruturas em formato de torres, onde se realiza a queima dos gases combustíveis. São utilizados como alternativa simples e eficiente na mitigação do aquecimento global e na geração de créditos de carbono para o empreendedor que opta por esta tecnologia, já que proporcionam a transformação de gases poluentes de alto potencial de aquecimento global (CH₄) em poluentes secundários de potencial reduzido (CO₂).

São sempre aconselhados como complementação aos projetos que visam à utilização energética do biogás (geração de energia elétrica) e, em especial, aqueles

que também se valem da venda de créditos de carbono, já que podem evitar a emissão do metano diretamente para a atmosfera quando os sistemas principais (geradores de energia elétrica) não estiverem em funcionamento. Portanto, em casos de manutenção ou alguma parada inevitável, os gases mais prejudiciais ainda deixariam de ser emitidos e não haveria a perda dos créditos de carbono. A Figura 02 apresenta o esquema do funcionamento de uma queimador enclausurado.

Figura 02 - Esquema do funcionamento de um queimador enclausurado
(Fonte: Empresa ABUTEC, 2011)

c) Motor de combustão interna - Ciclo Otto (Motogerador)

O funcionamento desse motor é o mesmo encontrado nos carros de passeio, sendo necessárias algumas adaptações para a utilização de gás combustível. Esse motor apresenta uma sequência de funcionamento dividido em quatro tempos

distintos (Figura 03), durante os quais diversos fenômenos termodinâmicos acontecem resultando no processo de queima controlada do combustível em questão:

Figura 03 - Esquema do funcionamento dos quatro tempos do Motor Ciclo Otto
(Fonte: Blog - Mecânica Automotiva).

É uma tecnologia de extensa utilização no Brasil, principalmente nos projetos destinados a aterros sanitários, sendo suas principais vantagens e desvantagens apresentadas a seguir (ICLEI - BRASIL, 2009):

Vantagens:

- Geração de energia elétrica para o próprio consumo;
- Economia de R\$ em relação à energia proveniente da concessionária;
- Possibilidade de obtenção de receita adicional pela venda de excedente de energia;
- Possibilidade de obtenção e comercialização de créditos de carbono.

Desvantagens:

- Motores de grande porte são importados. Isso faz com que o investimento inicial seja elevado;
- Baixo rendimento, aproximadamente 28%;

- Altos valores de emissão de NO_x (gás de grande impacto ambiental). Dependendo do porte do motor, a emissão de NO_x varia entre 250 e 3.000 ppm (partes por milhão).

d) Turbina a gás/ Microturbinas

São equipamentos utilizados para a conversão da energia térmica de um determinado fluido de trabalho (gás) em energia mecânica e, posteriormente, em energia elétrica caso esse seja o interesse da instalação. O processo se inicia com a compressão do ar atmosférico e consequentemente aumento de sua pressão e temperatura. O ar então é direcionado para a câmara de combustão que em contato com o combustível sofre ignição e entra em processo de combustão. Os gases resultantes, com alta energia térmica, ao serem direcionados à turbina expandem-se, realizando trabalho e gerando a energia mecânica que atua tanto no acionamento do compressor quanto na geração de energia elétrica, quando acoplado em um gerador. A Figura 04 apresenta o esquema básico do funcionamento de uma turbina a gás:

Figura 04 - Esquema do funcionamento de uma turbina a gás (Fonte: própria).

A Tabela 11 apresenta um comparativo entre as três tecnologias de conversão do gás à energia elétrica, sendo duas delas recomendadas pelo estudo:

Tabela 11 - Comparação entre tecnologias de conversão

Tecnologias	Faixa de Potência Instalada (KW – MW)	Rendimento Elétrico (%)	Emissões de NO_x (ppm)
Motores a gás (Ciclo Otto)	30KW – 20MW	30 - 40	250 - 3000
Microturbinas a gás (pequeno porte)	30KW – 100KW	24 - 28	< 9
Turbinas a gás (médio porte)	500KW – 150MW	20 - 30	35 - 50

Fonte: Adaptado de CENBIO, 2005, apud Figueiredo, 2007.

3.2.2.4 Métodos de avaliação econômica utilizados

O objetivo principal dos métodos econômicos detalhados a seguir foi de proporcionar ao empreendedor uma ferramenta simples na escolha da melhor alternativa de investimento ou, em alguns casos, auxiliar na decisão de realizar ou não a alocação de recurso financeiro em uma determinada tecnologia proposta.

No caso específico desse estudo, a análise realizada verificou a viabilidade de investimento no aproveitamento energético do biogás da vinhaça através de diferentes tecnologias pós-biodigestão: queimadores, motores de combustão interna e turbinas.

Vale ressaltar a existência das incertezas nos modelos econômicos aplicados neste estudo, uma vez que os ganhos econômicos previstos no momento da análise são calculados por meio de índices econômicos atuais, sujeito a variações futuras.

A aplicação de qualquer técnica não se constitui em uma estimativa precisa de valor, mas apenas um parâmetro para auxiliar no processo de tomada de decisão. Isso faz com que mais importante que o resultado encontrado é a perfeita compreensão da ferramenta de análise utilizada. É preciso entender as restrições, aplicações e resultados que podem ser encontrados na utilização de certa formulação matemática e não encará-la como uma fórmula “mágica” (MACEDO, 2007).

Dentre os métodos selecionados para serem aplicados estão: Valor Presente Líquido (VLP), Análise Custo-Benefício (C/B), Taxa Interna de Retorno e Pay-Back.

Para o desenvolvimento desses métodos se fez necessária a elaboração inicial do fluxo de caixa das tecnologias propostas no estudo:

a) Fluxo de caixa

O fluxo de caixa se resume às entradas (receitas) e saídas (custos) de capital ao longo da vida útil de um projeto. É uma ferramenta, representada da forma analítica ou gráfica, utilizada no desenvolvimento de modelos mais complexos cuja finalidade é a análise de viabilidade do investimento a ser realizado.

Um desenvolvimento adequado do fluxo de caixa se torna primordial para a adequada aplicação dos métodos de avaliação posteriores, uma vez que projeções feitas de forma equivocada, por exemplo, a desconsideração de entradas e saídas significativas, podem resultar em falhas na tomada de decisão e, conseqüentemente, no investimento realizado. A Figura 05 apresenta uma representação gráfica padrão de um fluxo de caixa:

Figura 05 - Diagrama de um fluxo de caixa padrão no tempo (Fonte: Próprio autor).

As setas que se encontram acima do eixo horizontal do diagrama representam as receitas obtidas durante a vida útil do projeto, normalmente representadas pela comercialização de um subproduto. Já as setas que se encontram abaixo do mesmo eixo representam os custos advindos da implantação dessa tecnologia, representadas pelos investimentos iniciais de aquisição e instalação dos equipamentos, custos com manutenção e operação, custo com insumo energético, etc. Em alguns casos, as entradas e saídas podem compor fluxos de caixas diferentes, a fim de facilitar a aplicação de métodos de análise econômica específicos, como será visto posteriormente.

b) Valor Presente Líquido (VPL)

O valor presente líquido é um método de avaliação econômica que relaciona o custo inicial de investimento (FC_0) de um projeto com seus fluxos de caixa futuros (FC_j), sendo esses últimos descontados de uma taxa de desconto (taxa de juros). Portanto, o VPL é obtido através dos valores atualizados das receitas subtraído dos valores atualizados dos investimentos, sejam eles presentes ou futuros, permitindo que seja feita a análise da viabilidade do projeto no tempo presente. A equação 17 demonstra o cálculo realizado para a obtenção do VPL:

$$VPL = \sum_{j=1}^n \frac{FC_j}{(1+i)^j} - FC_0 \quad (17)$$

VPL = valor presente líquido (R\$)

FC_0 = custo inicial de investimento (R\$)

FC_j = entradas (receitas) e saídas (custos) previsto para cada período futuro (R\$);

i = taxa de juros ou taxa de desconto (%)

j = período de tempo

n = vida útil do projeto (anos).

De acordo com Macedo (2002), o VPL pode ser visto, então, como um ganho proporcionado pelo ativo, pois representa o quanto os fluxos de caixa futuros estão acima do investimento inicial. Tudo isso

a valor presente, segundo um custo de oportunidade ajustado ao risco.

Inúmeras são as variáveis possíveis de serem consideradas como receitas e custos (fluxos de caixa) na análise de um projeto energético, tais como: venda de subprodutos energéticos, venda de equipamentos de plantas ultrapassadas e sem funcionalidade para a planta atual, venda de equipamentos atuais já prevendo sua depreciação, gastos com combustíveis, gastos com manutenção e operação, etc. É neste ponto que reside umas das limitações deste e de outros modelos econômicos utilizados no ramo da engenharia econômica, já que escolhas equivocadas podem ocasionar falhas no resultado final de análise e, sobretudo, na tomada de decisão. De acordo com Macedo (2007), as grandes limitações do VPL são a confiabilidade das estimativas de fluxo de caixa futuros e da taxa mínima de atratividade (TMA) ajustada ao risco.

A partir do cálculo do VPL, o investidor/empreendedor poderá então se confrontar com as situações de análise apresentadas na Tabela 12 que auxiliarão na tomada de decisão quanto à realização de um investimento:

Tabela 12 – Posição quanto ao investimento baseado no VPL calculado	
Condição do VPL calculado	Provável posição
VPL > 0	Realização do investimento
VPL < 0	Não realização do investimento
VPL = 0	Indiferente

Fonte: Próprio autor.

Portanto, para a primeira situação o método VPL é um indicativo de que o investimento no projeto trará lucro para o investidor, sendo esse lucro o próprio VPL em valores absolutos. Já no segundo caso, o VPL absoluto representa o prejuízo que o investimento irá proporcionar.

Além da análise individual de investimento, há a possibilidade de este estudo estar sendo realizado como ferramenta econômica comparativa entre dois ou mais projetos concorrentes. Neste caso, as opções devem ser analisadas segundo a Tabela 13:

Tabela 13 - Posição entre investimento concorrentes baseado em VPLs calculados

Condição dos VPL's calculados	Provável posição
VPL1 > VPL2	Investimento no projeto 1
VPL1 < VPL2	Investimento no projeto 2
VPL1 = VPL2	Indiferente

Fonte: Próprio autor.

Logo, a escolha deve sempre priorizar o investimento de maior VPL. Vale ressaltar que, em estudos comparativos onde há a obrigatoriedade pela escolha de uma alternativa e os VPLs calculados são todos negativos, a escolha se balizará pelo menor valor absoluto em módulo, como demonstrado na Tabela 14:

Tabela14 – Módulo dos VPLs calculados

Valores dos VPL's calculados	Módulo dos VPL's calculados
VPL1 = - R\$ 2.000.000,00	VPL1 = R\$ 2.000.000,00
VPL2 = - R\$ 2.765.000,00	VPL2 = R\$ 2.765.000,00

Fonte: Próprio autor.

Portanto, neste exemplo hipotético a escolha mais provável seria pelo investimento número 1.

c) Custo/benefício

A metodologia de custo/benefício (C/B) poderia ser utilizada, neste trabalho, de duas formas distintas: comparação de alternativas tecnológicas de geração de energia; e comparação do custo de produção de energia por uma tecnologia específica com os valores cobrados pelas concessionárias fornecedoras, sendo aplicada a última opção. Para ambos os casos, busca-se calcular o custo por unidade de energia gerada (R\$/KWh), para cada alternativa analisada.

Uma das particularidades desse método é a uniformização dos fluxos de caixa distribuídos durante a vida útil de um projeto/tecnologia, ou seja, os valores pertencentes ao fluxo de caixa de uma alternativa, fixos e variáveis, presentes e futuros, parcela por parcela, serão agregados e distribuídos uniformemente durante sua vida útil.

O cálculo para a uniformização de valores presentes e futuros é demonstrado na equação 18:

$$VUL = VPL \times \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (18)$$

VUL (CUL) = valor uniforme líquido ou custo uniforme líquido (R\$)

VPL (CPL) = valor presente líquido ou custo presente líquido (R\$)

i = taxa de juros ou taxa de desconto (%)

n = período de uniformização dos valores ou custos, normalmente igual à vida útil da tecnologia considerada (anos).

Portanto, verifica-se que para a uniformização do fluxo de caixa de uma tecnologia, deve-se, inicialmente, calcular o valor presente líquido de todas as entradas e saídas consideradas. Após a obtenção dos VPLs, os valores uniformes líquidos (também chamado de custos uniformes líquidos em algumas ocasiões) serão obtidos pela equação 18.

Muitos pesquisadores propõem que seja realizada a subdivisão do fluxo de caixa em fluxos independentes, conforme as características temporais de cada parcela, e a posterior junção para a aplicação do método C/B. Essa subdivisão e posterior aplicação do método podem ser verificadas nas equações 19 a 22:

$$CUL_1 = (I - R) \times \left[\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right] + R \times i \quad (19)$$

CUL₁ = custo uniforme líquido (R\$)

I = investimento inicial (R\$)

R = valor residual da tecnologia, projetado a partir da depreciação do bem durante sua vida útil (R\$)

i = taxa de juros ou taxa de desconto (%).

n = período de uniformização dos valores ou custos, normalmente igual a vida útil da tecnologia considerada em anos.

$$CUL_2 = CPL_2 \times \left[\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right] \quad (20)$$

CUL_2 = custo uniforme líquido 2 (R\$)

CPL_2 = custo presente líquido 2 (R\$)

i = taxa de juros ou taxa de desconto (%)

n = período de uniformização dos valores ou custos, normalmente igual à vida útil da tecnologia considerada em anos.

$$CUL_f = CUL_1 + CUL_2 \quad (21)$$

CUL_f = custo uniforme líquido final (R\$).

$$C / B = \frac{CUL_f}{E_{prod}} \quad (22)$$

C/B = relação entre o custo uniforme final do investimento e o benefício proporcionado pela alternativa tecnológica (R\$/KWh)

CUL_f = custo uniforme líquido final (R\$)

E_{prod} = Energia produzida pela tecnologia (KWh).

Nota-se que na equação 19, aparecem pela primeira vez as variáveis de investimento inicial (I) e valor residual (R) que são analisadas de forma conjunta no CUL_1 . Essas variáveis são comuns a maioria dos métodos econômicos utilizados para a análise de projetos de energia (VPL, C/B , payback, taxa de retorno, etc) e junto com os componentes detalhados a seguir, compõem os fluxos de caixa elaborados para este trabalho.

d) Variáveis integrantes dos fluxos de caixa elaborados

Os fluxos de caixa desenvolvidos neste estudo apresentam uma periodicidade anual, devido à longa vida útil dos equipamentos de geração de energia escolhidos para comporem os projetos. Outra consideração importante assumida é a uniformidade da maior parte dos custos considerados, com exceção do investimento inicial e do valor residual, ou seja, os valores anuais desses custos não variam com o passar da vida útil da tecnologia. Segundo Carvalho (2004), apud Almeida (2006), essa simplificação torna a análise mais clara e direta, sem prejuízo para as metodologias aplicadas. A seguir apresenta-se uma descrição das variáveis/componentes integrantes dos fluxos de caixa elaborados:

- Investimento Inicial

Custos advindos da aquisição, transporte, instalação e impostos de todos os equipamentos que integram os projetos de geração de energia. Cada um dos projetos mencionados anteriormente é composto por um conjunto de equipamentos, desde máquinas geradoras até sistemas de limpeza dos gases.

- Custo de manutenção e operação

Custos advindos das atividades direcionadas ao funcionamento adequado e permanente dos equipamentos integrantes dos projetos de geração de energia. Essas atividades podem ser definidas em preventivas e preditivas (tipos de manutenção planejada), sendo as preventivas caracterizadas pela constância e periodicidade com que são realizadas; e as preditivas caracterizadas pelo monitoramento/acompanhamento dos equipamentos a fim de subsidiar ações preventivas e/ou corretivas (paralisação do equipamento).

A manutenção corretiva se enquadra na classe das não planejadas. Por se tratar de um tipo de manutenção indesejável e imprevisível, seus custos também se tornam difíceis de serem previstos. Portanto, esses últimos custos são normalmente excluídos das análises econômicas.

Quanto aos custos com operação, esses se referem aos gastos para o normal funcionamento dos equipamentos instalados. Pode incluir nestes custos, os valores despendidos com o treinamento dos operadores dos equipamentos.

- Custos com combustíveis e insumos energéticos

Custos advindos dos combustíveis fósseis ou insumos energéticos utilizados para o acionamento e funcionamento dos equipamentos de geração de energia.

- Receita do Subproduto

Receitas relacionadas à venda dos subprodutos produzidos pelos projetos em análise. No caso específico deste estudo, dois são os subprodutos gerados: energia elétrica e créditos de carbono.

Para o cálculo da energia elétrica gerada pelas tecnologias propostas, a metodologia utilizada pode ser observada na equação 23:

$$E_{prod} = PI \times FC \times 8760 \times \eta \quad (23)$$

E_{prod} = energia anual produzida pela tecnologia (KWh/ano)

PI = potência instalada (KW)

FC = fator de capacidade (razão entre a energia efetivamente gerada ao longo de um ano e aquela que seria produzida se a instalação operasse a plena carga no mesmo período)

η = rendimento elétrico da tecnologia de geração (%).

