

CAROLINA MANOCHIO

**Integração energética da produção de biogás em
biorrefinarias de cana-de-açúcar integradas de 1ª e 2ª
geração**

Poços de Caldas-MG

2015

CAROLINA MANOCHIO

**Integração energética da produção de biogás em
biorrefinarias de cana-de-açúcar integradas de 1ª e 2ª
geração**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Alfenas – Campus Poços de Caldas.
Orientadora: Renata Piacentini Rodriguez
Co-orientadora: Bruna de Souza Moraes

Poços de Caldas-MG

2015

M285i Manochio, Carolina.

Integração energética da produção de biogás em biorrefinarias de cana-de-açúcar integradas de 1ª e 2ª geração / Carolina Manochio. – Poços de Caldas, 2015.

73 f. -

Orientadora: Renata Piacentini Rodriguez.

Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, MG, 2015.

Bibliografia.

1. Etanol. 2. Cana-de-açúcar. 3. Digestão anaeróbia. 4. Energia elétrica e calor - Cogeração. I. Rodriguez, Renata Piacentini. II. Título.

CDD: 662.6692

CAROLINAMANOCHIO

**Integração energética da produção de biogás em
biorrefinarias de cana-de-açúcar integradas de 1ª e 2ª geração**

A banca examinadora abaixo-assinada,
aprova a Dissertação apresentada como
parte dos requisitos para obtenção do
título de mestre em Ciência e
Engenharia Ambiental, pelo Programa
de Pós-Graduação em Ciência e
Engenharia Ambiental da Universidade
Federal de Alfenas.

Área de Concentração: Ciência e
Engenharia Ambiental.

Aprovada em: 24 de julho de 2015.



Dr(a).Bruna de Souza Moraes

Instituição: Lab. Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol - CTBE



Prof(a.) Dr. Marcelo Zaiat

Instituição: Universidade de São Paulo - USP



Dr.Charles Dayan Farias de Jesus

Instituição: Lab. Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol - CTBE

Dedico este trabalho aos meus pais e ao meu irmão, meu porto seguro. Aos meus avós, paternos e maternos, espero que tenham se orgulhado, onde quer que estejam.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, ao Grande Arquiteto do Universo, que além da vida, saúde e força também proporcionou todos os meios necessários para que pudéssemos enriquecer nosso conhecimento sobre o mundo.

À minha família, principalmente aos meus pais Agnaldo e Seli, e ao meu irmão Rafael, cujo amor é responsável por tudo o que sou hoje e por todas as conquistas até o momento realizadas.

Às minhas orientadoras Profa. Dra. Renata Rodriguez e Dra. Bruna Moraes, por toda dedicação e carinho para com este projeto, sem os quais não teria sido possível concretizá-lo.

Ao corpo docente da Universidade Federal de Alfenas – Campus Poços de Caldas, em especial ao professor Dr. Gustavo Valdivieso, cujo o auxílio e dedicação foram fundamentais para a realização deste trabalho.

Ao CTBE pelo amparo nas primeiras etapas deste projeto.

À Companhia Elfusa Geral de Eletrofusão Ltda, de São João da Boa Vista, em especial aos Sres. Edmilson Passos e Sérgio Damálio pela compreensão, apoio e incentivo à realização deste projeto.

Às minhas amigas e companheiras de mestrado Rafaela Soares e Mirabelle Cunha por todos os momentos compartilhados e pela companhia insubstituível nesta jornada.

A todos os amigos que de alguma forma se interessaram e me incentivaram a prosseguir em cada desafio.

A vocês, toda a minha gratidão.

**"Foi o tempo que dedicaste à tua rosa que
a fez tão importante"**

(SAINT-EXUPERY, 1952)

RESUMO

A produção de etanol no Brasil é baseada na extração do caldo de cana-de-açúcar para fermentação e destilação, enquanto o bagaço é queimado nas caldeiras para a cogeração de energia. Embora, este processo aproveite de modo geral toda a biomassa disponível, também gera grande quantidade de resíduo, conhecido como vinhoto ou vinhaça, que ao ser utilizado na fertirrigação pode causar diversos problemas ambientais. Além disso, a necessidade de expandir a produção de biocombustíveis gera uma grande problemática com relação à utilização de terras destinadas à produção de alimentos. Nesse sentido, a produção de etanol de segunda geração (2G) surge como alternativa para aumentar a produtividade do bioetanol, mantendo a mesma área de cana plantada, mas trazendo consigo a problemática do aumento da vinhaça gerada. Tendo em vista os desafios criados em torno desta temática, foi desenvolvido um modelo onde se empregou o tratamento biológico anaeróbio de vinhaça para a produção de metano a ser utilizado como fonte de energia em uma usina autônoma de etanol. O bagaço que seria queimado para este fim foi então conduzido para a produção de etanol 2G, aumentando a produtividade deste combustível. Utilizando a ferramenta Solver, do software Excel, foi possível obter com este modelo até 23 L t⁻¹cana de etanol 2G sem comprometer a autossuficiência energética da planta, de modo que os 9,82 m³ t⁻¹cana de metano produzido pela biodigestão possibilitou o redirecionamento de 17% do bagaço para a produção deste combustível. Desta forma seria possível obter, uma receita anual de até R\$ 58 mi. Além do aumento da produtividade, este modelo também previu a redução de impactos ambientais causados pela aplicação da vinhaça no solo, como a prevenção de emissões de cerca de 33.000 tN₂O safra⁻¹, e a geração de valor econômico com a venda de produtos e créditos de carbono, que poderiam custear a operação da biodigestão na unidade.

Palavras-chave: Etanol. Cana-de-açúcar. Biodigestão anaeróbia. Cogeração de energia.

ABSTRACT

The ethanol production process is commonly performed in Brazil by extracting the sugarcane juice for fermentation and distillation, while the bagasse is burned in boilers for energy cogeneration. Although these processes generally utilize all the available biomass, it also generates large amount of residue, known as stillage or vinasse, which when used in fertigation is responsible for many environmental problems. Moreover, the need to expand biofuel production generates a considerable problem regarding the land use for food production. In this sense, the production of second generation (2G) ethanol is an alternative to increase bioethanol productivity while maintaining the same area of planted cane, but bringing the problem of the vinasse generation increase. In view of the challenges created around this issue, a model was developed considering the biological anaerobic treatment of vinasse for the production of methane to be used as a source of energy in an autonomous plant ethanol. The bagasse supposed to be burned for this purpose was then conducted to produce 2G ethanol, increasing the productivity of the fuel. Using the Solver tool of Excel software, it was possible to obtain with this model up to 23 L t⁻¹cane 2G ethanol without compromising the energy self-sufficiency of the plant, so that 9.82 m³ t⁻¹cane of methane produced by digestion allowed liberation of 17% of bagasse from cogeneration to produce this fuel. Thus, it would be possible to obtain an annual income of up to R \$ 58 mi. In addition to increased productivity, this model also foresee the reduction of environmental impacts caused by the application of vinasse in the soil, such as preventing emissions of around 33.000 tN₂O season⁻¹, and the generation of economic value by selling products and carbon credits that could fund the operation of biodigestion in the unit.

Keywords: Ethanol. Sugarcane. Anaerobic digestion. Energy cogeneration.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1	Diferentes rotas tecnológicas para a produção do etanol.	15
Figura 3.2	Estrutura da cana de açúcar.	15
Figura 3.3	Pré-tratamento em materiais lignocelulósicos.	18
Figura 3.4	Fases do processo de biodigestão anaeróbia.	26
Figura 3.5	Sistema de cogeração de energia pela queima de bagaço.	30
Figura 4.1	Cenário base.	38
Figura 4.2	Cenário otimizado.....	38
Figura 4.3	Simulações realizadas em Excel.	40
Figura 5.1	Fontes de vapor para atender a demanda da planta.	50
Figura 5.2	Equivalente de poluição populacional das vinhaças 1G e 2G comparado com a população de grandes cidades brasileiras.	51
Figura 5.3	Relação entre o preço de créditos de carbono e os custos da biodigestão anaeróbia de vinhaça 1G2G.....	56
Figura 5.4	Relação da eficiência da biodigestão anaeróbia da vinhaça 2G com a produção de etanol 2G.	61
Figura 5.5	Relação da quantidade de energia térmica excedente com a quantidade de bagaço equivalente.	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Caracterização do bagaço.	17
Tabela 3.2	Composição da vinhaça proveniente da cana-de-açúcar para diferentes tipos de mosto.....	21
Tabela 3.3	Composição da vinhaça proveniente de material lignocelulósico.	22
Tabela 3.4	Comparativo energético do biogás com relação a diferentes combustíveis.....	27
Tabela 3.5	Demanda de energia no processamento da cana.	31
Tabela 4.1	Dados utilizados nas simulações.....	39
Tabela 4.2	Premissas adotadas para a análise econômica.	46
Tabela 4.3	Investimentos iniciais para a implantação da unidade de hidrólise e digestão da vinhaça.....	46
Tabela 5.1	Resultados referentes à produção de metano e vapor.	47
Tabela 5.2	Volume de etanol 2G e distribuição de bagaços obtidos pelo Solver. ..	49
Tabela 5.3	Emissões de N ₂ O evitadas.....	53
Tabela 5.4	Comparação dos cenários quanto ao valor agregado do produto final.	54
Tabela 5.5	Ganhos e custos anuais do modelo estudado.....	55
Tabela 5.6	Fluxo de caixa considerando as tecnologias atuais (2015).	57
Tabela 5.7	Fluxo de caixa considerando apenas as tecnologias de baixo custo (2025).....	58
Tabela 5.8	Resultados de payback e TIR dos fluxos de caixa estudados.....	59
Tabela 5.9	Resultados do modelo a partir de dados de entrada otimizados..	62

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS	13
3	REVISÃO DA LITERATURA	14
3.1	Etanol 1G e 2G	14
3.2	Propriedades e aplicações da vinhaça	20
3.3	Tratamento da vinhaça através da digestão anaeróbia	23
3.4	Aproveitamento do bagaço de cana-de-açúcar na produção de etanol	28
3.5	Indicadores ambientais	32
3.6	Indicadores econômicos	34
3.7	Considerações Relevantes	35
4	METODOLOGIA	37
4.1	Modelo	37
4.2	Levantamento de Dados	38
4.3	Plataforma de Simulações	40
4.4	Produção de energia através da biodigestão anaeróbia da vinhaça	41
4.5	Indicadores ambientais	42
4.6	Indicadores econômicos	44
5.	RESULTADOS	47
5.1	Rendimento energético da biodigestão anaeróbia da vinhaça	47
5.2	Produção de etanol 2G e distribuição de bagaço	48
5.3	Indicadores ambientais	51
5.3.1	Equivalente Populacional.....	51
5.3.2	Emissões de N ₂ O evitadas.....	52
5.4	Indicadores econômicos	53
5.5	Influência da variação dos dados de entrada	60
6.	CONCLUSÕES	65
7.	TRABALHOS FUTUROS	66
	REFERÊNCIAS	67

1 INTRODUÇÃO

Desde a década de 1970, muitos fatores impulsionaram a busca por combustíveis de origem renovável, os biocombustíveis. Dentre estas razões, destacam-se as emissões de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera, o aumento da poluição local, principalmente nas grandes cidades e, sobretudo, a dependência externa por combustíveis fósseis, como o petróleo. Este último fator foi decisivo para consolidar a busca por tais biocombustíveis, já que os choques causados pelo aumento excessivo dos preços geraram grandes impactos econômicos às nações importadoras de petróleo (LEITE & LEAL, 2007).

É importante ressaltar que as usinas de etanol de cana-de-açúcar podem ser consideradas biorrefinarias, pelo fato de aproveitar toda a biomassa em seu processo produtivo. Neste contexto, enfatiza-se o sistema de cogeração de energia, através da queima do bagaço residual da produção de etanol de primeira geração, ou 1G. Este processo, muitas vezes, produz energia excedente que pode ser exportada para a rede pública de energia elétrica, melhorando o rendimento da indústria e gerando valor econômico.

Com a conjuntura atual de produção de biocombustíveis também veio o esgotamento da produtividade das rotas tradicionais, o que torna necessária a ampliação da utilização de terras. Este fator pode causar a migração das culturas para coberturas florestais, culminando, também, no aumento do preço dos alimentos. Nestas condições, surgiu um grande interesse em todo o mundo pela utilização de resíduos celulósicos (como o bagaço da cana-de-açúcar) para a produção de etanol, chamados de biocombustíveis 2G ou de segunda geração (NYKO et al., 2010).

No entanto, o processo de produção do bioetanol, 1G e 2G, origina abundante quantidade de resíduo líquido, chamado vinhaça ou vinhoto, gerado durante a destilação do etanol. Este efluente pode se constituir em um grave problema ambiental dependendo de sua destinação devido à sua alta carga de matéria orgânica. Convencionalmente, a vinhaça 1G é aplicada no solo para a cultivo da cana-de-açúcar (fertirrigação), devido ao seu rico teor de nutrientes. O mesmo não ocorre com a vinhaça 2G que, além de sua

alta carga poluidora, não apresenta riqueza de nutrientes necessários para esta aplicação (MORAES et al., 2014).

Do ponto de vista energético, o potencial desta grande quantidade de resíduo ainda é pouco aproveitado pelo setor sucroalcooleiro. A composição química da vinhaça faz com que este resíduo seja suscetível à produção de biogás através da biodigestão anaeróbia. Um metro cúbico de vinhaça pode produzir de 10 a 15 metros cúbicos de biogás. Por sua vez, esta quantidade de biogás gerado tem a capacidade de gerar 169 kWh de bioeletricidade (BNDES; CGEE, 2008).