Após o cálculo da energia produzida, calculou-se a receita obtida com a venda da energia através da equação 24.

$$REV = E_{prod} \times VEV \quad (24)$$

REV = receita anual obtida com a venda de energia elétrica (R\$/ano)

E_{prod} = energia anual produzida pela tecnologia (KWh/ano)

VEV = valor base da energia vendida (R\$/KWh).

Já para a quantificação dos créditos de carbono gerados pelas tecnologias e a conversão desses créditos em receita para o empreendedor através da venda dos certificados de emissões evitadas (CEE), duas metodologias distintas foram utilizadas. A primeira metodologia (ICLEI - Brasil, 2009) se refere aos créditos gerados pelos queimadores e pode ser observada na equação 25:

$$TCO_{2eq.} = TCH_{4queim} \times \eta \times R \quad (25)$$

$TCO_{2eq.}$ = Quantidade anual de CO_2 equivalente contabilizado com crédito de carbono para a tecnologia ($TCO_{2eq.}/ano$)

$TCH_{4queim.}$ = toneladas de CH_4 produzido no biodigestor e conduzido aos queimadores (TCH_4/ano)

η = eficiência dos queimadores

R = valor do potencial de aquecimento global do CH_4 em relação ao valor base de CO_2 (21x).

Após a quantificação do gás carbônico equivalente total que se deixou de emitir com a utilização dos queimadores, calculou-se a possível receita obtida com a venda dos créditos de carbono a ele relacionado (equação 26). A linha base utilizada para a venda dos créditos de carbono no mercado MDL do Protocolo de Kyoto foi de US\$10,00 (dez dólares) por tonelada de crédito de carbono vendida (ICLEI, 2009).

$$RCC = TCO_{2eq.} \times L.B \quad (26)$$

RCC = Receita anual obtida com a venda dos créditos de carbono (US\$/ano)

$TCO_{2eq.}$ = Quantidade anual de CO_2 equivalente contabilizado com crédito de carbono pela tecnologia ($TCO_{2eq.}/ano$);

$L.B$ = Linha de preço base para a venda dos créditos de carbono no mercado MDL/Kyoto (US\$/ $TCO_{2eq.}$).

A segunda metodologia se refere aos créditos de carbono (certificados de emissões evitadas⁸) possíveis de serem gerados pelas tecnologias contempladas nos outros dois cenários (motogerador e turbina) e pode ser observada nas equações 27 e 28.

Esta metodologia é aprovada pelo conselho executivo de MDL (Mecanismo de Desenvolvimento Limpo) da ONU (Organização das Nações Unidas) para o caso da geração de energia elétrica a partir do bagaço de cana e fornecimento para a rede de distribuição. Nesta se utiliza o conceito de margem combinada para determinar a intensidade de carbono teórica produto da expansão do setor elétrico nacional que ficou estabelecido em 0,140 TC/MWh ou 0,5 TCO_{2equiv.}/MWh (SALOMON, 2007).

$$TCO_{2eq.} = E_{prod} \times FIC \quad (27)$$

TCO_{2eq.}= Quantidade anual de CO₂ equivalente contabilizado com crédito de carbono para a tecnologia (TCO_{2eq.}/ano)

E_{prod} = energia anual produzida pela tecnologia (KWh/ano)

FIC = fator de intensidade de carbono (TCO_{2eq.}/KWh).

$$RCC = TCO_{2eq.} \times L.B \quad (28)$$

RCC= Receita anual obtida com a venda dos créditos de carbono (US\$/ano)

TCO_{2eq.}= Quantidade anual de CO₂ equivalente contabilizado com crédito de carbono pela tecnologia (TCO_{2eq.}/ano)

L.B = Linha de preço base para a venda dos créditos de carbono no mercado MDL/Kyoto (US\$/TCO_{2eq.})

- Receita com Valor Residual

O valor residual da instalação refere-se ao percentual do investimento inicial de aquisição que poderá ser revertido ao empreendedor, caso o mercado absorva

⁸ Certificado de Emissões Evitadas- Documento através do qual se comercializam, no âmbito do mercado regulado de Kioto, as toneladas de carbono que se deixou de emitir.

parte dos equipamentos dessa planta. Esse valor é calculado ao final da vida útil da instalação e o grau de conservação dos equipamentos influencia diretamente na concretização dessa receita futura.

- Custo com sistemas auxiliares

Além dos equipamentos principais que constituem as plantas de geração de energia, existem sistemas que agem em etapas intermediárias do projeto. Contudo, esses sistemas devem ser incluídos na análise econômica do projeto, já que influenciam diretamente no seu custo final. Dentre eles se encontram os sistemas de tubulações que interligam os equipamentos de produção de biogás e geração de energia elétrica, os sistemas de limpeza do biogás produzido pelos biodigestores, entre outros.

e) Custo do Biogás

Apesar do biogás ser um subproduto obtido da biodigestão da vinhaça que se encontra disponível em qualquer unidade produtora de álcool, os gastos efetuados com a planta de biodigestão foram atribuídos a este subproduto, conferindo um valor negativo (custo) a sua utilização. Portanto, a utilização do biogás nos projetos de aproveitamento energético mencionados na alínea “b” do item 3.2.2.4 será considerada como um fluxo de caixa referente ao uso de um combustível e a equação 29 demonstra o modelo para o cálculo desse variável:

$$VB = \frac{CB}{VP} \quad (29)$$

VB = valor do biogás (R\$/Nm³)

CB = custo do processo de biodigestão (R\$)

VP = volume do biogás produzido (Nm³).

3.2.3 - Concentração

A análise em questão teve como finalidade identificar a viabilidade econômica de um projeto de concentração da vinhaça com posterior uso do seu subproduto na lavoura da cana-de-açúcar. Assim como foi utilizado para a tecnologia de biodigestão, nesta etapa utilizou-se como referência uma unidade produtiva padrão de porte mediano com 1.500.000,00 toneladas de cana processada por safra.

Os métodos de avaliação econômica e as variáveis utilizadas para a elaboração do fluxo de caixa da biodigestão, também foram aplicados para a tecnologia da concentração. Contudo, esta tecnologia apresenta uma particularidade quando analisamos a variável “receita do subproduto”, já que está relacionada com a redução dos custos do transporte da vinhaça para aplicação no campo e a economia no consumo de água pela unidade fabril, e não com a venda de um subproduto específico, como no caso da energia elétrica ou dos créditos de carbono. Portanto, essa redução de custo passa a ser contabilizada como receita pelos empreendedores do Setor Sucroenergético, viabilizando em muitos casos a implantação da tecnologia de concentração.

Outro ganho econômico a ser incluído em análises econômicas futuras está relacionado com o aumento da área fertirrigada devido a maior racionalização na aplicação da vinhaça. A Figura 06 retrata a forma de aplicação mais localizada (racionalizada) nas linhas com a cultura da cana soca.

Figura 06 – Aplicação racional da vinhaça concentrada (Fonte: Usina Cerradinho, 2009)

De acordo com Paiva (2009), para o estudo de caso da Usina Cerradinho de Potirendaba, esta receita foi praticamente anulada pelo custo referente à utilização de parte do vapor que antes era destinado à geração de energia elétrica e passou a ser utilizado para a concentração da vinhaça.

Contudo, os novos modelos dos concentradores de vinhaça são dispostos juntos às colunas de destilação, a fim de otimizar o consumo energético na produção/concentração de vinhaça (CITROTEC, 2011). Portanto, a receita obtida com o aumento da área fertirrigada passaria a ser incluída na análise econômica, proporcionando situações de viabilidade econômicas mais favoráveis a essa tecnologia.

3.2.3.1 Tecnologias recomendadas para a concentração da vinhaça

a) Concentrador

A planta comercial de concentração recomendada para integrar a análise econômica foi a tecnologia ECOVIN, fornecida pela empresa Citrotec de Araraquara-SP. A Tabela 15 apresenta os parâmetros técnicos referentes à planta recomendada:

Tabela 15 - Parâmetros da planta de concentração

Parâmetros	Unidade	Valor
Modelo	#	CTENET -150
Vazão afluyente	m ³ /dia	100,00
Taxa de concentração	%	70
Vazão efluente	m ³ /dia	38,40

Fonte: Dados obtidos da Usina Cerradinho, unidade Potirendaba (adaptado pelo autor).

3.2.3.2 Método de cálculo da variável “receita do subproduto”

Para o projeto de concentração, a variável “receita do subproduto” foi decomposta em duas outras variáveis: economia no transporte e aplicação da vinhaça; e economia no consumo de água para a planta industrial.

a) Economia no transporte e aplicação da vinhaça

Para o cálculo da variável em questão utilizou-se como base de estudo, além de valores produtivos obtidos de empresas e organizações do Setor Sucroenergético, um trabalho realizado pela Empresa “Veronez Projetos & Consultoria” no qual se estabeleceu um custo base para o transporte e a aplicação da vinhaça no campo por meio de caminhões (Figura 07) e hidroroll (Figura 08).

Figura 07 - Caminhão para transporte de vinhaça (Fonte: Empresa Metalúrgica Verona).

Figura 08 - Hidroroll (Fonte: Site da empresa Copeza Zanarotti LTDA).

Na Tabela 16 estão reproduzidos os valores obtidos pela empresa Veronez e utilizados para o cálculo da variável em estudo:

Tabela 16 - Custo de transporte e aplicação¹ de vinhaça - caminhões² e hidrorolls

Distância (Km)	Custo de Aplicação vinhaça (CF+CV)³ (R\$/ha/ano)	Custo Total (R\$/m3)
2	197,47	1,20
4	226,40	1,38
6	255,34	1,56
8	284,27	1,73
10	313,20	1,91
12	342,13	2,09
14	371,07	2,26
16	400,00	2,44
18	428,93	2,62
20	457,86	2,79
22	486,80	2,97
24	515,73	3,14
26	544,66	3,32
28	573,59	3,50
30	602,53	3,67
32	631,46	3,85
34	660,39	4,03
36	689,33	4,20
38	718,26	4,38
40	747,19	4,56

Fonte: Veronez Projetos e Consultoria - Irrigação e fertirrigação em cana de açúcar (24/01/2011)

¹Caminhões de 25 + 30 m³

²CF = custo fixo e CV = custo variável

³Aplicação de 164m³/há.

Os itens a seguir contemplam os parâmetros integrantes desta variável e os modelos utilizados para os seus cálculos:

- Cálculo da área destinada à cultura da cana-de-açúcar

Através da produtividade média assumida para o Estado de São Paulo de 87,8 toneladas de cana por hectare cultivado (CONAB, 2009-2010) e a moagem

anual da unidade padrão estabelecida para este estudo (Tabela 08), foi obtida a área total da Usina destinada ao cultivo da cana de açúcar, conforme apresentado na equação 30:

$$AC = \frac{Moagem}{Prod. \times r} \quad (30)$$

AC = área da unidade padrão destinada ao cultivo da cana-de-açúcar (ha);

Moagem = moagem anual da unidade padrão (t)

Prod. = produtividade média do Estado de SP para a safra 2009/2010 (t.ha⁻¹)

r = razão entre área com cana plantada e a área de cultivo, incluindo nesta última a área de reforma (94%).

- Cálculo do volume de vinhaça produzido e da área destinada à fertirrigação

O cálculo do volume total de vinhaça produzida na safra foi o mesmo apresentado na alínea (c) do item 3.2.1.4. A partir desse valor e considerando a mesma taxa de aplicação de vinhaça utilizada no trabalho da empresa Veronez (164,00 m³. ha⁻¹) foi obtido o valor da área fertirrigada, como pode ser observado na equação 31:

$$AF = \frac{VVP}{TV^m} \quad (31)$$

AF = área total de cana fertirrigada (ha)

VVP = volume anual de vinhaça produzida (m³)

TV^m = taxa média de aplicação de vinhaça (m³. ha⁻¹).

- Cálculo da distância máxima (R_{máx}) das áreas fertirrigadas

Neste item foi assumido que as áreas de cultivo de cana da usina devem se concentrar necessariamente ao redor da unidade industrial produtiva, além de estarem dispostas continuamente a partir do seu centro. Portanto, essa área passa a

constituir uma circunferência ao redor da usina. Apesar dessa simplificação não ser verificada em campo, já que essas áreas se encontram distribuídas aleatoriamente, essa consideração se fez necessária para que pudesse ser elaborado um modelo de cálculo para o custo total de transporte da vinhaça e para a econômica obtida com a redução do seu volume (concentração).

Através da equação 32 e da Tabela 17 fornecida pela empresa Veronez foi possível calcular uma distância máxima (raio da circunferência) da área de cultivo da usina (Figura 09) e obter um valor de custo para o transporte da vinhaça a essa distância. Para se aproximar da realidade utilizou-se uma média entre o custo para aplicação em áreas próximas da usina (2 Km) e nas áreas mais afastadas (extremidade do círculo – raio do círculo), considerando que as áreas fertirrigadas estariam distribuídas aleatoriamente por essa área de cultivo.

$$R_{m\acute{a}x} = \sqrt{\frac{AC}{\pi \times 100}} \quad (32)$$

$R_{m\acute{a}x}$ = Distância máxima da área de cultivo, medida pelo raio da circunferência (Km)

AC = área total de cultivo (ha)

Figura 09 - Representação das áreas de cultivo e fertirrigadas da Usina (Fonte: Próprio autor).

Ressalta-se que na Figura 09 a área fertirrigada se encontra ao redor da unidade produtiva apenas como título de representação. No estudo foi considerado que está área se encontra pulverizada em pequenas glebas dentro da área de cultivo.

- Cálculo da economia com o transporte da vinhaça

A partir do $R_{máx}$ calculado e dos valores de custo obtidos da Tabela 17, pôde se calcular a economia obtida com o transporte/aplicação da vinhaça devido à redução do seu volume. As equações 33 a 35 demonstram os cálculos realizados:

$$C_{méd} = \frac{C_{Rmáx} - C_{2Km}}{2} \quad (33)$$

$C_{méd}$ = custo médio para transporte/aplicação da vinhaça (R\$/m³)

$C_{Rmáx}$ = custo para transporte/aplicação da vinhaça a distância máxima $R_{máx}$ (R\$/m³)

C_{2Km} = custo para transporte/aplicação da vinhaça a distância mínima de 2 km (R\$/m³).

$$C_{transp} = C_{méd} \times VVP \quad (34)$$

C_{transp} = custo anual de transporte/aplicação da vinhaça (R\$/ano)

$C_{méd}$ = custo médio para transporte/aplicação da vinhaça (R\$/m³)

VVP = volume anual de vinhaça produzida (m³).

$$E_{transp} = C_{transp} \times E_{conc} \quad (35)$$

E_{transp} = Economia anual com transporte/aplicação da vinhaça (R\$/ano)

C_{transp} = custo anual de transporte/aplicação da vinhaça (R\$/ano)

E_{conc} = eficiência do processo de concentração (%).

Os valores produtivos de referência utilizados para a realização dos cálculos mencionados acima estão representados na Tabela 17:

Tabela 17 - Parâmetros e premissas (Receita do Subproduto)		
Parâmetros	Unidade	Valor
Moagem da unidade padrão	t	1.500.000,00
Moagem para produção de álcool ¹	m ³ /ano	855.000,00
Produção de álcool por tonelada	l/t	82
Produtividade ²	Ton/ha	87,80
Eficiência de concentração	%	70
Razão - r	%	94
Dosagem média de aplicação	m ³ /ha	164,00
Custo médio de transporte para aplicação	R\$/m ³	2,88

¹ Considerando que 0,57 % da moagem de SP foi destinada à produção de álcool na safra 2009/2010

² Dados obtidos pela CONAB - Safra 2009/2010

b) Economia no consumo de água

A economia no consumo de água obtida com a recirculação do condensado da concentração da vinhaça resulta em um menor volume outorgado e consumido pelos empreendimentos do Setor Sucroenergético. Portanto, tomando-se como base o modelo de cobrança pelo uso de recursos hídricos dos Comitês das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí (PCJ), tornou-se possível quantificar os ganhos econômicos obtidos com a redução no consumo de água advindos da implantação desta tecnologia.

Para tal análise, utilizou-se a planilha eletrônica disponibilizada pelos Comitês PCJ e intitulado de Simulador da Cobrança pelo Uso de Recursos Hídricos Estadual. Para o cálculo do valor monetário final a ser economizado, 70% de todo o volume da vinhaça produzida pela unidade padrão (moagem de 1.500.000 toneladas) foi considerado como sendo evaporado pelo concentrador, condensado e reutilizado pela unidade fabril. Portanto, reportou-se este mesmo valor como sendo o volume

que deixou de ser outorgado/consumido e obteve-se o seu valor monetário através da planilha anteriormente citada.

3.3 Análises Ambientais

3.3.1 Aplicação “in natura” no solo

Os aspectos ambientais advindos da fertirrigação in natura da vinhaça já foram comentados ao decorrer da introdução e da revisão bibliográfica realizadas neste estudo. Contudo, esses aspectos foram agrupados e dispostos em um quadro síntese; com a descrição de suas relevâncias segundo estudos científicos voltados para o Setor e pesquisas de campo.