Desta forma, para a otimização energética e aumento da sustentabilidade da indústria de bioetanol, é importante que sejam realizados estudos a respeito do tratamento e aproveitamento de resíduos e recuperação de subprodutos, bem como a questão da geração de energia. Neste contexto, o bagaço e a palha residual do processo de produção de etanol 1G podem se tornar matérias-primas para o processo de produção de etanol 2G e ao mesmo tempo serem fonte de energia termelétrica. De forma similar, os resíduos gerados na produção de etanol 1G2G também se apresentam como fontes potenciais de energia por meio da produção de biogás. Tendo em vista a falta de resultados conclusivos nessa área, se faz importante o estudo de rotas e estratégias para a utilização desta biomassa, visando também o potencial energético oriundo da vinhaça 1G2G.

2 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho foi avaliar o emprego do bagaço da cana-de-açúcar na cogeração de energia térmica e na produção de etanol 2G, considerando o aproveitamento do potencial energético da biodigestão anaeróbia da vinhaça no contexto de uma biorrefinaria integrada 1G2G.

O desenvolvimento deste trabalho teve como objetivos específicos:

- Avaliar o processo de biodigestão anaeróbia da vinhaça na cadeia de produção de etanol 1G2G e analisar o potencial de produção do biogás;
- Avaliar o potencial de aplicação do biogás na cogeração de energia e seu efeito na produção de etanol 2G;
- Comparar os indicadores econômicos e ambientais da utilização do bagaço unicamente para a cogeração de energia ou empregado no processo de produção de etanol 2G.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Etanol 1G e 2G

O etanol é considerado um combustível ecologicamente correto, pois o cultivo de sua matéria-prima reduz a quantidade de gás carbônico na atmosfera através da fotossíntese (PETROBRAS, 2014).

O processo de produção do etanol 1G pode ser realizado a partir de matérias-primas que contenham amido ou açúcares, como mostra a Figura 3.1. As matérias-primas amiláceas, como por exemplo, o milho, o trigo e outros grãos, necessitam da conversão do amido em açúcares através de um processo enzimático a altas temperaturas. No caso das matérias-primas açucareiras, como é o caso da cana-de-açúcar (FIGURA 3.2.), os açúcares já estão disponíveis na biomassa, sendo necessária apenas a extração destes para que seja realizada a fermentação que dará origem ao biocombustível (BNDES; CGEE, 2008). No Brasil, foram cultivadas mais de 9 milhões de hectares de cana-de-açúcar nos anos de 2011 e 2012 graças ao seu clima privilegiado (UNICA, 2014).

O etanol tem uma importância ambiental e econômica muito relevante, pois além de ser produzido a partir de uma matéria-prima renovável, gera empregos na cadeia sucroalcooleira e novas oportunidades de negócios, além de reduzir a emissão de gases para a atmosfera, o que é uma preocupação mundial atualmente.

Além das emissões reduzidas, as usinas de produção de etanol a partir da cana-de-açúcar são autossuficientes em energia elétrica, uma vez que o bagaço gerado durante o processo, na etapa da moagem, é queimado em caldeiras gerando energia, muitas vezes em quantidade maior que a necessária na usina, sendo então passível de comercialização (BNDES; CGEE, 2008).

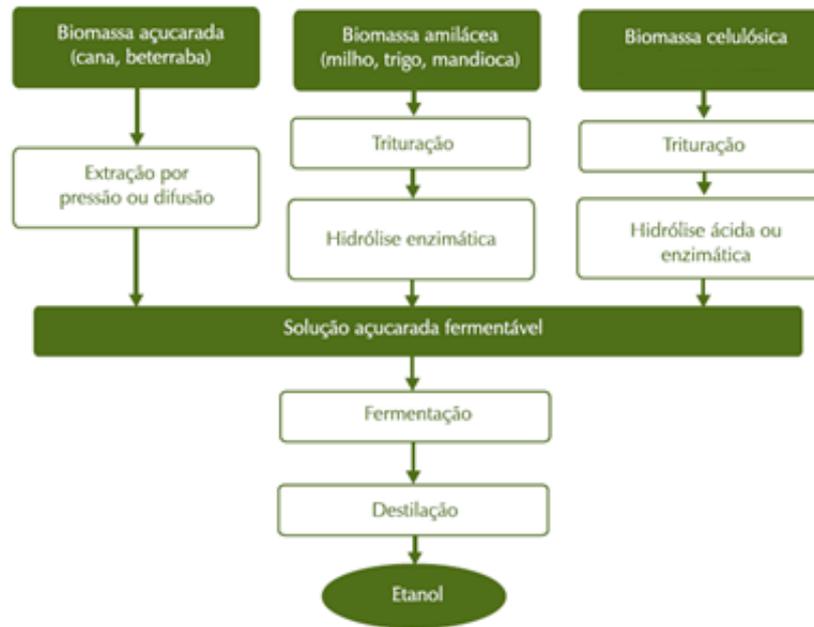


Figura 3.1 - Diferentes rotas tecnológicas para a produção do etanol.

Fonte: Adaptado de BNDES e CGEE (2008).

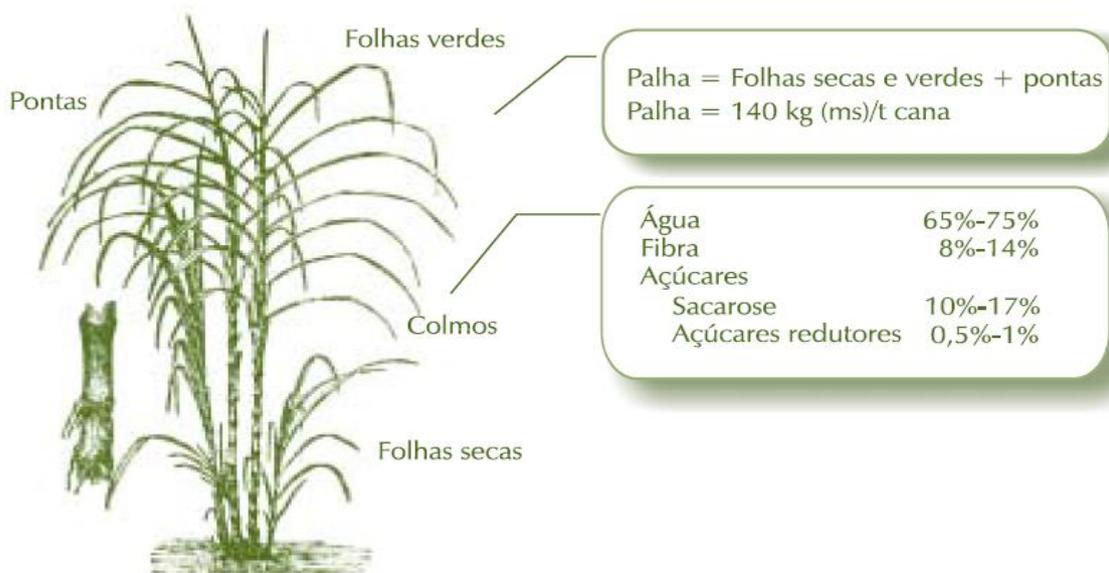
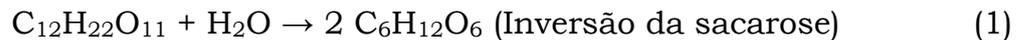


Figura 3.2 - Estrutura da cana de açúcar.

Fonte: BNDES e CGEE (2008).

O processo de produção de etanol a partir da cana-de-açúcar consiste basicamente na extração do caldo, geralmente realizado por moendas, seguido do tratamento e preparação do mosto. A solução açucarada resultante então é levada para as cubas de fermentação, onde são adicionados microrganismos (geralmente fungos unicelulares da espécie

Saccharomyces cerevisiae), chamados de “levedo”, “pé-de-cuba” ou “fermento”, responsáveis pela transformação da sacarose presente no mosto em etanol. A fermentação dura cerca de 8 a 12 horas, período em que o caldo é transformado em vinho, que possui de 7% a 10% de álcool. Esta transformação dá-se segundo a reação simplificada de Gay Lussac (1 e 2) (DUARTE, LOURENÇO; RIVEIRO, 2006):



O vinho resultante segue para as colunas de destilação para a remoção da água e concentração do etanol. O bioetanol hidratado, produto da destilação, pode ser utilizado como produto final, comercializado em postos de combustíveis para o abastecimento de carros a álcool ou carros Flex-fuel, ou ainda pode seguir para o processo de desidratação para a produção de etanol na forma anidra (UNICA, 2007). A destilação do vinho pode dar origem a vários subprodutos, como a vinhaça, responsável por graves problemas ambientais, e o óleo fúsel, muito utilizado como matéria-prima para processos de refinação em função de seu teor de álcoois superiores (ALCARDE, 2007).

A produtividade do etanol de cana-de-açúcar pode ainda ser acrescida através da utilização integral da cana-de-açúcar para a produção de biocombustível, por meio do pré-tratamento e hidrólise de excedentes de bagaço e palha de cana-de-açúcar, que são chamados combustíveis de segunda geração (2G). Esta alternativa seria uma boa solução para problemas como competição do uso da terra para produção de alimentos e a ampliação de produção de cana através do desmatamento (DIAS, 2011).

A biomassa lignocelulósica, segundo trabalho realizado por Rosa e Garcia (2009), é formada por 26,6 a 54,3% de celulose, 14,3 a 24,4% de hemicelulose, 22,7 a 29,7% de lignina e uma pequena quantidade de cinzas e extrativos. A constituição do bagaço de cana-de-açúcar, de acordo com a Tabela 3.1, é relativa à fatores externos, como tipo de solo utilizado no plantio, tipo de cana, manuseio e processo aplicado na colheita.

Tabela 3.1 - Caracterização do bagaço.

Composição química	
Carbono	39,7 - 49%
Oxigênio	40 - 46%
Hidrogênio	5,5 - 7,4%
Nitrogênio e cinzas	0 - 0,3%
Propriedades Físico-Químicas	
Umidade	50%
Fibra	46%
Brix	2%
Impurezas minerais.	2%

Fonte: Rosa e Garcia, 2009

Para a produção do combustível 2G, o bagaço deve passar por pré-tratamento, hidrólise, fermentação e purificação para só assim ser obtido o produto final. O pré-tratamento permite, segundo alguns pesquisadores, o melhor aproveitamento do bagaço através do fracionamento nos seus componentes principais, que são a celulose, hemicelulose e lignina. Isso ocorre porque a celulose nativa apresenta-se de forma protegida pela matriz lignina-carboidrato, dificultando a ação hidrolítica responsável pela transformação da celulose em monômeros de glicose. Desta forma, o pré-tratamento aumenta a exposição das fibras de celulose, permitindo o acesso dos agentes hidrolíticos, sejam eles enzimáticos ou ácidos. Além disso, o pré-tratamento do bagaço permite reduzir o grau de cristalinidade da celulose, aumentar a área superficial da biomassa, dissociar o complexo lignina-celulose e preservar as pentoses, de modo a garantir maior rendimento na conversão hidrolítica. O processo de pré-tratamento está ilustrado na Figura 3.3.

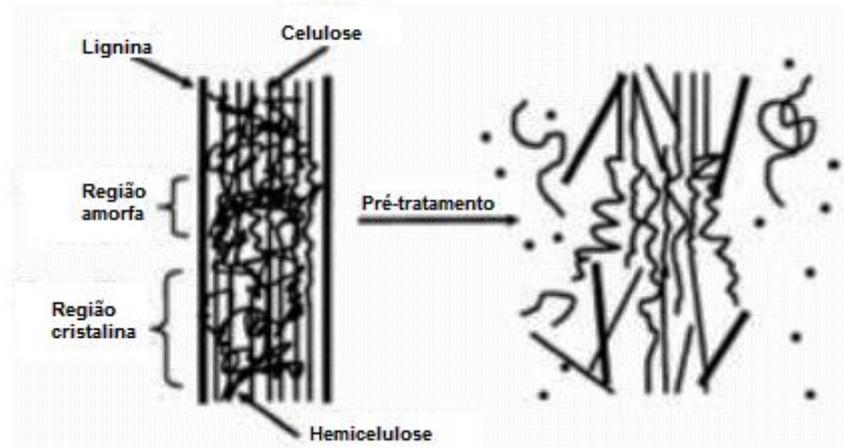


Figura 3.3 – Pré-tratamento em materiais lignocelulósicos.
 Fonte: Adaptado de HSU et al. (1986).

A fase de hidrólise vem sendo estudada desde o século XIX, e compreende processos de tecnologias complexas e de multifases que podem ser realizados por rota ácida ou enzimática que, como já citado, são responsáveis pela degradação do material lignocelulósico em moléculas de glicose, possibilitando assim o processo de fermentação para a produção do etanol. As técnicas empregadas para o processo de hidrólise são: hidrólise com ácido concentrado, hidrólise com ácidos diluídos e hidrólise enzimática. Na hidrólise com ácido concentrado são utilizadas soluções aquosas de ácidos fortes, como sulfúrico, clorídrico ou fosfórico, que em temperaturas menores que 100°C agem na quebra da lignocelulose. Neste caso, são necessários equipamentos de alta resistência à corrosão que encarecem o procedimento e conseqüentemente o produto final. Além disso, esta técnica apresenta grandes barreiras econômicas, uma vez que há grande perda dos açúcares formados por degradação, devido ao fato da hemicelulose ser hidrolisada rapidamente, deixando os açúcares expostos no meio reacional por muito tempo. O meio ambiente também pode ser afetado por esta técnica, uma vez que envolve a utilização de ácidos fortes que devem ser recuperados corretamente (SUN e CHENG, 2002).