3.3.2 Biodigestão

A análise ambiental para a biodigestão foi direcionada à redução das emissões dos gases de efeito estufa (GEE) através da conversão do metano (CH_4) em gás carbono (CO_2). Essa conversão ocorre durante a combustão do gás nos queimadores, nas câmaras de combustão dos motogeradores e dos turbogeradores. Portanto, calculou-se para a unidade produtiva padrão, estabelecida como modelo para este estudo, a redução de suas emissões levando em consideração a utilização dos três cenários de aproveitamento do biogás: queimadores, motogeradores e turbogeradores.

3.3.3 Concentração

Na tecnologia da concentração a análise ambiental se voltou para a racionalização do uso da vinhaça na fertirrigação e pela redução do consumo de água nas plantas industriais que realizam a recirculação dos condensados.

Quanto à racionalização, resultado de aplicação de volumes reduzidos de vinhaça concentrada, essa característica agrega vantagens ambientais das mais diversas formas, desde a redução na utilização de fertilizantes minerais até a mitigação das emissões dos gases de efeito estufa.

Já no âmbito da redução do consumo de água, as Usinas e as Destilarias sempre foram consideradas grandes vilões quanto ao uso excessivo de recursos hídricos, haja vista a implantação dessas unidades próximas aos grandes cursos de água. Portanto, a busca pelo fechamento dos circuitos de água das plantas industriais do Setor Sucroenergético vem sendo incluída como um dos principais fatores na busca pela sustentabilidade ambiental do Setor.

Um dos pontos levados em consideração neste estudo para atestar o aprimoramento ambiental das plantas industriais do Setor Sucroenergético foi o planejamento quanto à redução dos grandes volumes de água utilizados em seu processo. Essa mesma preocupação pode ser verificada no Protocolo Agroambiental do Setor Sucroalcooleiro do Estado de São Paulo que apresenta um dos itens de adequação para a sua certificação verde fundamentado na redução do consumo de água pela planta industrial. Portanto, a concentração da vinhaça, seguida da reutilização do seu condensado para usos menos exigentes dentro do processo produtivo, por exemplo, a limpeza da cana e dos pisos industriais, aparece como um ótimo incentivo para a adoção desta tecnologia.

Portanto, calculou-se para a unidade produtiva padrão, estabelecida como modelo para este estudo, a redução anual no consumo de água obtida pela utilização do concentrador de vinhaça e utilização de seu condensado.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

4.1 Viabilidade Técnica

4.1.1 Aplicação “in natura” no solo

A partir dos dados referentes à safra 2009/2010 de 165 Unidades Agroindustriais (Destilarias e Unidades Agroindustriais de açúcar e álcool certificadas pelo Projeto Etanol Verde da Secretaria de Meio Ambiente do Estado de São Paulo) elaborou-se a Tabela 18 que apresenta informações gerais em relação à produção de álcool e vinhaça, número de Unidades Agroindustriais que se utilizam da aplicação “in natura” da vinhaça no solo agrícola e aquelas que adotam, preliminarmente, alguma das tecnologias estudadas - biodigestão e concentração.

Tabela 18 – Unidades Agroindustriais integrantes do Protocolo (safra 2009/2010).

Nº	Produção de álcool* m ³	m ³ vinhaça/m ³ etanol	Produção de Vinhaça** m ³	Aplicação "in natura"	Uso de outra tecnologia
165	15.110.954	12	181.935.886	161	8

*Estimativa considerando a partir da moagem de cana

** Estimativa considerando a média do Protocolo de 12,04 litros de vinhaça/litro de álcool produzidos

Antes de qualquer inferência que pode vir a ser estabelecida a partir dos dados apresentados, ressalta-se o grau de importância que a vinhaça assume frente às questões ambientais, tanto pelo seu potencial poluidor quanto pelos elevados volumes produzidos e consequente escolha dos destinos mais adequados para este subproduto, a fim de reduzir ao máximo o risco à saúde da sociedade e aos ecossistemas possivelmente afetados. Esses fatores demonstram o grau de responsabilidade assumida pelos profissionais ambientais/agrícolas das Unidades Agroindustriais durante o correto gerenciamento desse subproduto, uma vez que qualquer escolha feita de maneira equivocada pode resultar em consequências de grandes proporções. Esta mesma linha de pensamento pode ser estendida às

tecnologias preliminares de biodigestão e concentração, já que o baixo percentual de Unidades Agroindustriais que se utilizam dessas tecnologias retrata o desinteresse em assumir riscos com inovações tecnológicas até então pouco estabelecidas no Setor.

Apesar de todas as condições expostas, a proposta da “fertilização natural” do solo agrícola, através do reuso de subprodutos, é uma tecnologia difundida pelo Setor Sucroenergético, tanto nas regiões mais tradicionais do eixo centro-sul e do nordeste quanto nas áreas de expansão do centro-oeste e sul de Minas Gerais. Dentro do estudo realizado, verificou-se a utilização dessa prática em 100% das Unidades Agroindustriais que participam do Projeto Etanol Verde (Protocolo Agroambiental), sendo que apenas 5% desse montante se utilizam das tecnologias de biodigestão e concentração, cuja finalidade é de realizar o uso mais eficiente desse subproduto quando comparado à simples fertirrigação do canavial. Esse padrão demonstra uma tendência do setor no fechamento do ciclo produtivo, processo que teve início a mais de cinco décadas e vem se consolidando nos últimos anos. Seja no âmbito agrícola ou industrial, com a reutilização da maior parte de seus subprodutos, os empreendimentos de açúcar e/ou álcool visam reduzir ao máximo a utilização de novos insumos, obtendo vantagens na logística produtiva (redução na compra e no transporte de novos insumos), no custo final de produção e no âmbito ambiental através da redução da pressão sobre os recursos naturais (ex.: água, fertilizantes minerais/minérios, energia, etc.).

Contudo, quando se aborda em especial a questão da vinhaça nota-se um uso pouco eficiente desse subproduto pela maioria das empresas do Setor Sucroenergético, sobretudo devido à adoção da fertirrigação in natura como padrão de reutilização. Sem entrar no mérito das vantagens nutricionais para a cultura, comprovado por muitos estudos científicos, nota-se, em campo, que parte considerável das Unidades Agroindustriais e Destilarias do Estado de São Paulo ainda não investem na potencialização do uso de seus subprodutos, seja pela falta de um setor de P&D (pesquisa e desenvolvimento) em sua estrutura empresarial ou pela falta de capital/crédito para o investimento nessas novas tecnologias. Portanto, rotineiramente, experiências passadas desenvolvidas de forma equivocada, sob grande especificidade do local pesquisado e/ou utilizando conhecimentos ultrapassados; se tornam justificativas para a inviabilidade de tecnologias como a

biodigestão. O agravante é o fato de esses subprodutos estarem sendo subutilizados, como no caso da vinhaça, através das seguintes vias:

- Matéria orgânica com potencial para a geração de energia;
- Elevados volumes de água com potencial de reutilização no processo industrial;
- Energia térmica (calor) com potencial de utilização em outras etapas do processo industrial que se utilizam de calor.

4.1.2 Biodigestão

4.1.2.1 Plantas em funcionamento

Dentre as 43 Unidades Agroindustriais visitadas durante o período de elaboração do projeto, verificou-se a existência de apenas um projeto de biodigestão para a vinhaça. Este projeto, em escala piloto, se encontrava na fase final de instalação e foi projetado para um volume de tratamento de aproximadamente $40 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Entre os produtos finais do processo, a vinhaça biodigerida terá a mesma finalidade de fertirrigação e o biogás gerado será destinado à produção de energia elétrica através de turbogeradores específicos para este tipo de bicomcombustível. O projeto advém de uma parceria entre a respectiva empresa de açúcar e álcool e a concessionária de energia elétrica local, sendo a última a maior investidora quanto aos custos relacionados com a aquisição, instalação e manutenção da tecnologia. Esta é um tipo de parceria que vem se ampliando no âmbito da geração de energia elétrica, principalmente na cogeração pelo bagaço da cana-de-açúcar no Estado De São Paulo, trazendo benefícios tanto para a usina, através do aumento da produção de energética elétrica e da possibilidade de modernização de seu parque industrial, quanto para as concessionárias que veem a possibilidade de aumentar a oferta de energia elétrica em suas redes de distribuição, especialmente em áreas com grande representatividade de termelétricas movidas a combustíveis fósseis. Essa substituição tem como principal vantagem a “limpeza” da matriz energética local,

uma vez que reduz consideravelmente as emissões referentes aos gases de efeito estufa (GEE).

Outra planta em funcionamento no Estado de São Paulo pertence à Usina São Martinho de Pradópolis. A planta, em escala industrial, apresenta um reator de 5.000 m³, sendo o biogás destinado à queima nas caldeiras geradoras de vapor. Assim, a empresa obtém um aumento na geração de vapor e na geração de energia elétrica através do sistema de cogeração⁹. Outro uso designado para o biogás produzido nesta unidade é a secagem de levedura, retirada do processo de fermentação em dornas, por meio da energia térmica da combustão do gás nas caldeiras.

Uma característica comum às Unidades Agroindustriais visitadas que não apresentaram projetos referentes à biodigestão da vinhaça foi a falta de argumentos que inviabilizassem a utilização dessa tecnologia. A maioria das justificativas baseava-se em experiências passadas consideradas mal sucedidas, que apresentavam um nível tecnológico diferente do atual e que não deixaram significativo aporte de documentação (artigos, publicações, etc.) que retratesse os motivos da interrupção de sua atividade. Os gestores desses empreendimentos, por meio de simples especulações, adotaram um posicionamento negativo quanto à viabilidade dessa tecnologia, demonstrado mais uma vez a ausência ou, ao menos, a ineficiência de seus setores de P&D.

4.1.2.2 Plantas disponíveis no mercado

Este item tem por finalidade apresentar as empresas que oferecem projetos comerciais no campo da biodigestão, especialmente para Unidades Agroindustriais de Açúcar e Alcool.

a) Planta DEDINI – Benchmark

O projeto oferecido pela empresa Dedini – Indústria de Base é denominado “Methax Dedini” (Figura 10) e se utiliza de reatores de leito de lodo expandido com

⁹ Cogeração – “Produção simultânea de duas ou mais tipos de energia (elétrica, mecânica e térmica-útil) a partir de uma única fonte primária”.

circulação interna, uma variação dos reatores anaeróbios de fluxo ascendente e manta de lodo (UASB).

Figura 10 - Biodigestores Dedini em escala industrial (fonte: Dedini – Indústria de Base).

A circulação interna (Figura 11) visa aumentar a eficiência no tratamento do efluente, já que proporciona um maior tempo de detenção deste no reator.

Figura 11 – Desenhos esquemáticos dos reatores de leito de lodo com recirculação interna (fonte: Dedini – Indústria de Base).

O projeto apresenta como propostas a utilização do biofertilizante na lavoura e a utilização do biogás, gerado a partir da vinhaça, para três diferentes usos:

- Queima do biogás, em caldeiras pré-existent, para a produção de vapor utilizável na indústria, resultando em economia e possível venda de bagaço residual;
- Geração de energia elétrica na combustão direta do biogás em turbinas ou através da utilização do vapor nas turbinas;
- Utilização direta em motores de caminhões.

A experiência mais representativa desta tecnologia foi iniciada na Usina São João, São João da Boa Vista/SP, em 1986. Com uma experiência de mais de 20 anos no campo da biodigestão de vinhaça e utilização do metano, a Dedini é uma das indústrias de base mais conceituadas no fornecimento de tecnologias para o Setor Sucroenergético.

b) Planta BRASMETANO

O projeto “STILLAX” (Figura 12), oferecido pela empresa BRASMETANO, tem como proposta a utilização de um sistema integrado para a geração de biogás, a partir do tratamento biológico da vinhaça, e demais subprodutos das Unidades Agroindustriais de Açúcar e Alcool. O processo de tratamento é composto por quatro etapas:

- Unidade de equalização modular – normaliza a vazão de entrada para o sistema;
- RECS – Sistema Hermético Anaeróbico – realiza a biodigestão da vinhaça e tem como produtos secundários o biogás e a vinhaça biodigerida (biofertilizante);
- Termelétrica 100% a biogás ou a “álcool + biogás” para geração de energia; e unidade de geração de crédito de carbono;
- Unidade de polimento/ACAS - segunda etapa de tratamento da vinhaça já biodigerida.

Figura 12 - Fluxograma do sistema integrado Brasmetano (Fonte: Brasmetano).

Quanto aos benefícios advindos da implantação do sistema integrado STILAAX, a empresa destaca a transformação da matéria orgânica da vinhaça em biogás (**98%**); a obtenção de energia elétrica para auto sustentação de todo o sistema e/ou venda; obtenção de energia térmica (inclusive para a concentração da vinhaça); valorização da vinhaça pela concentração possibilitando a complementação química para ampliar seu potencial como adubo; entre outros.

Em relação à planta específica de biodigestão, a tecnologia adotada é denominada RECS-S - sistema hermético anaeróbio modular de alta estabilidade, destacando como particularidades desse sistema:

- Conservação de energia (baixo consumo energético);
- Introdução da energia do biogás no processo industrial;
- Geração de Créditos de Carbono;
- Redução dos passivos ambientais com obtenção de biofertilizante.

Por meio do levantamento realizado nas Unidades Agroindustriais visitadas e da análise da literatura específica do Setor, constatou-se que a biodigestão, até pouco tempo, era considerada uma tecnologia de baixa aceitação e confiabilidade, haja vista o reduzido número de Unidades Agroindustriais que mantiveram plantas em funcionamento no Estado de São Paulo (São Martinho).

Entretanto, o aumento da demanda de energia elétrica, a necessidade atual de ampliar a participação da energia renovável na Matriz Energética Nacional (matriz + limpa) e a potencialidade de geração a partir do biogás da vinhaça, restabeleceu o interesse por esta tecnologia. As recentes parcerias entre concessionárias de energia elétrica e Unidades Agroindustriais de Açúcar e Alcool comprovam um novo cenário de investimentos que vem se estabelecendo nos últimos anos.

A partir da utilização de reatores mais eficientes e de sistemas integrados de produção e uso de subprodutos (biofertilizante, biogás e energia), empresas como a Dedini e a Brasmetano, propõem um uso mais eficiente e racional da vinhaça, desqualificando a simples fertirrigação “in-natura” que deixa de utilizar parte do potencial energético inerente a esse subproduto.

4.1.3 Concentração

4.1.3.1 Plantas em funcionamento

Dentre as 43 Unidades Agroindustriais visitadas durante o período de elaboração do projeto, verificou-se a existência de apenas um projeto de concentração para a vinhaça. O projeto, uma planta em escala piloto reduzida, já havia transitado por outras Unidades Agroindustriais com a finalidade de atestar a eficiência do projeto a partir de vinhaças de diferentes características.

Diferente da biodigestão, a tecnologia de concentração da vinhaça vem ampliando a sua participação dentro do Setor Sucroenergético Nacional de maneira mais expressiva, tendo como principais representantes os Estados de Minas Gerais, Mato Grosso e São Paulo. Quanto ao Estado de São Paulo, 6 Unidades Agroindustriais apresentam plantas de concentração em escala industrial e em pleno funcionamento. Apesar do número de plantas em funcionamento parecer pouco significativo, constatou-se através das visitas de campo que a maior parte das Unidades Agroindustriais contempla a possibilidade futura de utilização dessa tecnologia.

Dentre as Unidades Agroindustriais que se utilizam da concentração, uma em especial se destaca por ser a pioneira na adoção dessa tecnologia. A Usina Santa Elisa (atualmente integrante do grupo LDC-SEV), localizada no município de Sertãozinho - SP, foi a primeira Usina do país a instalar, em 1978, uma unidade de concentração de vinhaça. Apresentando na época uma vazão de entrada da vinhaça de $70 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, com 6° de Brix¹⁰, e uma vazão de saída da vinhaça concentrada de $5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, com um Brix de 60° , a planta ainda se encontra em pleno funcionamento, porém, apresentando parâmetros de concentração diferentes dos iniciais: Brix e eficiência de concentração.

As demais Unidades Agroindustriais com plantas de concentração são:

- Usina Cerradinho / Potirendaba - SP: em funcionamento desde o ano de 2008, apresentou na safra 2009/2010 uma vazão média de entrada da vinhaça na planta de concentração de $105 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, com $4,5^\circ$ Brix, e uma vazão de saída da vinhaça concentrada de $27 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, com 17° Brix. Foram utilizadas torres de resfriamento para o condensado (água resultante do processo de concentração), reduzindo a temperatura de 65°C para 35°C , sendo 100% utilizado para o tratamento de levedura e diluição do mosto, reduzindo a captação de água para o processo.
- Usina Rio Pardo / Cerqueira César – SP: em funcionamento desde o ano de 2009, apresentou uma vazão média de entrada da vinhaça na planta de concentração de $100 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ e uma vazão de saída concentrada de $20 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Portanto, a tecnologia proporcionou uma redução de 80% no volume da vinhaça a ser utilizada para a fertirrigação. Com duas torres de resfriamento, o condensado seria destinado para o tratamento de levedura e diluição do mosto.

As demais Unidades Agroindustriais que apresentam a tecnologia de concentração de vinhaça são a Usina Santa Rosa em Boituva/SP, a Usina Zanin em Araraquara/SP e a Usina da Pedra em Serrana/SP. Apesar das inúmeras tentativas de contato, as informações detalhadas dessas plantas não foram obtidas.