Na hidrólise realizada por meio de ácido diluído, ocorre a separação da hemicelulose e da celulose, ocasionando a otimização do processo, já que a hemicelulose hidrolisada pode ser removida logo no primeiro passo da hidrólise. A grande desvantagem deste processo é que nas altas

temperaturas utilizadas, que usualmente atingem 200°C, ocorre a degradação de grande parte dos açúcares, inibindo o processo de fermentação.

Na hidrólise enzimática, mais comumente utilizada, é necessário pré-tratamento para permitir a quebra da hemicelulose em celulose, que será convertida em glicose pela ação de enzimas celulares. O processo é dado por condições mais suaves, de 45 a 50°C e um pH aproximado de 4,8. Deste modo, é liberada uma quantidade maior de açúcares fermentáveis. O grande desafio desta técnica está na fermentação das pentoses formadas, que ainda não é realizada em escala industrial, diferente das hexoses, que são processadas normalmente.

A hidrólise enzimática da celulose é realizada por enzimas chamadas celulasas, e são originadas, em sua maioria, por microrganismos como fungos filamentosos e bactérias. No caso dos fungos, os mais estudados para este processo, por excretarem uma celulase de alta atividade no meio de cultura, são: *Trichoderma reesei*, *Penicillium pinophilum*, *Humicola insolens*, *Trichoderma koningii*, *Penicillium funiculosum*, *Fusarium solani*, *Myrothecium verrucaria*, *Sporotrichum pulverulentum* e *Aspergilo niger*. Já as bactérias usualmente empregadas são a *Cellulomonas fini* e *Clostridium thermocellum*. Em termos econômicos, a obtenção de enzimas é a fase mais cara do processo de produção do etanol 2G através da hidrólise enzimática. Mesmo com os avanços obtidos nos últimos 20 anos, o custo da produção de enzimas ainda representa uma barreira na popularização do etanol 2G (HOWARD et al., 2003).

Para melhorar estes aspectos, existem diversos estudos sendo realizados: busca de mutantes hiperprodutores e novos microrganismos produtores mediante metagenômica (JACOBSEN et al., 2005; KUZNETSOVA et al., 2005), estudos de engenharia genética (DALBOGE, 1997) e otimização dos meios e das condições de produção. Em relação aos meios de produção, existem estudos que propõem o emprego dos próprios materiais lignocelulósicos como matéria-prima na produção enzimática (JORGENSEN e OLSSON, 2006; JUHÁSZ et al., 2005).

Com as tecnologias desenvolvidas nas últimas duas ou três décadas, a hidrólise permitiria aumentar a produtividade deste combustível em até 200% (LEITE; CORTEZ, 2013).

Um estudo realizado por Dias (2011) revelou melhorias na produção de etanol de cana-de-açúcar apenas em um cenário onde a produção de energia através do bagaço da cana é maximizada, enquanto as melhorias através da utilização do etanol 2G só são relevantes com a utilização do lixo dos canaviais e com melhorias na tecnologia de hidrólise. No entanto, mesmo com a tecnologia de hidrólise atual, o processo 1G2G integrado diminui o custo total do biocombustível e favorece sua produtividade em até 22%.

3.2 Propriedades e aplicações da vinhaça

Dos resíduos gerados através da produção de etanol, a vinhaça, ou vinhoto, possui o maior destaque tanto pelo seu alto poder poluente quanto pelo volume gerado. Para cada litro de álcool produzido no processo 1G, são gerados aproximadamente 10 litros deste resíduo, que se apresenta na forma de um líquido turvo com coloração que varia do amarelo âmbar ao pardo escuro e que apresenta um odor característico (DIAS et al., 2012).

A composição da vinhaça pode ainda variar dependendo da fermentação adotada, do tipo de levedura, do aparelho utilizado para destilação e do preparo do mosto. Como pode ser observada na Tabela 3.2, a vinhaça proveniente de mosto de melaço é mais rica em matéria orgânica e de elementos minerais que a de mosto misto e a de caldo, devido ao fato dos açúcares estarem mais concentrados (PREVITALI, 2011).

Tabela 3.2 - Composição da vinhaça proveniente da cana-de-açúcar por diferentes tipos de mosto.

Parâmetro	Melaço	Caldo	Misto
pH	4,2 - 5,0	3,7 - 4,6	4,4 - 4,6
Temperatura	80 - 100	80 - 100	80 - 100
DBO (mg LO ₂ ⁻¹)	25000	6000 - 16500	19800
DQO (mg LO ₂ ⁻¹)	65000	15000 - 33000	45000
Sólidos totais (mg L ⁻¹)	81500	23700	52700
Sólidos voláteis (mg L ⁻¹)	60000	20000	40000
Sólidos fixos (mg L ⁻¹)	21500	3700	12700
Nitrogênio (mg LN ⁻¹)	450 - 1600	150 - 700	480 - 710
Fósforo (mg LP ₂ O ₅ ⁻¹)	100 - 290	10 - 210	9 - 200
Potássio (mg LK ₂ O ⁻¹)	3740 - 7830	1200 - 2100	3340 - 4600
Cálcio (mg LMgO ⁻¹)	450 - 5180	130 - 1540	1330 - 4570
Magnésio (mg LMgO ⁻¹)	420 - 1520	200 - 490	580 - 700
Sulfato (mg (LSO ₄ ⁻¹))	6400	600 - 760	3700 - 3730
Carbono (mg LC ⁻¹)	11200 - 22900	5700 - 13400	8700 - 12100
Relação C/N	16 - 16,27	19,7 - 21,07	16,4 - 16,43
Matéria orgânica (mg L ⁻¹)	63400	19500	38000
Substâncias redutoras (mg L ⁻¹)	9500	7900	8300

Fonte: Pinto (1999)

No caso do vinhoto, resultante do processamento de materiais lignocelulósicos, notam-se características divergentes ao de materiais convencionais, principalmente quando se trata de sua Demanda Química de Oxigênio (DQO). A DQO é a medida convencionalmente utilizada na área de tratamento de resíduos para descrever o teor de material orgânico do substrato. É medida de forma indireta por meio da oxidação da matéria orgânica. Neste caso, a DQO da vinhaça 2G pode ser de 4 a 5 vezes maior do que a vinhaça 1G. Além disso, dois fatores chamam a atenção para a periculosidade deste resíduo: o potencial para altos níveis de metais pesados provenientes dos processos de hidrólise ácida e a presença de inibidores incomuns como compostos extraídos da madeira, associados com compostos fenólicos presentes na matéria-prima. Além disso, ao contrário da vinhaça de etanol 1G, o teor de nutrientes (nitrogênio, fósforo e potássio) é baixo ou quase nulo, o que impede que a vinhaça 2G seja considerada ótimo fertilizante para a cultura da cana. De acordo com a patente da Petrobrás

(2012), a composição da vinhaça 2G pode ser expressa pelos valores contidos na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Composição da vinhaça proveniente de material lignocelulósico.

Parâmetro	Valores
pH	4,0 - 4,9
DQO (mg L ⁻¹)	75800 - 109700
DBO (mg L ⁻¹)	31500 - 87700
Nitrogênio (mg LN ⁻¹)	205 - 462
Fósforo (mg LP ₂ O ₅ ⁻¹)	100,5
Potássio (mg LK ₂ O ⁻¹)	40 - 88
Sulfato (mg (LSO ₄ ⁻) ⁻¹)	14,6 - 122
Cálcio (mg LMgO ⁻¹)	8 - 12
Magnésio (mg LMgO ⁻¹)	16 - 24
TS (mg L ⁻¹)	467 - 5805
VS (mg L ⁻¹)	454 - 5715
Carbono (mg LC ⁻¹)	22700 - 33200
Substâncias redutoras (mg L ⁻¹)	9166
Fenóis (mg L ⁻¹)	0,4 - 12,4

Fonte: Petrobrás. (2012)

De acordo com Laime et al. (2011), os efeitos poluentes da vinhaça são de tal intensidade que chegam a corresponder em 100 vezes a poluição causada pelo esgoto doméstico. Em média, a produção de 10 litros de etanol 1G possui potencial poluidor equivalente a geração de esgoto de aproximadamente 172 pessoas. Isso se dá principalmente pela presença de componentes como nitrogênio, fósforo e potássio e pela sua alta carga orgânica, responsável pela proliferação de microrganismos em ambientes aquáticos e que causam o esgotamento de oxigênio dissolvido do mesmo. As consequências causadas no meio ambiente devido a este efeito, principalmente até meados da década de 70, onde era comum o descarte da vinhaça em corpos hídricos, são de extrema gravidade, como a destruição da fauna e flora aquática, dificuldade do aproveitamento de mananciais contaminados como fonte de água potável.

Com o avanço da tecnologia e desenvolvimento de pesquisas nas décadas de 80 e 90, a vinhaça 1G passou a ser empregada na fertirrigação, que além de solucionar o problema de destinação deste resíduo, também reduzia o uso de insumos químicos para esta finalidade.

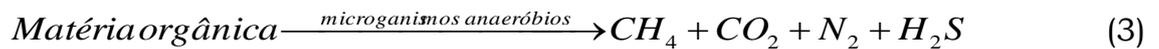
A utilização deste substrato para a fertirrigação eleva a produção de CO₂ aumentando também a respiração do solo e dos microrganismos presentes, graças à atividade de decomposição da matéria orgânica presente no resíduo. Além disso, a vinhaça ainda reduz a infestação de ervas daninhas, contribui para o melhor desenvolvimento de algumas plantas, aumenta o sistema radicular destas e a produtividade de colmos, entre outros benefícios. Por outro lado, o excesso de vinhaça no solo promove a presença excessiva de nutrientes, que por consequência pode causar a lixiviação e risco de salinização e desbalanceamento catiônico, com redução na produção vegetal em solos arenosos (PREVITALI, 2011). Outros trabalhos indicam que a presença de matéria orgânica na vinhaça também é fonte de diversos impactos ambientais quando a mesma é aplicada no solo, como a emissão de gases do efeito estufa (GEE), liberação de maus odores, atração de insetos, entre outros (FIGUEIREDO, LA SCALA 2011; HOEFNAGELS et al., 2010; MACEDO et al., 2008; WALTER et al., 2011).

Vale ressaltar que a composição deste efluente não é padronizada de acordo com o uso do solo, uma vez que a caracterização da vinhaça varia significativamente de acordo com cada planta de processamento de cana-de-açúcar. O uso da vinhaça para fertirrigação ainda é um tópico controverso com relação aos benefícios para o cultivo da cana e as consequências para o meio ambiente; no entanto, não é possível afirmar com segurança que essa aplicação não resulta em impactos ambientais, embora seja permitido por lei (MORAES et al., 2014).

3.3 Tratamento da vinhaça através da digestão anaeróbia

A digestão anaeróbia consiste em um processo biológico onde microrganismos anaeróbios, na ausência de oxigênio livre, convertem a matéria orgânica em biogás, composto por uma mistura de metano, dióxido

de carbono e pequenas quantidades de hidrogênio, nitrogênio e sulfeto de hidrogênio, de acordo com a Eq. (3). Este biogás possui potencial para ser utilizado como combustível graças às elevadas concentrações de metano, que se encontram usualmente em uma faixa de 55% a 75%. A digestão pode ser realizada em diversos reatores, conhecidos como digestores ou biodigestores.



A degradação da matéria orgânica por via anaeróbia trata-se de um processo quimicamente complexo, que está sujeito à formação de diversos compostos e reações intermediárias, catalisadas por diferentes microrganismos e enzimas (SCHIRM, 1991).

A matéria orgânica é utilizada pelas bactérias que atuam no primeiro estágio do processo biológico para o crescimento da população, de forma simbiótica e sinérgica. A transformação é iniciada, no caso de moléculas complexas como a celulose, pela quebra das unidades básicas que constituem a matéria orgânica pelas enzimas. Desta forma, são criados compostos mais simples que permitem a alimentação das bactérias. Geralmente, esta quebra de moléculas conduz à produção de ácido acético, entre outros ácidos e seus respectivos sais.

Após a fase inicial de quebra das estruturas complexas, o processo de biodigestão da matéria orgânica é dado em duas fases: a acidogênica e a metanogênica. A fase acidogênica utiliza os compostos simplificados produzidos na etapa inicial que são convertidos através das bactérias formadoras de ácidos em ácidos voláteis, álcoois, dióxido de carbono, hidrogênio molecular e amônia. Nesta fase, há grande conversão de matéria em biomassa microbiana, o que favorece a cinética da reação (NOGUEIRA, 1986).

Já na fase metanogênica, ocorre o metabolismo dos compostos como o dióxido de carbono, hidrogênio molecular e acetato, gerados na etapa anterior, pelas arqueias metanogênicas, onde ocorre a desassimilação de metano e dióxido de carbono. Não se sabe ao certo qual é a proveniência do

metano com relação à fase acidogênica, porém é considerado que mais de 70% do metano gerado é originado pelo acetato, sal do ácido acético, e os 30% restantes ficam a encargo do hidrogênio e dióxido de carbono. Desta forma, considera-se a existência de uma fase intermediária, responsável por converter através de fermentação os álcoois e ácidos orgânicos mais pesados em acetato, hidrogênio molecular e dióxido de carbono. Esta fase intermediária é chamada de acetogênica, na qual atuam as bactérias acetogênicas produtoras de hidrogênio em associação com as arqueias metanogênicas.

A Figura 3.4 mostra as etapas do processo de biodigestão anaeróbia, contendo a fase acetogênica de forma resumida.