¹⁰Brix: Escala numérica que mede a quantidade de sólidos solúveis em uma solução.

4.1.3.2 Plantas disponíveis no mercado

a) Planta Ecovin – Evaporador de Concentração de Vinhaça

A tecnologia oferecida pela empresa Citrotec de Araraquara/SP, denominada “Ecovin” (Figura 13), se utiliza de eficientes evaporadores com o funcionamento baseado no princípio de névoa turbulenta descendente acelerada termicamente. Segundo os fornecedores, a tecnologia apresenta como vantagens a alta taxa de evaporação, baixa taxa de incrustação (limpeza automatizada por meio de produtos químicos), baixo consumo energético, operação fácil, possibilidade de automatização completa e construção 100% em aço inoxidável.

Figura 13 - Concentrador de vinhaça ECOVIN em escala industrial (Fonte: Citrotec - Araraquara).

Além da planta básica, a empresa também oferece o Ecovin JL (Figura 14), desenvolvida a partir da junção do evaporador com as colunas de destilação A, B, e opcionalmente a C. Segundo os fornecedores, a planta tem como objetivo otimizar o consumo energético na produção/concentração de vinhaça. A junção das etapas do

processo permitiu a produção de álcool com a vinhaça já concentrada e um adicional mínimo no consumo global de vapor.

Figuras 14 – Desenhos esquemáticos dos concentradores – Ecovin e Ecovin JL
(Fonte: Citrotec – Araraquara/SP).

As tecnologias mencionadas (Ecovin e Ecovin JL) apresentam como propostas a utilização da vinhaça concentrada para os seguintes usos:

- Fertirrigação;
- Alimentação animal;
- Solidificação;
- Queima;
- Biodigestão.

b) Planta Dedini – Benchmark

O sistema Dedini para concentração de vinhaça, tecnologia T.A.S.T.E. (Thermally Accelerated Short Time Evaporator), também baseia-se na evaporação em múltiplos estágios com evaporadores em névoa turbulenta de fluxo descendente (Figuras 15 e 16).

Figura 15 - Concentrador de vinhaça Dedini- Benchmark em escala industrial
(Fonte: Dedini-Indústria de Base)

Quanto às vantagens do sistema T.A.S.T.E., a empresa destaca o aquecimento e evaporação rápida e uniforme, minimizando a ocorrência de incrustação (maior tempo de campanha, fácil limpeza); layout compacto, com equipamentos leves, 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 7 estágios, além da automatização de todo o sistema.

Figura 16 - Fluxograma do sistema de concentração Dedini- Benchmark
(Fonte: Dedini-Indústria de Base).

Em relação aos benefícios advindos da instalação da tecnologia, destacam-se as seguintes:

- Redução do volume de vinhaça a 1/8, sem aumento do consumo de vapor da destilaria, já que os sistemas são integrados;
- Economia no custo da fertirrigação, facilidade de distribuição em terras descontínuas e viabilização da distribuição para áreas distantes;
- Produção de água evaporada de boa qualidade possibilitando a reutilização no processo industrial (embebição do caldo para extração, diluição do fermento na fermentação, diluição do mel para o preparo do mosto, lavagem de pisos, etc.) e consequente redução na captação dos corpos e cursos d'água.

Com um histórico de mais de três anos no Estado de São Paulo, 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. Através das visitas de campo, constatou-se a grande aceitação que essa tecnologia apresenta

quando o assunto a ser debatido é o melhor gerenciamento do subproduto vinhaça. Quanto à viabilidade técnica, o fornecimento da tecnologia por empresas com alto nível de credibilidade e excelência tecnológica, a nível nacional e internacional, além dos ganhos econômicos e ambientais alcançados pelas Unidades Agroindustriais que já se utilizam dessa tecnologia, atestam essa viabilidade. Contudo, duas questões em especial freiam a introdução dessa tecnologia na maior parte das Unidades Agroindustriais pesquisadas: o alto custo da planta de concentração e a preferência por tecnologias que atuem na redução da produção de vinhaça.

Quanto às tecnologias que reduzem a produção de vinhaça, estas passaram a vigorar como a primeira opção no gerenciamento desse subproduto, uma vez que se torna mais sensato investir na redução da produção do que na remediação pós-produção. Uma dessas tecnologias, já disponível no mercado, tem como princípio básico a fermentação com teor alcoólico elevado (até 16%) em associação com leveduras adaptadas a essa condição, proporcionando uma menor relação de litros vinhaça por litro de álcool produzido. Dentre as vantagens destacadas estão, além da redução na produção de vinhaça, a economia de água e insumos químicos (antibióticos, ácidos e antiespumantes). Vale lembrar que a adoção dessa tecnologia não acarreta perdas em termo de nutrientes para a vinhaça, já que a redução do volume produzido é proporcionada apenas pela eliminação de parte da água integrante do caldo/mel a ser fermentado.

Apesar de a concentração parecer ter sido preterida, provisoriamente, por estas novas tecnologias, não se pode descartar o seu potencial de aplicação e, sobretudo, uma possível aplicação conjunta dessas tecnologias a fim de ampliar a eficiência na redução do volume de produção, facilitando o manejo e o retorno da vinhaça à lavoura.

4.2 Viabilidade Econômica

4.2.1 Aplicação in-natura no solo

Os dados apresentados na Tabela 19 retratam de forma simplificada, todas as informações utilizadas na análise econômico do cenário I.

Tabela 19 - Análise Econômica para o Cenário I da aplicação in-natura

Parâmetro/Variável	Unid.	Protocolo	Centro-Sul	Brasil
Área Total de Cultivo	ha	3.002.967,89	6.309.800,00	7.409.600,00
Cana Processada	t	343.693.694,54	542.844.800,00	604.513.600,00
Produção de Álcool	m ³	15.110.953,79	23.737.031,00	25.762.622,70
Produção de vinhaça	m ³	170.652.157,78	285.839.910,17	310.231.964,49
Taxa de aplicação de vinhaça Cana Planta	m ³ .ha ⁻¹	118,00	118,00	118,00
Taxa de aplicação de vinhaça Cana Soca	m ³ .ha ⁻¹	227,00	227,00	227,00
Área de cana planta fertirrigada	ha	405.400,67	851.823,00	1.000.296,00
Área de cana soca fertirrigada	ha	541.034,71	816.408,79	846.682,98
Adubação Complementar	S/N	Não	Não	Não
Economia c/ Fertilizantes Cana Planta	R\$	201.281.430,25	422.930.119,50	496.646.964,00
Economia c/ Fertilizantes Cana Soca	R\$	223.377.000,94	337.070.698,65	349.570.002,0
Ganhos Econômicos safra 2009/2010	R\$	424.658.431,19	760.000.818,15	846.216.966,22

Fonte: Próprio autor.

Nota-se que a relação entre a área de cultivo e a área efetivamente fertirrigada com vinhaça se encontra em torno de 25 a 35 %, comprovando o completo potencial de reciclagem desse subproduto pelo Setor Sucroenergético. Adicionalmente, quando se volta à atenção para as informações econômicas, fica claro o grau de importância desse assunto dentro do planejamento agrícola de uma Usina, haja vista os significativos ganhos econômicos que essa prática proporcionou para o Setor.

Tomando como referência o Protocolo Agroambiental, com as 165 Usinas analisadas na safra 2009/2010, o ganho econômico obtido com a substituição da adubação mineral girou em torno de 2,57 milhões de Reais por Unidade Agroindustrial.

A Tabela 20 apresenta as mesmas informações da análise econômica realizada para o cenário I, porém apresenta como particularidade o uso da adubação complementar como prática de cultivo para a cultura da cana-de-açúcar.

Tabela 20 - Análise Econômica para o Cenário II da aplicação in-natura

Parâmetro/Variável	Unid.	Protocolo	Centro-Sul	Brasil
Área Total de cultivo	ha	3.002.967,89	6.309.800,00	7.409.600,00
Cana Processada	t	343.693.694,54	542.844.800,00	604.513.600,00
Produção de Álcool	m ³	15.110.953,79	23.737.031,00	25.762.622,70
Produção de vinhaça	m ³	170.652.157,78	285.839.910,17	310.231.964,49
Taxa de aplicação de vinhaça Cana Planta	m ³ .ha ⁻¹	118,00	118,00	118,00
Taxa de aplicação de vinhaça Cana Soca	m ³ .ha ⁻¹	227,00	227,00	227,00
Área de cana planta fertirrigada	ha	405.400,67	851.823,00	1.000.296,00
Área de cana soca fertirrigada	ha	541.034,71	816.408,79	846.682,98
Adubação Complementar	S/N	Sim	Sim	Sim
Economia c/ Fertilizantes Cana Planta	R\$	125.600.401,20	263.910.051,84	309.909.651,67
Economia c/ Fertilizantes Cana Soca	R\$	142.540.046,64	215.089.614,87	223.065.598,41
Ganhos Econômicos safra 2009/2010	R\$	268.140.447,84	478.999.666,71	532.975.250,08

Fonte: Próprio autor.

Através da análise comparativa entre as Tabelas 19 e 20, nota-se que a adubação complementar influenciou diretamente nos ganhos econômicos advindos da substituição da adubação mineral, já que resultou em uma redução de aproximadamente 37% nos valores finais. Por outro lado, dentre os benefícios da adubação complementar, ressalta-se o aumento na longevidade e/ou produtividade da cultura da cana-de-açúcar, sendo seus resultados diretamente dependentes das características locais e da variedade de cana utilizada.

Portanto, partindo do preceito que a prática da adubação complementar é estritamente necessária, também se constata os ganhos econômicos significativos que a substituição de parte da adubação mineral proporcionaria para o Setor, alcançando valores próximos de 1,62 milhões de Reais por Unidade Agroindustrial quando se utiliza o Protocolo Agroambiental como referência.

As Tabelas 21 e 22 apresentam informações referentes às análises econômicas realizadas para os cenários III e IV. A particularidade desses cenários são as taxas de aplicação de vinhaça adotadas, sendo essas as mesmas indicadas por Luz (2005) como as dosagens médias de vinhaça em cana-de-açúcar observadas em São Paulo (Protocolo Agroambiental), Centro-Sul e Brasil.

Tabela 21 - Análise Econômica para o Cenário III da aplicação in-natura (continua)

Parâmetro/Variável	Unid.	Protocolo	Centro-Sul	Brasil
Área Total de cultivo	ha	3.002.967,89	6.309.800,00	7.409.600,00
Cana Processada	t	343.693.694,54	542.844.800,00	604.513.600,00
Produção de Álcool	m ³	15.110.953,79	23.737.031,00	25.762.622,70
Produção de vinhaça	m ³	170.652.157,78	285.839.910,17	310.231.964,49
Taxa de aplicação de vinhaça Cana Planta	m ³ .ha ⁻¹	300,10	290,50	273,80
Taxa de aplicação de vinhaça Cana Soca	m ³ .ha ⁻¹	270,00	252,90	250,30
Área de cana planta fertirrigada	ha	405.400,67	851.823,00	1.000.296,00

Tabela 21 - Análise Econômica para o Cenário III da aplicação in-natura (conclusão)

Parâmetro/Variável	Unid.	Protocolo	Centro-Sul	Brasil
Área de cana soca fertirrigada	ha	181.449,70	151.780,66	145.229,40
Adubação Complementar	S/N	Não	Não	Não
Economia c/ Fertilizantes Cana Planta	R\$	201.281.430,25	422.930.119,50	496.646.964,00
Economia c/ Fertilizantes Cana Soca	R\$	74.915.136,37	62.665.680,69	59.960.863,81
Ganhos Econômicos safra 2009/2010	R\$	276.196.566,62	485.595.800,19	556.607.827,81

Fonte: Próprio autor.

Tabela 22 - Análise Econômica para o Cenário IV da aplicação in-natura

Parâmetro/Variável	Unid.	Protocolo	Centro-Sul	Brasil
Área de cultivo	ha	3.002.967,89	6.309.800,00	7.409.600,00
Cana Processada	t	343.693.694,54	542.844.800,00	604.513.600,00
Produção de Álcool	m ³	15.110.953,79	23.737.031,00	25.762.622,70
Produção de vinhaça	m ³	170.652.157,78	285.839.910,17	310.231.964,49
Taxa de vinhaça na cana planta	m ³ .ha ⁻¹	300,10	290,50	273,80
Taxa de vinhaça na cana soca	m ³ .ha ⁻¹	270,00	252,90	250,30
Área de cana planta fertirrigada	ha	405.400,67	851.823,00	1.000.296,00
Área de cana soca fertirrigada	ha	181.449,70	151.780,66	145.229,40
Adubação Complementar	S/N	Sim	Sim	Sim
Economia c/ Fertilizantes Cana Planta	R\$	132.785.433,61	278.211.262,04	325.077.721,31
Economia c/ Fertilizantes Cana Soca	R\$	48.563.795,58	40.370.468,51	38.591.221,67
Ganhos Econômicos safra 2009/2010	R\$	181.349.229,19	318.581.730,56	363.668.942,98

Fonte: Próprio autor.

A característica que mais se destaca nos dois últimos cenários é o alto volume de vinhaça aplicado especialmente para a fertirrigação da cana planta, chegando a valores uma vez e meia maiores do que os utilizados nos cenários I e II.

Com isso, a relação entre a área de cultivo e a área efetivamente fertirrigada com vinhaça apresentou uma expressiva redução chegando a valores entre 15 e 20%. Pelos mesmos motivos, os ganhos econômicos para o Setor apresentou uma redução para ambos os cenários: 1,67 milhões de Reais para o cenário III (sem adubação complementar) e 1,1 milhões de Reais para o cenário IV (com adubação complementar) por Unidade Agroindustrial, quando se utiliza o Protocolo Agroambiental como referência.

Assim como na comparação anterior, a adoção da adubação complementar no cenário IV proporcionou uma redução dos ganhos econômicos por Unidade Agroindustrial em cerca de 0,57 milhões de Reais quando comparado ao cenário III.

Ressalta-se que a definição de taxas de aplicação de vinhaça mais adequadas não é o objetivo desse estudo, uma vez que a definição de quanto, como e onde aplicar a vinhaça deve ser norteadas primeiramente pelas condições observadas e testadas em campo ao em vez de se basear por análises globais que deixam de considerar importantes particularidades locais. Contudo, o estudo procurou alertar para a possibilidade de um gerenciamento mais adequado do uso da vinhaça para fertirrigação, assim como para a adubação complementar, a fim de potencializar a sua distribuição no campo e consequentemente os ganhos econômicos e ambientais para o Setor Sucroenergético. Portanto, duas perguntas devem fazer parte do planejamento agrícola desses empreendimentos:

- A utilização da vinhaça e do adubo complementar está sendo feita da maneira mais racional possível?
- Em caso positivo, os impactos positivos e negativos observados em campo comprovam esta afirmação?

4.2.2 Biodigestão

4.2.2.1 Custo do biogás para o fluxo de caixa

Como mencionado na alínea “e” do item 3.2.2.4, o custo referente à implantação do biodigestor foi incluído na variável “custo com combustíveis e insumos energéticos”, sendo este valor integrante do fluxo de caixa de todos os cenários propostos para o aproveitamento do biogás. A partir desta análise global foi possível calcular um valor de referência para a utilização do biogás (VB) pelas tecnologias propostas de 0,053 R\$/m³. As variáveis econômicas calculadas para a obtenção do valor atribuído ao biogás estão apresentadas na Tabela 23:

Tabela 23 – Variáveis calculadas para obtenção do custo do biogás		
CPL Total (R\$)	CUL Total (R\$/ano)	Custo do biogás (R\$/Nm³)
4.037.844,21	537.873,17	0,053

Fonte: Próprio autor

4.2.2.2 Premissas adotadas para a análise econômica

A seguir estão descritas as principais premissas adotadas para o estudo econômica das tecnologias propostas:

- Depreciação dos equipamentos de 10% ao ano;
- Taxa de juros de 11,92% (SELIC – BCB, 20/04/2011);
- Horizonte temporal do estudo de 20 anos;
- Valor dos créditos de carbono vendidos no mercado do Protocolo de Kyoto de US\$ 10,00/TCO_{2equiv};

- Taxa cambial (BCB, 28/06/2011) de US\$1,58/R\$;
- Taxa de desconto igual à taxa SELIC (Banco Central do Brasil, 20/04/2011) de 11,92%;
- Taxa mínima de atratividade de 15%;
- Preços médios de venda de energia elétrica:
 - R\$ 102,41/MWh (Leilão de Energia A-3 / 2011, total contratado de 2.744,6 MW de potência instalada);
 - R\$ 144,20/MWh (Leilões de Fontes Alternativas 2010, total contratado de 2.892,2 MW de potência instalada);
 - R\$ 169,08/MWh para energia gerada por meio de biogás gerado de aterros sanitários (Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica / PROINFA do Ministério de Minas e Energia (MME) – 2002/2009);
- Os custos com a elaboração dos documentos e com o registro do projeto para geração de créditos de carbono não foram incluídos na análise econômica.