As reações que constituem a biodigestão anaeróbia são dadas no interior de digestores, que são constituídos basicamente por (SOUZA 2000):

- Câmara de fermentação, onde ocorre a biodigestão da matéria orgânica;
- Saída para o gás produzido, que pode conter ou não uma campânula para armazenamento;
- Entrada do substrato a ser digerido;
- Saída do efluente produzido no processo.

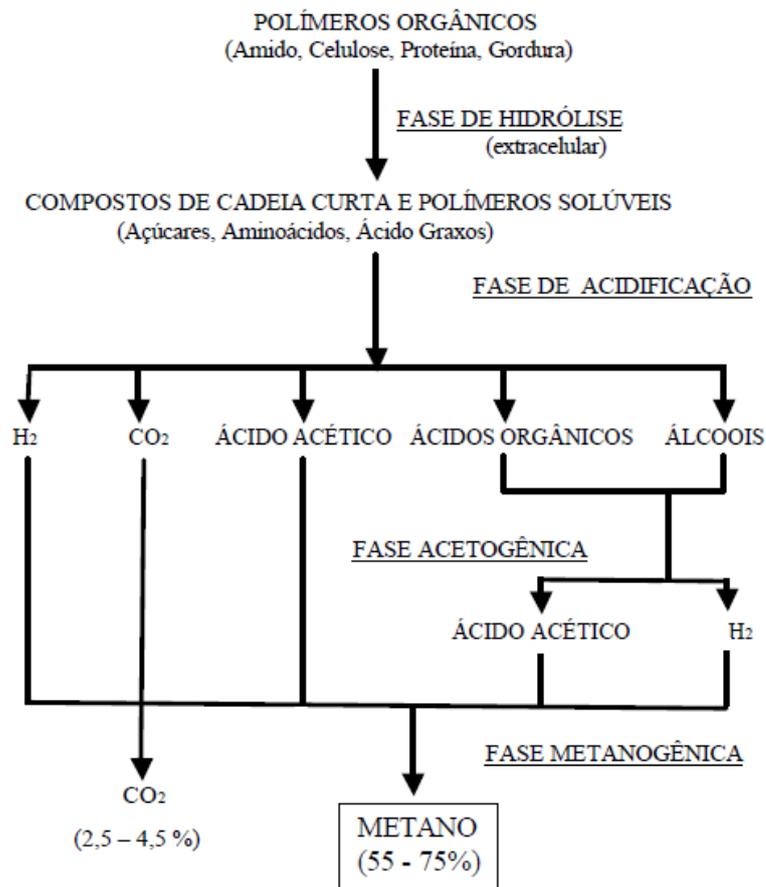


Figura 3.4 – Fases do processo de biodigestão anaeróbia.
Fonte: Souza (2000).

Para a separação do biogás gerado, são geralmente instalados defletores que servirão para dirigir o gás ao sedimentador. Além de oferecer uma forma alternativa de energia limpa, o biogás apresenta balanço de CO₂ equilibrado, uma vez que o dióxido de carbono emitido na queima é também utilizado pela biomassa na fotossíntese. Granato (2003) em seu trabalho, expôs uma comparação entre o biogás gerado e outras formas de energia, que pode ser observada pela Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Comparativo energético do biogás com relação a diferentes combustíveis.

Combustível	PCI* (kcal/kg)	Densidade (kg/m³)	Equivalência (m³ de CH₄)
Metano	11350	0,775	-
Álcool	7090	0,789	1,571
Diesel	10000	830	1,001
Gasolina	10600	735	1,101
GLP	10000	585	1,501
Óleo Combustível	10500	880	0,951
Gás Natural	11440	0,775	0,96

*PCI - Poder calorífico inferior

Fonte: Granato (2003)

A remoção de resíduos poluentes através da digestão anaeróbia vem chamando grande atenção e é alvo de diversos estudos e aplicações industriais voltados à redução da carga orgânica e ao aproveitamento energético do biogás gerado neste processo. Além disso, sua utilização em diversos tipos de efluentes trouxe resultados satisfatórios em todo o mundo. Este processo apresenta diversas vantagens sobre o tratamento aeróbio, entre elas: a produção de energia útil na forma de biogás; volume do excesso de lodo significativamente menor, já que apenas uma pequena parte da matéria orgânica é convertida em biomassa; pouco espaço requerido; uso de reatores simples, tornando a operação de baixo custo; possibilidade de recuperação de produtos úteis, como enxofre e amônia através da combinação com métodos de pós-tratamento (PINTO, 1999).

A digestão anaeróbia também pode servir como alternativa para o tratamento de vinhaça, de forma a reduzir seu teor de matéria orgânica e mantendo a maior parte dos seus nutrientes, como o nitrogênio, o fósforo e o potássio. Segundo Moraes et al., (2014), este tratamento pode, também, remover sulfato de forma a beneficiar a fertirrigação do solo, pois evita os impactos ambientais causados pela lixiviação de sulfato. Além disso, o sulfeto gerado pode ser recuperado sob a forma de enxofre elementar através da combinação de reatores microaerados com digestores anaeróbios. Assim, o enxofre pode ser um novo subproduto de valor agregado da cadeia de produção de etanol.

Assim sendo, podemos afirmar que a fertirrigação pode ser beneficiada pela digestão anaeróbia da vinhaça, pois esta diminui o risco de emitir uma quantidade considerável de GEE e/ou causar contaminação das águas subterrâneas pela eliminação do solo. A matéria orgânica biodegradável da vinhaça seria prontamente removida no reator anaeróbio, minimizando, assim, a lixiviação de metais e nutrientes devido à presença de compostos orgânicos solúveis (MORAES et al., 2014).

No final do século passado, vários processos comerciais foram desenvolvidos a fim de implementar a digestão anaeróbia da vinhaça, porém estes foram rejeitados pelo setor sucroalcooleiro pelo fato de que a geração de eletricidade a partir do biogás não possuía viabilidade econômica. Atualmente, esta possibilidade vem sendo considerada devido à necessidade de reduzir a carga orgânica da vinhaça para a aplicação ao solo de forma a manter o teor de nutrientes e minerais presentes neste efluente. Além disso, existe o interesse em aperfeiçoar o balanço energético na cadeia de produção de etanol.

Por fim, a utilização da biodigestão anaeróbia da vinhaça vai além da adequação ambiental deste efluente, podendo ser um ótimo recurso para otimizar a produção de energia dentro da produção do etanol.

3.4 Aproveitamento do bagaço de cana-de-açúcar na produção de etanol

A produção de etanol, independente da matéria-prima utilizada, demanda uma grande quantidade de energia elétrica. O combustível fabricado a partir da cana-de-açúcar apresenta vantagem, pois o sistema de cogeração de energia elétrica utilizada na maioria das plantas, através da queima do bagaço, provê a energia necessária para o funcionamento da usina.

De acordo com a Resolução ANEEL 235/2006, Artigo 3º, a cogeração de energia pode ser definida por: “Cogeração é um processo operado numa instalação específica para fins da produção combinada das utilidades calor e energia mecânica, esta geralmente convertida total ou parcialmente em

energia elétrica, a partir da energia disponibilizada por uma fonte primária [...]” (ANEEL, 2006).