4.2.2.3 Estimativas de custos e receitas para as tecnologias estudadas

A Tabela 24 apresenta os custos e as receitas referentes às tecnologias incluídas na análise econômica deste estudo. As 4 primeiras linhas retratam os custos (saídas), sendo as 3 primeiras obtidas por meio de trabalhos científicos com a mesma linha de pesquisa (geração de energia elétrica através do biogás). Por outro lado, o custo referente ao combustível e insumos energéticos foi obtido por meio da uniformização dos custos globais da planta de biodigestão, ou seja, o montante total

gasto com a tecnologia da biodigestão foi distribuído de forma anual pelos vinte anos de estudo e incluído como parte integrante desta variável econômica.

As últimas linhas representam as receitas obtidas pela implantação de cada uma das tecnologias, sendo estas calculadas a partir de valores atualizados dos mercados regulados de energia elétrica e de créditos de carbono. Para a valoração da energia elétrica gerada por meio de fontes renováveis a ser disponibilizada pelas tecnologias contempladas neste estudo, utilizaram-se como base de cálculo três valores distintos: o valor de venda de energia gerada por meio do biogás de aterro sanitário fixado pelo Programa PROINFA¹¹ para o ano de 2004 (MME, 2004 apud SALOMON, 2007) e os valores médios alcançados pelos empreendedores na venda de energia elétrica gerada por meio de biomassa nos leilões de energia do MME para os anos de 2010 (Leilão A-3) e 2011 (Leilão A3).

Tabela 24 - Estimativa de custos e receitas para os cenários estudados (continua)

Custos/ Receitas	Biodigestor	Concentrador	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Investimento inicial Mil R\$	3.243,36 ¹	9.592,32 ²	1.200,00 ³	7.518,83 ⁴	9.911,39 ¹
Manutenção e operação Mil R\$/ano	105,83 ¹	959,23 ²	180,00 ³	306,10 ⁴	254,97 ¹
Sistema de limpeza Mil R\$/ano	N.A.	N.A.	0,0	439,38 ⁵	0,0 ⁶
Combustível e insumos energéticos Mil R\$/ano	N.A.	N.A.	537,87 ⁷	537,87 ⁷	537,87 ⁷
Venda de energia Mil R\$/ano (Base de 2006)	N.A.	N.A.	N.A.	3.284,17	4.389,84

¹¹ PROINFA - O Programa de incentivo as fontes renováveis de energia - PRIONFA, instituído pela Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002 e revisado pela Lei nº 10.762, de 11 de novembro de 2003, tem como objetivo a diversificação da matriz energética brasileira e a busca por soluções de cunho regional com a utilização de fontes renováveis de energia, mediante o aproveitamento econômico dos insumos disponíveis e das tecnologias aplicáveis, a partir do aumento da participação da energia elétrica produzida com base naquelas fontes, no Sistema Elétrico Interligado Nacional – SIN (ELETROBRÁS, 2006 apud SALOMON, 2007).

Tabela 24 - Estimativa de custos e receitas para os cenários estudados (conclusão)

Custos/ Receitas	Biodigestor	Concentrador	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Venda de energia Mil R\$/ano (Base de 2010)	N.A.	N.A.	N.A.	2.800,91	3.743,88
Venda de energia Mil R\$/ano (Base de 2011)	N.A.	N.A.	N.A.	1.989,19	2.658,88
Venda crédito de carbono Mil R\$/ano	N.A.	N.A.	1.425,14	153,69	205,43
Venda total de subprodutos Mil R\$/ano ⁸ (Base de 2011)	N.A.	883,37	1.425,14	2.142,88	2.864,31

¹Salomon, 2007 (adaptado pelo autor).

²Projeto Cerradinho Potirendaba/SP para a concentração de vinhaça, 2009 (adaptado pelo autor).

³Hamworth, 2011.

⁴ICLEI, 2007.

⁵CH2MHILL, 2003.

⁶Valor já incluso no investimento inicial.

⁷Custo do biodigestor foi contabilizado como insumo energético.

⁸Na concentração, foi considerada a economia com reutilização da água e a redução no transporte.

4.2.2.4 Viabilidade do cenário I (queimador + créditos de carbono)

A Tabela 25 apresenta nas primeiras colunas os fluxos de caixa referentes ao projeto do queimador de biogás. O fluxo 1 apresenta o valor referente ao investimento inicial para implantação do equipamento (incluindo montagem do queimador e analisador de gases), além do valor residual nulo que este apresenta após uma vida útil de 20 anos (depreciação de 10% ao ano). Já o fluxo 2 se refere ao somatório dos custos e receitas anuais desta tecnologia ao longo do horizonte temporal estabelecido para o estudo (20 anos). A partir desses valores de custos e receitas, calcularam-se os valores presentes líquidos e o valor uniforme líquido total

a fim de analisar a viabilidade econômica dessa tecnologia para a unidade padrão em estudo.

Tabela 25 - Fluxo de caixa, valor presente e uniforme líquido Cenário 1

Fluxo Anual	Fluxo 1	Fluxo 2	VPL 1	VPL 2	VUL Total
F0	-1.200.000,00	0,00	-1.200.000,00	#	#
F1	0,00	707.276,69	0,00	631.948,44	547.427,09
F2	0,00	707.276,69	0,00	564.642,99	547.427,09
F3	0,00	707.276,69	0,00	504.505,89	547.427,09
F4	0,00	707.276,69	0,00	450.773,67	547.427,09
F5	0,00	707.276,69	0,00	402.764,18	547.427,09
F6	0,00	707.276,69	0,00	359.867,92	547.427,09
F7	0,00	707.276,69	0,00	321.540,32	547.427,09
F8	0,00	707.276,69	0,00	287.294,78	547.427,09
F9	0,00	707.276,69	0,00	256.696,55	547.427,09
F10	0,00	707.276,69	0,00	229.357,18	547.427,09
F11	0,00	707.276,69	0,00	204.929,57	547.427,09
F12	0,00	707.276,69	0,00	183.103,62	547.427,09
F13	0,00	707.276,69	0,00	163.602,23	547.427,09
F14	0,00	707.276,69	0,00	146.177,84	547.427,09
F15	0,00	707.276,69	0,00	130.609,22	547.427,09
F16	0,00	707.276,69	0,00	116.698,73	547.427,09
F17	0,00	707.276,69	0,00	104.269,77	547.427,09
F18	0,00	707.276,69	0,00	93.164,56	547.427,09
F19	0,00	707.276,69	0,00	83.242,10	547.427,09
F20	0,00	707.276,69	0,00	74.376,43	547.427,09
R20	0,00	0,00	0,00	#	#

Fonte: Próprio autor.

A Tabela 26 apresenta os valores das variáveis econômicas utilizadas na análise de viabilidade do cenário 1.

Tabela 26 - Variáveis Econômicas para o Cenário 1

VPL Total (R\$)	VUL Total (R\$/ano)	TIR (%)	PayBack¹²(anos)
4.109.565,97	547.427,09	59	1,70

Fonte: Próprio autor.

¹²Payback (Tempo de recuperação de capital) - Tempo necessário para se readquirir o capital investido em um determinado projeto.

A análise principal realizada se baseia na taxa interna de retorno (TIR)¹³. Considerando uma taxa mínima de atratividade (TMA)¹⁴ de 15%, valor comum utilizada no Setor Sucroenergético, a implantação desta tecnologia se apresentou financeiramente favorável. Soma-se a este fato o alto valor presente líquido alcançado para esta tecnologia, representando o lucro revertido para o empreendedor no caso da escolha deste primeiro cenário. Portanto, o investimento realizado para a implantação de queimadores com a finalidade de obtenção e venda de créditos de carbono se apresentou economicamente viável para os empreendedores do Setor Sucroenergético, apresentando um retorno do investimento realizado em apenas 1,7 anos.

Ressalta-se que os ganhos ambientais obtidos com a mitigação das emissões dos GEE, tais como, climas mais amenos, a redução dos riscos de inundações, etc.; não puderam ser incluídas a nível econômico neste estudo. Esta ausência se faz pela falta de ferramentas que permitam a quantificação econômica desses benefícios. Portanto, a inclusão destas variáveis nas análises de viabilidade aplicadas para todas as tecnologias abordadas neste estudo poderiam ganhar contornos ainda mais favoráveis.

4.2.2.5 Viabilidade do cenário II (Motogerador + créditos de carbono)

As Tabelas 27, 28 e 29 apresentam nas primeiras colunas os fluxos de caixa referentes ao projeto do motogerador (ciclo otto) a biogás para geração de energia elétrica em associação com a venda dos créditos de carbono. O fluxo 1 apresenta o valor referente ao investimento inicial para implantação do equipamento, além do valor residual nulo que este apresenta após uma vida útil de 20 anos (depreciação de 10% ao ano). Já o fluxo 2 se refere ao somatório dos custos e receitas anuais desta tecnologia ao longo do horizonte de tempo estabelecido para o estudo. Como já mencionado, utilizaram-se diferentes bases de cálculo para a receita obtida com a

¹³ Taxa interna de retorno – Taxa de desconto (juros) que torna o Valor Atual Líquido do investimento na tecnologia igual a zero. Normalmente, comparável a Taxa Mínima de Atratividade (TMA), para aceitação ou não de um projeto/tecnologia.

¹⁴ Taxa Mínima de Atratividade - Taxa de desconto (juros) que representa o mínimo que um investidor se propõe a ganhar quando faz um investimento.

venda da energia elétrica, sendo os valores da Tabela 27 referentes ao Programa PROINFA. A partir desses valores de custos e receitas, calcularam-se os valores presentes líquidos e o valor uniforme líquido total a fim de analisar a viabilidade econômica dessa tecnologia para a unidade padrão.

Tabela 27 - Fluxo de caixa, valor presente e uniforme líquido Cenário 2 (PROINFA).

F.A¹	Fluxo 1	Fluxo 2	VPL 1	VPL 2	VUL Total
F0	-7.518.838,20	0,00	-7.518.838,20	0,00	#
F1	0,00	2.154.515,21	0,00	1.925.049,33	1.152.945,78
F2	0,00	2.154.515,21	0,00	1.720.022,63	1.152.945,78
F3	0,00	2.154.515,21	0,00	1.536.832,23	1.152.945,78
F4	0,00	2.154.515,21	0,00	1.373.152,46	1.152.945,78
F5	0,00	2.154.515,21	0,00	1.226.905,34	1.152.945,78
F6	0,00	2.154.515,21	0,00	1.096.234,22	1.152.945,78
F7	0,00	2.154.515,21	0,00	979.480,19	1.152.945,78
F8	0,00	2.154.515,21	0,00	875.160,99	1.152.945,78
F9	0,00	2.154.515,21	0,00	781.952,28	1.152.945,78
F10	0,00	2.154.515,21	0,00	698.670,73	1.152.945,78
F11	0,00	2.154.515,21	0,00	624.259,05	1.152.945,78
F12	0,00	2.154.515,21	0,00	557.772,56	1.152.945,78
F13	0,00	2.154.515,21	0,00	498.367,19	1.152.945,78
F14	0,00	2.154.515,21	0,00	445.288,77	1.152.945,78
F15	0,00	2.154.515,21	0,00	397.863,45	1.152.945,78
F16	0,00	2.154.515,21	0,00	355.489,14	1.152.945,78
F17	0,00	2.154.515,21	0,00	317.627,90	1.152.945,78
F18	0,00	2.154.515,21	0,00	283.799,05	1.152.945,78
F19	0,00	2.154.515,21	0,00	253.573,13	1.152.945,78
F20	0,00	2.154.515,21	0,00	226.566,42	1.152.945,78
R20	0,00	0,00	0,00	0,00	#

¹F.A - Fluxo Anual

Fonte: Próprio autor.

Na Tabela 28 foi utilizado de base para o cálculo da venda da energia elétrica o Leilão A-3 realizado em agosto de 2010 pelo MME. Nesta ocasião o valor médio obtido para a venda do MWh gerado por meio de biomassa foi de R\$144,20.

Tabela 28 - Fluxo de caixa, valor presente e uniforme líquido Cenário 2 (A-3/2010).

F.A¹	Fluxo 1	Fluxo 2	VPL 1	VPL 2	VUL Total
F0	7.518.838,20	0,00	-7.518.838,20	0,00	#
F1	0,00	1.671.251,07	0,00	1.493.255,07	669.681,63
F2	0,00	1.671.251,07	0,00	1.334.216,46	669.681,63
F3	0,00	1.671.251,07	0,00	1.192.116,21	669.681,63
F4	0,00	1.671.251,07	0,00	1.065.150,30	669.681,63
F5	0,00	1.671.251,07	0,00	951.706,84	669.681,63
F6	0,00	1.671.251,07	0,00	850.345,64	669.681,63
F7	0,00	1.671.251,07	0,00	759.779,88	669.681,63
F8	0,00	1.671.251,07	0,00	678.859,79	669.681,63
F9	0,00	1.671.251,07	0,00	606.558,07	669.681,63
F10	0,00	1.671.251,07	0,00	541.956,82	669.681,63
F11	0,00	1.671.251,07	0,00	484.235,90	669.681,63
F12	0,00	1.671.251,07	0,00	432.662,52	669.681,63
F13	0,00	1.671.251,07	0,00	386.581,96	669.681,63
F14	0,00	1.671.251,07	0,00	345.409,18	669.681,63
F15	0,00	1.671.251,07	0,00	308.621,50	669.681,63
F16	0,00	1.671.251,07	0,00	275.751,88	669.681,63
F17	0,00	1.671.251,07	0,00	246.383,02	669.681,63
F18	0,00	1.671.251,07	0,00	220.142,08	669.681,63
F19	0,00	1.671.251,07	0,00	196.695,93	669.681,63
F20	0,00	1.671.251,07	0,00	175.746,90	669.681,63
R20	0,00	0,00	0,00	0,00	#

¹F.A - Fluxo Anual

Fonte: Próprio autor.

Na Tabela 29 foi utilizado de base para o cálculo da venda da energia elétrica o Leilão A-3 realizado em agosto de 2011 pelo MME. Nesta ocasião o valor médio obtido para a venda do MWh gerado por meio de biomassa foi de R\$102,41.

Tabela 29 - Fluxo de caixa, valor presente e uniforme líquido Cenário 2 (A-3/2011) (continua)

F.A¹	Fluxo 1	Fluxo 2	VPL 1	VPL 2	VUL Total
F0	7.518.838,20	0,00	-7.518.838,20	0,00	#
F1	0,00	859.530,47	0,00	767.986,48	-142.038,97
F2	0,00	859.530,47	0,00	686.192,35	-142.038,97
F3	0,00	859.530,47	0,00	613.109,68	-142.038,97
F4	0,00	859.530,47	0,00	547.810,65	-142.038,97

Tabela 29 - Fluxo de caixa, valor presente e uniforme líquido Cenário 2 A-3/2011 (conclusão)

F.A¹	Fluxo 1	Fluxo 2	VPL 1	VPL 2	VUL Total
F5	0,00	859.530,47	0,00	489.466,27	-142.038,97
F6	0,00	859.530,47	0,00	437.335,84	-142.038,97
F7	0,00	859.530,47	0,00	390.757,54	-142.038,97
F8	0,00	859.530,47	0,00	349.140,05	-142.038,97
F9	0,00	859.530,47	0,00	311.955,01	-142.038,97
F10	0,00	859.530,47	0,00	278.730,35	-142.038,97
F11	0,00	859.530,47	0,00	249.044,27	-142.038,97
F12	0,00	859.530,47	0,00	222.519,90	-142.038,97
F13	0,00	859.530,47	0,00	198.820,50	-142.038,97
F14	0,00	859.530,47	0,00	177.645,19	-142.038,97
F15	0,00	859.530,47	0,00	158.725,15	-142.038,97
F16	0,00	859.530,47	0,00	141.820,19	-142.038,97
F17	0,00	859.530,47	0,00	126.715,68	-142.038,97
F18	0,00	859.530,47	0,00	113.219,87	-142.038,97
F19	0,00	859.530,47	0,00	101.161,43	-142.038,97
F20	0,00	859.530,47	0,00	90.387,27	-142.038,97
R20	0,00	0,00	0,00	0,00	#

¹ F.A - Fluxo Anual

Fonte: Próprio autor.

A Tabela 30 apresenta os valores das variáveis econômicas utilizadas na análise de viabilidade do cenário 2, discriminando-os por meio dos valores de referência para a venda de energia elétrica (PROINFA, Leilão A-3/2010 e o Leilão A-3/2011):

Tabela 30 - Variáveis Econômicas para o Cenário 2

Condições	VPL Total (R\$)	VUL Total (R\$/ano)	TIR (%)	PayBack (anos)	C/B¹⁵ (R\$/ano)
1 - PROINFA	8.655.228,89	1.152.945,78	28	3,49	117,64
2 - Leilão 2010	5.027.337,73	669.681,63	22	4,50	117,64
3 - Leilão 2011	-1.066.294,56	-142.038,97	10	8,75	117,64

Fonte: Próprio autor.

¹⁵ Custo/Benefício – variável econômica que retrata o valor que precisa ser investido em um projeto/tecnologia para a produção unitária de um determinado produto final, por exemplo, a energia elétrica.

Para as duas condições iniciais, utilizando o PROINFA e o Leilão A-3 2010 como referência, a tecnologia dos motogeradores para a geração de energia elétrica se demonstrou economicamente viável. Os elevados valores de VPL representaram os lucros totais em valores atualizados que seriam revertidos para o empreendedor no escolha desta tecnologia. Somam-se a este fato, os curtos períodos de tempo necessários para que os investimentos realizados fossem readquiridos: 3,49 e 4,5 anos, respectivamente. Considerando a taxa mínima de atratividade (TMA) de 15%, a implantação desta tecnologia, tomando como base as condições 1 e 2, apresentaram taxas internas de retorno superiores em 13 e 7 pontos percentuais, sendo outro demonstrativo da viabilidade desse projeto.

Quanto ao indicador Custo/Benefício calculado, o valor de R\$ 117,64 por MWh produzido viabilizou essa tecnologia para as duas condições iniciais, já que estas apresentaram valores para a venda de energia superiores ao valor calculado: R\$169,04/MWh (1) e R\$144,20/MWh (2), ou seja, o empreendedor venderia a energia produzida para a inserção ao Sistema Interligado Nacional /SIN¹⁶ por valores maiores que o seu custo de produção.

Contudo, quando se utilizou como referência o valor de venda de energia estabelecido pelo Leilão A-3 de 2011 a tecnologia apresentou contornos de inviabilidade. A simples verificação do valor negativo do VPL, além de uma TIR menor que a TMA estabelecida, inviabilizaram a realização do investimento. O valor uniforme líquido total (VUL) representa os custos anuais atribuídos ao empreendedor caso a opção fosse pela implantação desta tecnologia nas condições desfavoráveis apresentadas.

Quanto ao indicador Custo/Benefício calculado, o valor de R\$ 117,64 por MWh produzido inviabilizou essa tecnologia para a condição 3, já que esta apresenta um valor para a venda de energia inferior ao valor calculado: R\$102,41/MWh; ou seja, o empreendedor venderia a energia produzida para a inserção ao Sistema Interligado Nacional /SIN por valores menores que o seu custo de produção.

¹⁶ SIN – Sistema Interligado Nacional: sistema de produção e transmissão de energia elétrica do Brasil de composição hidrotérmica de grande porte, com forte predominância de usinas hidrelétricas e com múltiplos proprietários (NOS, 2011).

4.2.2.6 Viabilidade do cenário III (turbogerador + créditos de carbono)

As Tabelas 31, 32 e 33 apresentam nas primeiras colunas os fluxos de caixa referentes ao projeto do turbogerador a biogás para geração de energia elétrica em associação com a venda dos créditos de carbono. O fluxo 1 apresenta o valor referente ao investimento inicial para implantação do equipamento de geração, do sistema de limpeza do biogás e do sistema de interconexão; além do valor residual nulo que este apresenta após uma vida útil de 20 anos (depreciação de 10% ao ano). Já o fluxo 2 se refere ao somatório dos custos e receitas anuais desta tecnologia ao longo do horizonte de tempo estabelecido para o estudo. Neste cenário, também se utilizaram diferentes bases de cálculo para a receita obtida com a venda da energia elétrica, sendo os valores da Tabela 31 referentes ao Programa PROINFA. A partir desses valores de custos e receitas, calcularam-se os valores presentes líquidos e o valor uniforme líquido total a fim de analisar a viabilidade econômica dessa tecnologia para a unidade padrão.

Tabela 31 - Fluxo de caixa, valor presente e uniforme líquido Cenário 3 PROINFA (continua).

F.A	Fluxo 1	Fluxo 2	VPL 1	VPL 2	VUL Total
F0	-9.911.395,60	0,00	-9.911.395,60	0,00	#
F1	0,00	3.802.433,95	0,00	3.397.457,06	2.482.156,71
F2	0,00	3.802.433,95	0,00	3.035.612,10	2.482.156,71
F3	0,00	3.802.433,95	0,00	2.712.305,31	2.482.156,71
F4	0,00	3.802.433,95	0,00	2.423.432,19	2.482.156,71
F5	0,00	3.802.433,95	0,00	2.165.325,40	2.482.156,71
F6	0,00	3.802.433,95	0,00	1.934.708,19	2.482.156,71
F7	0,00	3.802.433,95	0,00	1.728.652,78	2.482.156,71
F8	0,00	3.802.433,95	0,00	1.544.543,22	2.482.156,71
F9	0,00	3.802.433,95	0,00	1.380.042,19	2.482.156,71
F10	0,00	3.802.433,95	0,00	1.233.061,29	2.482.156,71
F11	0,00	3.802.433,95	0,00	1.101.734,53	2.482.156,71
F12	0,00	3.802.433,95	0,00	984.394,69	2.482.156,71
F13	0,00	3.802.433,95	0,00	879.552,08	2.482.156,71
F14	0,00	3.802.433,95	0,00	785.875,70	2.482.156,71
F15	0,00	3.802.433,95	0,00	702.176,28	2.482.156,71
F16	0,00	3.802.433,95	0,00	627.391,25	2.482.156,71
F17	0,00	3.802.433,95	0,00	560.571,16	2.482.156,71
F18	0,00	3.802.433,95	0,00	500.867,73	2.482.156,71

Tabela 31 - Fluxo de caixa, valor presente e uniforme líquido Cenário 3 PROINFA (conclusão).

F.A	Fluxo 1	Fluxo 2	VPL 1	VPL 2	VUL Total
F19	0,00	3.802.433,95	0,00	447.522,99	2.482.156,71
F20	0,00	3.802.433,95	0,00	399.859,71	2.482.156,71
R20	0,00	0,00	0,00	0,00	#

¹F.A - Fluxo Anual

Fonte: Próprio autor.

Na Tabela 32 foi utilizado de base para o cálculo da venda da energia elétrica o Leilão A-3 realizado em agosto de 2010 pelo MME. Nesta ocasião o valor médio obtido para a venda do MWh gerado por meio de biomassa foi de R\$144,20.

Tabela 32 - Fluxo de caixa, valor presente e uniforme líquido Cenário 2 (A-3/2010).

F.A¹	Fluxo 1	Fluxo 2	VPL 1	VPL 2	VUL Total
F0	-9.911.395,60	0,00	-9.911.395,60	0,00	#
F1	0,00	3.156.470,87	0,00	0,00	1.836.193,64
F2	0,00	3.156.470,87	0,00	2.820.292,06	1.836.193,64
F3	0,00	3.156.470,87	0,00	2.519.917,85	1.836.193,64
F4	0,00	3.156.470,87	0,00	2.251.534,89	1.836.193,64
F5	0,00	3.156.470,87	0,00	2.011.735,97	1.836.193,64
F6	0,00	3.156.470,87	0,00	1.606.037,11	1.836.193,64
F7	0,00	3.156.470,87	0,00	1.434.986,70	1.836.193,64
F8	0,00	3.156.470,87	0,00	1.282.153,95	1.836.193,64
F9	0,00	3.156.470,87	0,00	1.145.598,60	1.836.193,64
F10	0,00	3.156.470,87	0,00	1.023.587,02	1.836.193,64
F11	0,00	3.156.470,87	0,00	914.570,25	1.836.193,64
F12	0,00	3.156.470,87	0,00	817.164,27	1.836.193,64
F13	0,00	3.156.470,87	0,00	730.132,48	1.836.193,64
F14	0,00	3.156.470,87	0,00	652.369,98	1.836.193,64
F15	0,00	3.156.470,87	0,00	582.889,54	1.836.193,64
F16	0,00	3.156.470,87	0,00	520.809,10	1.836.193,64
F17	0,00	3.156.470,87	0,00	465.340,51	1.836.193,64
F18	0,00	3.156.470,87	0,00	415.779,58	1.836.193,64
F19	0,00	3.156.470,87	0,00	371.497,13	1.836.193,64
F20	0,00	3.156.470,87	0,00	331.930,96	1.836.193,64
R20	0,00	0,00	0,00	0,00	#

¹F.A – Fluxo Anual

Fonte: Próprio autor.

Na Tabela 33 foi utilizado de base para o cálculo da venda da energia elétrica o Leilão A-3 realizado em agosto de 2011 pelo MME. Nesta ocasião o valor médio obtido para a venda do MWh gerado por meio de biomassa foi de R\$102,41.

Tabela 33 - Fluxo de caixa, valor presente e uniforme líquido Cenário 2 (A-3/2011).

F.A¹	Fluxo 1	Fluxo 2	VPL 1	VPL 2	VUL Total
F0	-9.911.395,60	0,00	-9.911.395,60	0,00	#
F1	0,00	2.071.471,00	0,00	1.850.849,72	751.193,76
F2	0,00	2.071.471,00	0,00	1.653.725,62	751.193,76
F3	0,00	2.071.471,00	0,00	1.477.596,16	751.193,76
F4	0,00	2.071.471,00	0,00	1.320.225,30	751.193,76
F5	0,00	2.071.471,00	0,00	1.179.615,17	751.193,76
F6	0,00	2.071.471,00	0,00	1.053.980,68	751.193,76
F7	0,00	2.071.471,00	0,00	941.726,84	751.193,76
F8	0,00	2.071.471,00	0,00	841.428,55	751.193,76
F9	0,00	2.071.471,00	0,00	751.812,50	751.193,76
F10	0,00	2.071.471,00	0,00	671.740,98	751.193,76
F11	0,00	2.071.471,00	0,00	600.197,44	751.193,76
F12	0,00	2.071.471,00	0,00	536.273,63	751.193,76
F13	0,00	2.071.471,00	0,00	479.157,99	751.193,76
F14	0,00	2.071.471,00	0,00	428.125,44	751.193,76
F15	0,00	2.071.471,00	0,00	382.528,09	751.193,76
F16	0,00	2.071.471,00	0,00	341.787,07	751.193,76
F17	0,00	2.071.471,00	0,00	305.385,16	751.193,76
F18	0,00	2.071.471,00	0,00	272.860,22	751.193,76
F19	0,00	2.071.471,00	0,00	243.799,34	751.193,76
F20	0,00	2.071.471,00	0,00	217.833,58	751.193,76
R20	0,00	0,00	0,00	0,00	#

¹ F.A – Fluxo Anual

Fonte: Próprio autor.

A Tabela 34 apresenta os valores das variáveis econômicas utilizadas na análise de viabilidade do cenário 3, discriminando-os por meio dos valores de referência para a venda de energia elétrica (PROINFA, Leilão A-3/2010 e o Leilão A-3/2011):

Tabela 34 - Variáveis Econômicas para o Cenário 3 (continua)

Condições	VPL Total (R\$)	VUL Total (R\$/ano)	TIR (%)	PayBack (anos)	C/B (R\$/ano)
1 - PROINFA	18.633.690,25	2.482.156,71	38	2,61	81,39

Tabela 34 - Variáveis Econômicas para o Cenário 3 (conclusão)

Condições	VPL Total (R\$)	VUL Total (R\$/ano)	TIR (%)	PayBack (anos)	C/B (R\$/ano)
2 - Leilão 2010	13.784.409,07	1.836.193,64	32	3,14	81,39
3 - Leilão 2011	5.639.253,91	751.193,76	20	4,78	81,39

Fonte: Próprio autor.

Para todas as condições do cenário 3, a adoção da tecnologia do turbogerador a biogás para a geração de energia elétrica se demonstrou economicamente viável. Os elevados valores de VPL representaram os lucros totais em valores atualizados que seriam revertidos para o empreendedor no escolha desta tecnologia. Somam-se a este fato, os curtos períodos de tempo necessários para que os investimentos realizados fossem readquiridos: 2,61; 3,14 e 4,78 anos, respectivamente.

Outro demonstrativo da viabilidade econômica dessa tecnologia se refere às taxas internas de retornos calculadas. Para todas as condições, a TIR se apresentou superior à taxa mínima de atratividade de 15% estabelecida para este estudo.

Quanto ao indicador Custo/Benefício calculado, o valor de R\$ 81,39 por MWh produzido viabilizou essa tecnologia para as três condições abordadas, já que estas apresentaram valores para a venda de energia superiores ao valor calculado: R\$169,04/MWh (1), R\$144,20/MWh (2) e R\$102,41/MWh (3), ou seja, o empreendedor venderia a energia produzida para a inserção ao Sistema Interligado Nacional /SIN por valores maiores que o seu custo de produção.

4.2.3 Concentração

A Tabela 35 apresenta nas três primeiras colunas os fluxos de caixa referentes ao projeto do concentrador de vinhaça. O fluxo 1 apresenta o valor referente ao investimento inicial para implantação do equipamento, além do valor residual nulo que este apresenta após uma vida útil de 20 anos (depreciação de 10% ao ano). Já o fluxo 2 se refere aos custos e receitas anuais desta tecnologia, sendo representados por valores distribuídos uniformemente ao longo do horizonte

de tempo estabelecido para este estudo. A partir desses valores de custos e receitas, calcularam-se os valores presentes líquidos e o valor uniforme líquido total a fim de analisar a viabilidade econômica dessa tecnologia para a unidade padrão em estudo.

Tabela 35 - Fluxo de caixa, valor presente e uniforme líquido Concentrador

F.A¹	Fluxo 1	Fluxo 2	VPL 1	VPL 2	VUL Total
F0	-7.500.000,00	0,00	-7.500.000,00	0,00	#
F1	0,00	-59.310,00	0,00	-52.993,21	-1.058.370,04
F2	0,00	-59.310,00	0,00	-47.349,19	-1.058.370,04
F3	0,00	-59.310,00	0,00	-42.306,28	-1.058.370,04
F4	0,00	-59.310,00	0,00	-37.800,46	-1.058.370,04
F5	0,00	-59.310,00	0,00	-33.774,54	-1.058.370,04
F6	0,00	-59.310,00	0,00	-30.177,39	-1.058.370,04
F7	0,00	-59.310,00	0,00	-26.963,36	-1.058.370,04
F8	0,00	-59.310,00	0,00	-24.091,64	-1.058.370,04
F9	0,00	-59.310,00	0,00	-21.525,77	-1.058.370,04
F10	0,00	-59.310,00	0,00	-19.233,17	-1.058.370,04
F11	0,00	-59.310,00	0,00	-17.184,75	-1.058.370,04
F12	0,00	-59.310,00	0,00	-15.354,49	-1.058.370,04
F13	0,00	-59.310,00	0,00	-13.719,17	-1.058.370,04
F14	0,00	-59.310,00	0,00	-12.258,01	-1.058.370,04
F15	0,00	-59.310,00	0,00	-10.952,48	-1.058.370,04
F16	0,00	-59.310,00	0,00	-9.785,99	-1.058.370,04
F17	0,00	-59.310,00	0,00	-8.743,74	-1.058.370,04
F18	0,00	-59.310,00	0,00	-7.812,49	-1.058.370,04
F19	0,00	-59.310,00	0,00	-6.980,42	-1.058.370,04
F20	0,00	-59.310,00	0,00	-6.236,97	-1.058.370,04
R20	0,00	0,00	0,00	0,00	#

¹ F.A – Fluxo Anual

Fonte: Próprio autor.

A Tabela 36 apresenta os valores das variáveis econômicas utilizadas na análise de viabilidade para o concentrador de vinhaça.

Tabela 36 - Variáveis Econômicas para o Concentrador

VPL Total (R\$)	VUL Total (R\$/ano)	TIR (%)	PayBack (anos)
-7.945.243,51	-1.058.370,04	#	126,45

Fonte: Próprio autor.

A implantação desta tecnologia se apresenta financeiramente desfavorável para qualquer um das variáveis econômicas da Tabela 36. Associa-se a esse contexto, o elevado valor presente líquido negativo alcançado por esta tecnologia, representando o prejuízo em valores atuais para o empreendedor que optasse pela realização deste investimento. Soma-se a isso, o valor uniforme líquido total (VUL) que representa os custos anuais atribuídos ao empreendedor caso a opção fosse pela implantação desta tecnologia nas condições desfavoráveis apresentadas.

Portanto, o investimento realizado para a implantação do concentrador de vinhaça apenas com a finalidade de reduzir os custos com o transporte e a economia de água se apresenta economicamente inviável para os empreendedores do Setor Sucroenergético.

4.3 Viabilidade Ambiental

4.3.1 Aplicação in-natura no solo

As questões ambientais envolvendo o uso da vinhaça in natura no solo agrícola foram abordadas durante o decorrer deste trabalho. Os impactos positivos e negativos advindos dessa prática agrícola são das mais diversificadas natureza e dependem de inúmeros fatores, em especial, a forma como esse subproduto é gerenciado desde sua produção até a sua disposição final. Sendo assim, o uso racional da vinhaça aparece como uma das principais ferramentas na mitigação dos impactos negativos e potencialização dos positivos.

O Estado de São Paulo, através da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) e da Normativa P.4.231 (CETESB, 2005), se encontra na vanguarda quanto ao gerenciamento adequado desse subproduto, vista as grandes extensões de terra agricultáveis ocupadas pela cultura da cana de açúcar no Estado e os problemas que a falta de uma regulamentação efetiva ocasionava à qualidade ambiental do Estado desde meados do século XX.

Quanto aos possíveis impactos que a utilização inadequada da vinhaça pode ocasionar, alguns deles já são do consentimento da comunidade científica e dos

empreendedores do Setor Sucroenergético. Outros, entretanto, como a poluição das águas subterrâneas, ainda estão em discussão em diversas câmaras técnicas, principalmente no âmbito dos órgãos ambientais reguladores. A Tabela 37 apresenta os mais diversos impactos potenciais para o uso da vinhaça in natura no campo agrícola.

Tabela 37 - Potenciais impactos ambientais no solo ocasionados pela aplicação da vinhaça in natura no solo agrícola

C. Ambiental¹	Impacto Ambiental	Especificidades e condicionantes (Descrição)
Solo	Alteração da população microbiana ^{3, 4}	Desenvolvimento da população de microrganismos (fungos e bactérias), favorecida pelo aporte de matéria orgânico e nutriente.
	Alteração (elevação) do pH ^{3, 4}	Redução inicial do pH devido à característica ácida da vinhaça (pH médio em torno de 4) e posterior elevação resultante da ação dos microrganismos.
	Alteração da CTC do solo ^{3,4}	Aumento da Capacidade de Troca Catiônica (CTC) principalmente pelo aporte de Matéria Orgânica no solo e, consequente, aumento das cargas negativas;
	Alteração da concentração de íons "nutrientes" disponíveis na solução do solo	Aumento da concentração dos íons de fundamental importância para a nutrição das plantas, como por exemplo, potássio (K ⁺), cálcio (Ca ⁺²) e magnésio (Mg ⁺) que se apresentam em elevadas concentrações na vinhaça.
	Salinização ³	Elevação na concentração de sais no solo pelo uso da vinhaça ao longo dos anos.
	Alteração da estrutura física do solo ³	Melhorias estruturais ocasionadas pela ação de microrganismos que se desenvolvem no ambiente.
	Redução de escavações em jazidas de fertilizantes	Redução das pressões antrópicas sobre os depósitos minerais, através da reutilização dos subprodutos do processo produtivo.

¹C.Ambiental – Compartimento Ambiental, ²Subter., ³Silva, M. (2006); ⁴Brito, F. et al. (2009), ⁵Boddey, R. (2009, Embrapa Agrobiologia).

Tabela 37 - Potenciais impactos ambientais na água ocasionados pela aplicação da vinhaça in natura no solo agrícola (contin.)

C. Ambiental¹	Impacto Ambiental	Especificidades e condicionantes (Descrição)
Água	Alteração da carga orgânica	Aumento da carga orgânica nos corpos d'água ocasionada pelo transbordo e arraste da vinhaça dos tanques de armazenamento e canais de transporte, principalmente nos meses mais chuvosos.
	Superf. Alteração da concentração de nutrientes	Aumento da concentração de nutrientes (N, K, Ca e Mg) nos corpos d'água devido ao transbordo e arraste da vinhaça dos tanques de armazenamento e canais de transporte, principalmente nos meses mais chuvosos, potencializando alterações da qualidade da água, por exemplo, no seu padrão de potabilidade.
	Alteração da concentração de sais	Aumento da concentração de sais dissolvidos (principalmente cloretos) nos corpos d'água devido ao transbordo e arraste da vinhaça dos tanques de armazenamento e canais de transporte, principalmente nos meses mais chuvosos, potencializando alterações da qualidade da água, por exemplo, no seu padrão de potabilidade.
	Alteração da carga orgânica	Aumento da carga orgânica nas águas subterrâneas, carregada por percolação, alterando o padrão de potabilidade da água.
	Alteração da concentração de nutrientes ⁴	Aumento da concentração de nutrientes (principalmente N e K) nas águas subterrâneas, carregados por percolação, alterando o padrão de potabilidade da água
	Subter. ² Alteração da concentração de sais ⁴	Aumento da concentração de sais dissolvidos (principalmente cloretos) nas águas subterrânea, carregados por percolação, alterando o padrão de potabilidade da água.
	Alteração da concentração de nitrato (NO ₃ ⁻)	Aumento da concentração de nitrato nas águas subterrâneas, composto potencialmente causador de doenças, como a metemoglobinemia e outras doenças carcinogênicas.
	Alteração da qualidade da água	Aporte de substâncias solúveis (i.e, sais minerais, compostos orgânicos, etc) carregadas pela percolação da água da vinhaça, potencializando alterações da qualidade da água (i.e, alteração do padrão de potabilidade).

¹C.Ambiental – Compartimento Ambiental, ²Subter., ³Silva, M. (2006); ⁴Brito, F. et al. (2009), ⁵Boddey, R. (2009, Embrapa Agrobiologia).

Tabela 37- Potenciais impactos ambientais no ar ocasionados pela aplicação da vinhaça in natura no solo agrícola (final).

C. Ambiental¹	Impacto Ambiental	Especificidades e condicionantes (Descrição)
Ar e Outros	Elevação das concentrações de CH ₄ e N ₂ O (GEE) ⁵	Emissões de CH ₄ advindas do processo de anaerobiose de canais de distribuição e reservatórios; emissões de N ₂ O advindas da aplicação ao solo.
	Elevação das características odoríferas	Dispersão de fortes odores advindos da fertirrigação com vinhaça, afetando as comunidades vizinhas.
	Aumento da incidência de vetores	Atração de vetores (moscas) pela decomposição anaeróbia da vinhaça nos reservatórios e canais.
	Deterioração de pavimentos em rodovias estaduais e estradas vicinais	Sobrecarga causada pelo tráfego intenso de caminhões que realizam o transporte da vinhaça e do maquinário para sua aplicação em longas distâncias.

¹C.Ambiental – Compartimento Ambiental, ²Subter., ³Silva, M. (2006); ⁴Brito, F. et al. (2009), ⁵Boddey, R. (2009, Embrapa Agrobiologia).

4.3.2 Biodigestão

Dentre os potenciais impactos ambientais analisados para o caso da aplicação in natura no solo, alguns deles tendem a ser mitigados e outros ampliados com a implantação do processo de biodigestão da vinhaça pela unidade fabril. Essa mitigação e/ou ampliação é alcançada, principalmente, pela redução dos compostos orgânicos biodegradáveis existentes e pela menor exposição deste subproduto ao ambiente atmosférico após a sua produção. Os itens a seguir retratam os ganhos potenciais advindos da biodigestão, sendo que suas descrições já foram apresentadas na Tabela 37:

- Redução do risco de arraste de vinhaça para os corpos d'água superficiais devido ao maior controle sobre este subproduto;
- Mitigação das emissões dos gases de efeito estufa, CH_4 e N_2O , tanto pela menor exposição da vinhaça ao ambiente atmosférico desde sua produção até a sua aplicação quanto pela menor carga orgânica presente neste subproduto pós biodigestão;
- Redução e, em alguns casos, eliminação dos fortes odores advindos da fertirrigação com vinhaça;
- Redução da incidência de vetores;

Dentre essas vantagens, a mitigação das emissões dos gases de efeito estufa (GEE) aparece como um dos grandes benefícios ambientais desta tecnologia, já que influência em um dos assuntos mais debatidos dentro do meio científico mundial: o aquecimento global.

Ressalta-se que parte dessa mitigação é alcançada através da complementação do processo de biodigestão com tecnologias que se utilizam do gás metano (CH_4) como combustível, transformando esse gás em outros de menor potencial para o aquecimento global. Os queimadores e as tecnologias de geração de energia elétrica (moto geradores e turbo geradores), propostos neste trabalho, se enquadram entre essas tecnologias.

A Tabela 38 apresenta a quantificação equivalente dos GEE que deixaram de ser emitidos para cada uma das tecnologias utilizadas como complementação do processo de biodigestão da vinhaça neste estudo:

Tabela 38 - Redução equivalente das emissões de GEE por tecnologia adotada

Tecnologias	Unidade	Valor
Queimadores	TCO _{2eq} /ano	90.056,86
Motogeradores (ciclo otto)	TCO _{2eq} /ano	9.711,90
Turbinas	TCO _{2eq} /ano	12.981,57

Fonte: Próprio autor.

Nota-se que a utilização dos queimadores aparece como a melhor opção quanto à mitigação dos GEE. Contudo, esta tecnologia passa a ser preterida pelos empreendedores do Setor Sucroenergético, vista a possível complementação do fornecimento de energia elétrica pelos motogeradores e pelas turbinas. Visto isso, a associação dos queimadores às tecnologias de geração de energia é recomendada como a melhor opção, sobretudo naqueles projetos que se utilizam da venda dos créditos de carbono de sua planta industrial.

Ressalta-se que os modelos de quantificação utilizados neste estudo se diferem entre si, sendo que para a tecnologia do motogerador e da turbina foi adotada uma metodologia mais conservadora aprovada pelo conselho executivo de MDL da ONU (UNFCCC) no qual se utiliza um conceito de margem combinada para determinar a intensidade de carbono teórica produto da expansão do setor elétrico nacional. Já para a tecnologia do queimador, quase todo o metano produzido pelo biodigestor foi considerado na conversão para CO₂ (com desconto de 10% de perda pela eficiência da combustão dos queimadores), resultando em valores de mitigação e de créditos de carbono alcançados maiores que os das outras duas tecnologias.

4.3.3 Concentração

Assim como na biodigestão, alguns dos potenciais impactos ambientais analisados para o caso da aplicação in natura no solo tendem a ser mitigados ou ampliados com a implantação do processo de concentração da vinhaça pela unidade

fabril. Essa mitigação e/ou ampliação é alcançada através da racionalização do uso desse subproduto, resultado direto da redução em seu volume. Os itens a seguir retratam os ganhos potenciais advindos da concentração, sendo que suas descrições já foram apresentadas na Tabela 37:

- Redução das pressões antrópicas sobre os depósitos minerais;
- Redução do risco de arraste de vinhaça para os corpos d'água superficiais;
- Redução do risco de percolação da vinhaça para as águas subterrâneas;
- Mitigação das emissões dos gases de efeito estufa, CH_4 e N_2O , tanto pelo menor consumo de combustíveis fósseis e energia elétrica para o transporte e aplicação da vinhaça no campo (caminhões, hidrorolls, bombas de recalque, etc), quanto pela menor exposição da vinhaça ao ambiente atmosférico desde sua produção até a sua aplicação;
- Redução e, em alguns casos, eliminação dos fortes odores advindos da fertirrigação com vinhaça;
- Redução da incidência de vetores;
- Redução da sobrecarga exercida sobre os pavimentos de rodovias estaduais e estradas vicinais, tanto pelo menor fluxo de caminhões quanto pela implantação de sistemas canalizados para o transporte de vinhaça, sendo este último viabilizado pela redução do volume a ser transportado e consequente redução das dimensões das tubulações e custos associados.

Além dessas vantagens, outra, em especial, passou a ser o grande atrativo para os empreendedores que vislumbram a implantação da tecnologia da concentração da vinhaça: a redução do consumo d'água através da reutilização do condensado.

A Tabela 39 apresenta os valores de captação e consumo de água médios para as Usinas do Estado de São Paulo e a inter-relação com a usina padrão assumida para este estudo.

Tabela 39 - Valores de captação e consumo da unidade produtiva padrão

Moagem (mil ton/safra)	Safra (dias)	Captação/Consumo Água (m³/t)^{1,2,3}	Captação/Consumo Água (m³/safra)	Produção de vinhaça (m³/safra)
1.500,00	275	1,85	2.775.000,00	844.124,40

Fonte: Próprio autor;

¹Valores médios para o estado de SP;

²Captação = consumo;

³ELIA NETO, 2008.

Já a Tabela 40 apresenta a economia que a usina padrão apresentou com uma vazão afluyente para o processo de concentração de 100 m³/h (79% do volume de vinhaça produzido) e utilização de 100% do condensado.

Tabela 40 - Economia de água com a reutilização do condensado

Taxa de concentração (%)	Volume de condensado (m³/safra)	Percentual do consumo (%)	Volume de condensado (m³/t)	Nova Captação (m³/t)
70	462.000,00	17	0,31	1,54

Fonte: Próprio autor.

Portanto, considerando a captação de água da usina padrão como sendo a mesma da média do Estado de São Paulo (1,85 m³/tonelada de cana) e a completa reutilização do condensado obtido da evaporação da vinhaça no concentrador, a economia obtida foi de 17%. Além disso, pôde se calcular um novo valor de captação para a usina de 1,54 m³ por tonelada de cana processada.

Visto o aumento crescente da preocupação mundial com a possível escassez de água e a ampliação da regulação (cobrança) pelo consumo de água no Brasil, a economia obtida com a implantação do processo de concentração surge como um dos principais benefícios dessa tecnologia, cabendo aos empreendedores do Setor Sucroenergético a função de incluir mais esta variável na análise de viabilidade deste investimento.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Antes de discorrer sobre os resultados encontrados neste trabalho e as conclusões definidas a partir destes, se torna importante comentar sobre dois pontos de extrema importância para o estudo realizado.

O primeiro diz respeito às mudanças estruturais pelas quais vem passando o Setor Sucroenergético desde o final do último milênio até os dias de hoje. Iniciando por um cenário de crescimento e grandes investimentos entre os anos de 2000 e 2008, impulsionados principalmente pelos altos preços do etanol, passando pelo desaquecimento e falência de inúmeras empresas durante a crise mundial em 2008 e, por fim, entrando em uma fase caracterizada pela fusão de empresas tradicionais, resultando na criação de novos gigantes dentro do Setor.

De 2000 a 2008, a produção de cana-de-açúcar cresceu 10,3% ao ano, puxada pelo forte crescimento das vendas de veículos flex. Com 20 novas usinas inauguradas por ano a partir de 2005, aquele momento foi caracterizado pela abundância de capital barato, novos entrantes com pouca experiência no setor e empresas tradicionais com dificuldade de acesso a instrumentos modernos de financiamento. Contudo, a crise mundial de 2008 chegou e atingiu principalmente as empresas que mais investiram. Um terço do setor entrou em dificuldades e passou por forte reestruturação financeira e/ou societária. Novos atores emergiram da crise: companhias sólidas do setor cresceram e grupos tradicionais das áreas de agroindústria, petróleo e química entraram com força. Os investimentos, no entanto, se concentraram na compra de empresas em dificuldades, com o crescimento da produção caindo para apenas 3% ao ano. (JANK, 2011).

Ainda de acordo com Jank (2011), presidente da União das Indústrias de Cana-de-Açúcar, após a crise, mais de 70% do setor é composto atualmente por grupos com bons ativos, estrutura de capital e governança, desempenho operacional e acesso a capital de boa qualidade, sem falar da cada vez maior abertura dos mercados internacionais para os seus produtos.

Outro fator importante diz respeito à busca mundial por fontes energéticas mais limpas e renováveis, visando, sobretudo, a mitigação dos impactos ocasionados pelo aquecimento global. Neste novo modelo de produção energética, o Brasil encontra-se em local de destaque, seja pela alta participação das fontes renováveis na matriz energética brasileira (aproximadamente 45% em 2010, segundo o Ministério de Minas e Energia) ou pelo grande potencial que o país ainda

apresenta para ampliar essa participação, principalmente por meio da biomassa e da hidroeletricidade.

Visto isso, o cenário em que se encontra o Brasil e, mais especificamente, o Setor Sucroenergético Brasileiro fornece todos os subsídios para que as tecnologias aqui analisadas e que apresentaram viabilidade técnica, econômica e ambiental possam integrar rotineiramente o planejamento estratégico e o parque industrial desses empreendimentos.

Quanto à tecnologia da fertirrigação in natura, prática que já vem sendo utilizada há muitos anos no Setor, apesar da constatação da sua viabilidade técnica e econômica, esta é uma atividade que traz consigo inúmeros impactos ambientais negativos. Portanto, as comunidades ao redor das áreas canavieiras convivem rotineiramente com fortes odores no ar atmosférico, riscos de poluição de cursos de água e das águas subterrâneas¹⁷, entre outros; repercutindo negativamente na qualidade de vida desses cidadãos.

Portanto, a prática da fertirrigação in natura associada a uma das outras tecnologias estudadas (biodigestão e concentração) surge como principal alternativa, uma vez que atuam potencializando os benefícios advindos da fertirrigação e mitigam os impactos negativos ocasionados por essa prática. Não se pode esquecer que essa atividade, apesar de todos os potenciais impactos negativos, enquadra-se como uma prática de reutilização de resíduos agrícolas, atuando na redução da pressão sobre as reservas de fertilizantes minerais e agregando competitividade a um Setor de extrema relevância para a economia brasileira.

Em relação à tecnologia da biodigestão, proposta em associação a três diferentes projetos de geração de energia elétrica a partir do biogás: queimadores, motogeradores e turbogeradores; apenas a tecnologia dos motogeradores apresentou um caso pontual de inviabilidade econômica, sendo os turbogeradores aqueles que apresentaram os maiores benefícios para os empreendedores. Contudo, a dificuldade de encontrar fabricantes brasileiros para máquinas geradoras de grande porte, como é o caso exigido neste estudo, associada à necessidade da

¹⁷A poluição das águas subterrâneas ainda é um impacto que vem passando por discussões e pesquisas em todos os setores da sociedade. Atualmente, um Grupo de Trabalho foi estruturado no Estado de São Paulo, com representantes do Setor Sucroenergético (CTC) e do Órgão Ambiental Estadual (CESTEB) a fim de fornecer subsídios definitivos para a prática mais sustentável desta atividade, sem que afete a qualidade das águas subterrâneas. Este estudo já foi concluído e se encontra em estágio de aprovação pelo órgão ambiental estadual.

procura no mercado externo, ainda onera os custos destes investimentos, retraindo possíveis investimentos nesta área.

Já no perfil técnico, estes projetos se apresentaram altamente viáveis, já que todas as tecnologias estudadas se encontram disponíveis no mercado e em utilização por Usinas e Destilarias, mesmo que de forma reduzida. Uma das razões que podem justificar essa pequena aceitação dos biodigestores, associados a tecnologias geradoras de energia elétrica, fundamenta-se na preferência por uma tecnologia de geração já difundida pelo Setor, com alto valor energético agregado e, sobretudo, cuja matéria-prima também se encontra disponível em elevados volumes dentro da unidade fabril: a cogeração por bagaço de cana.

Outro fator que torna essa tecnologia preterida são os valores pagos atualmente para novas fontes de energia a serem inserida no SIN (Sistema Integrado Nacional), através dos leilões de energia de fontes renováveis (A-3). Com uma margem de lucro reduzida em relação às outras fontes de energia (eólica, biomassa de bagaço e palha de cana, etc), os projetos que se utilizam do biogás dos biodigestores para geração de energia continuaram ausentes dos últimos leilões de energia, apesar da viabilidade econômica da maior parte desses projetos terem sido atestados por este estudo. Apesar da situação desfavorável dos últimos leilões, exemplos anteriores, como o Projeto PROINFA que entre os anos de 2000 a 2007 apresentou condições mais vantajosas para a geração alternativa renovável (R\$169,08 por MWh produzido em 2006), demonstram a opção do mercado e das Agências Reguladoras do Governo pelas formas mais convencionais de geração alternativa, como por exemplo, o gás natural.

Contudo, o aumento contínuo da demanda energética brasileira que, segundo o MME (2010), apresentou uma ampliação de aproximadamente 9% entre 2009 e 2010; o novo cenário de geração distribuída¹⁸ que passa a fazer parte do planejamento energético brasileiro; e a pressão mundial por uma matriz energética mais renovável, configura um ambiente futuro promissor, tanto para as fontes mais convencionais, como o bagaço da cana, que apesar de todo o incentivo ainda apresentam potencial de crescimento, quanto para fontes não tão badaladas como é o caso do biogás da vinhaça.

¹⁸ Geração distribuída – geração de energia no próprio local de utilização, reduzindo o custo de produção devido à ausência de complexos sistemas de geração remota, transmissão e distribuição.

No âmbito ambiental, todos os projetos de biodigestão confirmaram os seus vieses positivos, sobretudo pela sua contribuição à mitigação do aquecimento global pela redução das emissões dos gases de efeito estufa.

A tecnologia da concentração da vinhaça se apresentou como o caso mais complexo a ser analisado neste trabalho. Apesar da sua incontestável viabilidade técnica e ambiental, justificadas pela diversificada oferta desta tecnologia no mercado especializado, pela sua crescente utilização por parte das Usinas e Destilarias e pelo padrão de sustentabilidade conferido às unidades industriais que optam pela sua utilização; no âmbito econômico, os pontos não se apresentam tão favoráveis. Dentre as tecnologias que se demonstraram inviáveis economicamente, a concentração foi a que apresentou as condições mais desfavoráveis para a sua implementação. Contudo, a incorporação progressiva desta tecnologia nas Unidades Agroindustriais Brasileiras caminha na contramão dos resultados encontrados neste estudo.

Essa divergência pode ter sido alcançada devido ao modelo utilizado para a valoração dos benefícios econômicos obtidos por esta tecnologia (economia com transportes e com o consumo de água). Portanto, recomenda-se que seja realizado um estudo de caso específico, sendo importante pormenorizar os benefícios obtidos com a redução do transporte, já que esse item representa o custo mais oneroso dessa prática e os volumes a serem aplicados são reduzidos significativamente; além dos benefícios obtidos com a recirculação da água retirada da vinhaça. Espera-se com isso que cenários mais positivos sejam alcançados, confirmando a ampliação do uso desta tecnologia por parte das empresas do Setor Sucroenergético Brasileiro nos últimos anos.

De maneira geral, os objetivos deste estudo foram alcançados satisfatoriamente, uma vez que se demonstrou o potencial de cada uma das atuais formas de aproveitamento da vinhaça utilizadas pelo Setor Sucroenergético de São Paulo e do Brasil. Em vista da generalidade assumida para alguns parâmetros deste estudo, não se espera, como de início, que ele sirva de parâmetro final para a tomada de decisão em investimentos futuros do Setor. Contudo, pretende-se que a pesquisa seja utilizada com uma base sólida para estudos de caso mais complexos exigidos pelo tema, vista a importância dessas decisões no futuro e longevidade dos empreendimentos do Setor Sucroenergético.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS¹⁹

AÇÚCAR Ético. Trabalho apresentado ao 2. Seminário Científico Brasileiro sobre as Problemáticas Sociais e Ambientais do Setor Canavieiro - Problemáticas e Desafios da Indústria Sucroalcooleira Brasileira no Século XXI, São Paulo-SP, 2006.

ANDRADE, J. **Construção de um Índice de Sustentabilidade Ambiental para a Agroindústria Paulista de Cana-de-Açúcar [ISAAC]**. 2009, 259 p. Dissertação (Mestrado Profissional). Escola de Economia de São Paulo, Faculdade Getúlio Vargas, São Paulo, 2009.

BALANÇO ENERGÉTICO DO ESTADO DE SÃO PAULO 2010: ANO BASE 2009. São Paulo: Secretaria de Saneamento e Energia, 2010. 229 p.

BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL 2010: ANO BASE 2009. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisas Energéticas, 2010. 276 p.

BANCO CENTRAL BRASILEIRO. **Histórico das taxas de juros fixadas pelo Copom e evolução da taxa Selic**. Disponível em: <<http://www.bcb.gov.br/?COPOMJUROS>>. Acesso em: 22 de ago. de 2011.

BIASE, L. **Aspectos Gerais da Concentração das Vinhaças**. 2007. Trabalho apresentado ao 2. Workshop de Gestão de Energia e Resíduos na Agroindústria Canavieira, Pirassununga-SP, 2007.

BODDEY, R. et al. **Circular técnica: mitigação das emissões de gases efeito estufa pelo uso de etanol da cana-de-açúcar produzido no Brasil**. Seropédica-RJ: Embrapa-RJ, 2009. 14 p.

BRAGA, B. et al. **Introdução à Engenharia Ambiental: O desafio do desenvolvimento sustentável**. 2ª Ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005. 318p.

BRITO, F. et al. Efeito da aplicação de vinhaça nas características químicas de solos da zona da mata de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v.4, n.4, p.456-462, out/dez. 2009.

¹⁹ De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6023.

COMITÊS DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DOS RIOS PIRACICABA, CAPIVARI E JUNDIAÍ (PCJ). **Simulador Dos Valores Da Cobrança Estadual Paulista**. Disponível em: < <http://www.comitepcj.sp.gov.br/comitespcj.htm#>>. Acesso em 28 de ago. de 2011.

COMPANIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da Safra Brasileira: Cana-de-açúcar**. 3º levantamento, janeiro/2011. Brasília: 2011.

CH2MHILL. **Process Selection Report for Wastewater Treatment Plants: Project Nº 2.2 Enhanced Energy Recovery Through Optimization of Anaerobic Digestion and Microturbines**. California, 2003.

CHERNICHARO, L. **Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias: Reatores Anaeróbios**. Minas Gerais: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental-UFMG, 1997. 245 p. v. 5.

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBA. Apostila de Engenharia Econômica Avançada: Avaliação de Projetos e Negócios. Itajubá: UNIFEI, capítulo 4, p. 1-2.

EMPRESA DE PESQUESA ENERGÉTICA. **Informe à Imprensa: Leilão de Fontes Alternativas 2010**. São Paulo: 2010. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/leiloes/Paginas/Leil%C3%A3o%20de%20Fontes%20Alternativas%202010/Leil%C3%B5esdeFontesAlternativascontratam89usinas,com2892,2MW.aspx?CategorialD=6695>>. Acessado em: 20 de agosto de 2011.

EMPRESA DE PESQUESA ENERGÉTICA. **Informe à Imprensa: Leilão de Energia A-3/2011**. São Paulo: 2010. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/leiloes/Paginas/Leil%C3%A3o%20de%20Energia%20A-3%202011/Leil%C3%A3odeenergiapara2014contrata51usinas,somando2744MW.aspx>>. Acessado em: 20 de agosto de 2011.

FIGUEIREDO, N. **Utilização Do Biogás De Aterro Sanitário Para Geração De Energia Elétrica E Iluminação A Gás – Estudo De Caso**. 2007. 90 p. Trabalho de graduação (Curso de Engenharia Mecânica). Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie, 2007.

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

FREIRE, J. **Vinhaça de cana-de-açúcar**. Agropecuária, 2000. (Série Engenharia Agrícola).

GLÓRIA, N. A.; MAGRO, J. A. **Utilização agrícola de resíduos da usina de açúcar e destilaria na Usina da Pedra**, 1985. Trabalho apresentado ao 4. Seminário Coopersucar da Agroindústria Açucareira, Águas de Lindóia-SP, 1977.

GRANATO, E. **Geração de energia através da biodigestão da vinhaça**. Bauru-SP: UNESP, 2003, 139 p. Dissertação, Faculdade de Engenharia da UNESP - Campus de Bauru, Bauru-SP, 2003.

ICLEI - Brasil - Governos Locais pela Sustentabilidade, Secretariado para América Latina e Caribe. **Manual para aproveitamento do biogás: aterros sanitários**. São Paulo: ICLEI, 2009. 80 p.

JANK, M. Etanol - Novo ciclo de crescimento. **Correio Braziliense**, Brasília, 27. Abril. 2011. Disponível em: <
<file:///C:/Users/Luiz%20Felipe%20Lomanto/Documents/Dropbox/Projeto%20Mestrado%20EESC%201/Fontes%20de%20consultas%20que%20faltam%20serem%20inseridas/UNICA%20-%20Uni%C3%A3o%20da%20Ind%C3%BAstria%20de%20Cana-de-a%C3%A7%C3%BAcar.htm>>. Acesso em: 29 ago. 2011.

LAMONICA, H. **Potencial De Geração De Excedentes De Energia Elétrica Com O Biogás Produzido a Partir da Biodigestão da Vinhaça na Indústria Sucro-Alcooleira Brasileira**. Trabalho apresentado ao 6. Congresso Internacional sobre Geração Distribuída e Energia no Meio Rural, Campina-SP, 2006.

LEITE, R. **Pró-Álcool: A Única Alternativa para o Futuro**. Campinas: 1985. Disponível em: <<http://www.inovacao.unicamp.br/etanol/>> Acesso em: 5 fev. 2010.

LYRA, M; ROLIM, M; SILVA, J. Topossequência de solos fertirrigados com vinhaça: contribuição para a qualidade das águas do lençol freático. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande-PB, v.7, n.3, p.525-532, 2003.

MACEDO, I.; SOUZA, E. **Etanol e bioeletricidade: a cana-de-açúcar no futuro da matriz energética**. São Paulo: Luc Projetos de Comunicação. 2010. 315 p.

MACEDO, M. et al. **Análise de viabilidade econômico-financeira de projetos agropecuários: o caso da implantação de um projeto de produção de produtos apícolas**. Trabalho apresentado ao 45. Congresso Brasileiro de Economia, Administração e Sociologia Rural, Londrina-PR, 2007.

MADEJÓN, E, et al. Agricultural use of three (sugar-beet) vinasse composts: effect on crops and chemical properties of a Cambisol soil in the Guadalquivir river valley (SW Spain). **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 84, n.1, p.55-65, 2001.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Resenha Energética Brasileira: Exercício de 2010 (Preliminar)**. Brasília: 2010. Disponível em: http://portalpch.com.br/index.php?option=com_content&view=article&id=5380:2505:2011-resenha-energetica-de-2011&catid=1:ultimas-noticias&Itemid=98>. Acesso em: 23 ago. 2011.

NETO, E. et al. **Estudo da distância econômica de aplicação da vinhaça natural e concentrada por evaporação**. São Paulo: Centro de Tecnologia Canavieira, 2008.

NETO, E. et al. **Manual de Conservação e Reuso de Água na Agroindústria Sucroenergética**. Brasília: ANA, 2009.

NETO, E. **Produção Industrial: Resíduos Sólidos**. 2009. Trabalho apresentado ao 3. Seminário de Produção Sucroalcooleira da Secretaria de Meio Ambiente de SP. São Paulo, 2009.

NETO, E.; NAKAHODO, T.; ROSELL, C. Relatório Técnico Copersucar 88/89-352: **Biodigestão da Vinhaça com Reator Anaeróbio de Manta de Lodo**. São Paulo, 1988.

NOGUEIRA, L. et al. **Bioetanol da cana-de-açúcar**: energia para o desenvolvimento sustentável. Rio de Janeiro: BND, 2008. 316 p.

NISHIHARA, L.; ALABURDA, J. Presença de Compostos Nitrogenados em Águas de Poços. **Revista de Saúde Pública**, v. 32, n. 2, p. 160-165, ago. 1998.

OLIVEIRA, E. et al. Uso de vinhaça de alambique e nitrogênio em cana-de-açúcar irrigada e não irrigada. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.44, n.11, p.1398-1403, nov. 2009.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **O que é o SIN - Sistema Interligado Nacional**. Disponível em: http://www.ons.org.br/conheca_sistema/o_que_e_sin.aspx>. Acesso em: 25 ago. 2011.

PAIVA, L. **Utilização de Vinhaça Concentrada** Trabalho apresentado ao 4. Simpósio de Tecnologia de Produção de Cana de Açúcar, Piracicaba-SP, 2009.

PASSOS, P. A Conferência de Estocolmo como Ponto de Partida para a Proteção Internacional do Meio Ambiente. **Direitos Fundamentais e Democracia**, Curitiba, v.6, p.1-26, 2009.

PEREIRA, A. O tripé da sustentabilidade: Pequenas empresas mostram que ser responsável com o meio ambiente, com a sociedade e com o próprio negócio é simples, barato e urgente. **Revista Locus – Ambiente da Inovação Brasileira**, Brasília, n. 50, p. 38-41, set. 2007.

PEREIRA, J. ; GUIMARÃES, R. Consciência Verde: uma avaliação das práticas ambientais. **Revista Eletrônica de Gestão**, Picos, v. 2, n. 1, p. 61-73, jan./abr. 2009. Disponível em: <www.ufpi.br/reges>.

PINTO, C. **Tecnologia da digestão anaeróbia da vinhaça e desenvolvimento sustentável**. 1999. 147 p. Dissertação (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos). Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.

Proálcool: Programa Brasileiro de Álcool. Disponível em:<[file:///C:/Documents%20and%20Settings/Luiz%20Felipe/Desktop/Qualificação/referências/PróAlcool%20-%20Programa % 20Brasileiro%20de%20Álcool.htm](file:///C:/Documents%20and%20Settings/Luiz%20Felipe/Desktop/Qualificação/referências/PróAlcool%20-%20Programa%20Brasileiro%20de%20Álcool.htm)> Acesso em: 25 jan. 2010.

RIBAS, M. **Tratamento de Vinhaça em Reator Anaeróbico Operado em Batelada Sequencial Contendo Biomassa Imobilizada Sob Condições Termofílicas e Mesofílicas**. 2006. 198 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade Estadual de São Paulo, São Carlos, 2006.

ROSSETTO, R. et al. Potássio. In: DINARDO, L. et al. **Cana-de-Açúcar**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2008. P. 289-312.

SÃO PAULO. Companhia de Tecnologia Ambiental de São Paulo. **Vinhaça-critérios e procedimentos para aplicação no solo agrícola**. São Paulo: CETESB, 2006.

SHULTZ, N. **Efeito Residual da Adubação em Cana Planta e Adubação Nitrogenada em Cana de Primeira Soca com Aplicação de Vinhaça**. 2009. 69 p.

Dissertação (Curso de Pós-graduação em Agronomia Ciência do Solo). Instituto de Agronomia. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2009.

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

SOARES, P. **O Setor Sucroalcooleiro e o domínio tecnológico**. São Paulo. 29 p. Disponível em: <<http://www.naippe.fm.usp.br/trabalhos/vol2.PDF>>. Acesso em: 29 jan. 2010.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA. Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias. Departamento de Tecnologia. WORKSHOP TECNOLÓGICO, 2007, Jaboticabal-SP. **Termo de Referência para Vinhaça**. Jaboticabal: UNESP JABOTICABAL, 2007. 14 p.

VIANA, A. **Tratamento anaeróbio de vinhaça em reator UASB operado em temperaturas na faixa termofílica (55°) e submetido ao aumento progressivo de carga orgânica**. 2006. 88 p. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

WORKSHOP TECNOLÓGICO SOBRE VINHAÇA, 2007, Jaboticabal-SP. **Termo de Referência para Vinhaça**. Jaboticabal: UNESP Jaboticabal, 2007. 14 p.

WORKSHOP TECNOLÓGICO SOBRE VINHAÇA, 2007, Jaboticabal-SP. **Tratamento de Vinhaça: Concentração e outros**. UNESP Jaboticabal: UNESP JABOTICABAL, 2007. 5 p.