A cogeração ocorre comumente nas usinas de cana-de-açúcar, pois para cada tonelada de cana são produzidos aproximadamente 276 kg de bagaço com 50% de umidade, equivalente a 598.000 kcal, que corresponde a 34% do potencial energético da cana-de-açúcar. Além disso, a queima produz cerca de 500 kg de vapor, valor que pode variar em função das especificações da caldeira utilizada. Muitas vezes, como acontece no Brasil, há energia excedente que pode ser exportada para a rede pública, de acordo com o Decreto-lei nº 1.872, de 21 de maio de 1981, que possibilitou às concessionárias do serviço público de eletricidade negociar a energia excedente gerada de fontes renováveis por autoprodutores, melhorando assim o rendimento da indústria e gerando valor econômico (BNDES; CGEE, 2008).

A queima do bagaço para a cogeração de energia é dada em caldeiras do tipo aquatubular. É importante escolher o tipo adequado de caldeira, pois estas possuem grande influência na queima. As caldeiras com fornada, tipo ferradura e com grelha plana ou inclinada, realizam queima em leito fixo (na forma de pilhas) e tratam-se de tecnologias antigas e ineficientes, empregadas nas primeiras unidades instaladas, sendo as mais comuns entre as usinas de cana-de-açúcar. Já as caldeiras que realizam queima em suspensão são mais modernas e eficientes. Com isso, esta opção tem sido adotada na implantação de novas usinas e na reforma de usinas antigas.

A eficiência das caldeiras está diretamente relacionada com o aproveitamento da energia contida no fluxo de gases de exaustão. O aumento da temperatura do vapor gerado por meio de superaquecedores reduz o consumo de bagaço de forma a favorecer o rendimento energético.

Para o processamento da cana-de-açúcar, são necessários três tipos de energia: térmica, mecânica e elétrica. A energia térmica é responsável pelo processo de aquecimento e concentração, enquanto as energias mecânica e elétrica são utilizadas para o acionamento de sistemas diretos, como bombas e sistemas de iluminação (BNDES; CGEE, 2008).

No caso da produção de energia eletromecânica, o vapor produzido aciona turbinas acopladas à geradores de eletricidade, enquanto a energia térmica, característica do processo de cogeração, é dada pelo aproveitamento do vapor de escape das turbinas (DANTAS FILHO, 2009). A pressão do vapor na saída dessas turbinas fica, em geral, próxima a 2,5 bar. No entanto, a sua condição na entrada pode ser escolhida de acordo com a caldeira empregada, gerando uma potência proporcional à sua energia térmica, em função de sua pressão e temperatura na saída da caldeira. A Figura 3.5 traz o esquema usualmente utilizado na cogeração de energia por biomassa canavieira no mundo (SEABRA, 2008).

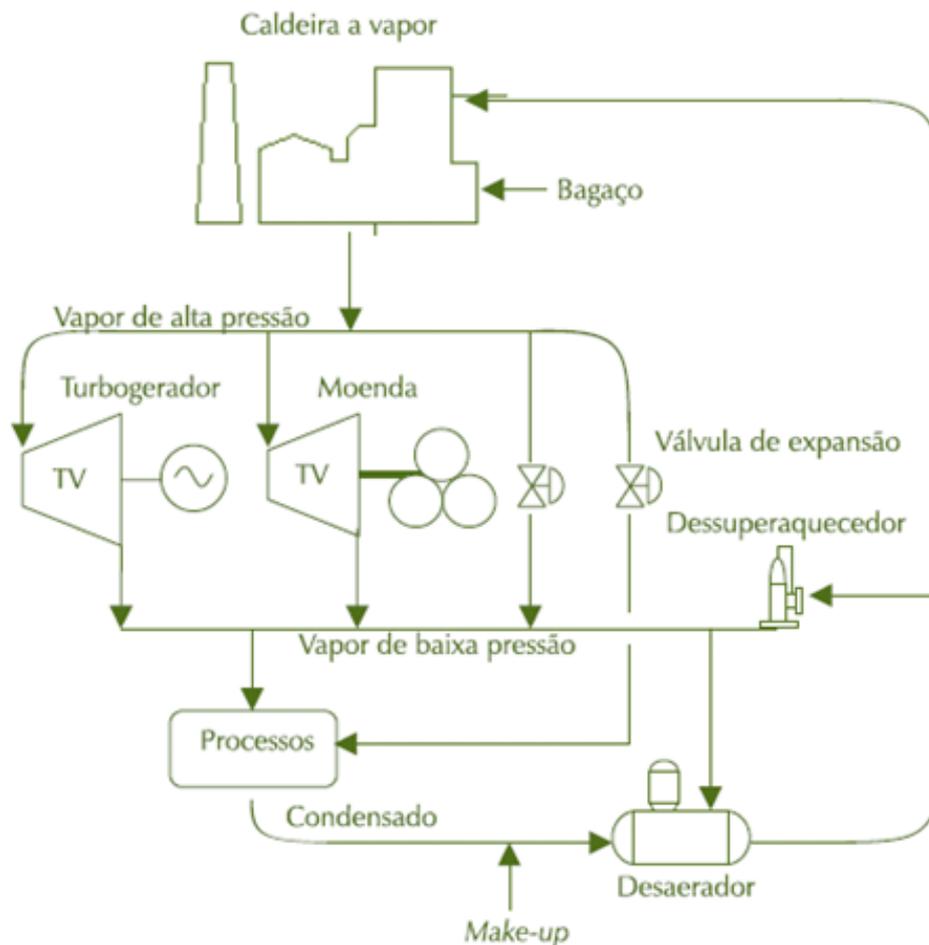


Figura 3.5 - Sistema de cogeração de energia pela queima de bagaço.
Fonte: Seabra (2008)

A grande eliminação de água no processo de produção do etanol faz com que a demanda de energia seja alta, em especial a energia térmica. A

Tabela 3.5, de acordo com o trabalho realizado por BNDES e CGEE (2008), mostra esta relação de necessidade energética em uma usina de cana-de-açúcar. Cabe ressaltar que o sistema de cogeração pela utilização de bagaço vem como alternativa para suprir a demanda dos três tipos de energia utilizados, e representa um diferencial da cana-de-açúcar com relação à outras matérias-primas (MACEDO; NOGUEIRA, 2004).

Tabela 3.5 - Demanda de energia no processamento da cana.

Energia	Unidade	Açúcar	Bioetanol hidratado	Bioetanol anidro
Térmica				
Como vapor saturado a 1,5 bar (manométrico), para aquecedores, evaporadores e destilaria.	kg t ⁻¹ cana	470-500	370-410	500-580
Mecânica				
Acionamento dos sistemas de preparo e moagem da cana e motobombas.	kWh t ⁻¹ cana	16	16	16
Elétrica				
Motores elétricos diversos, iluminação e outras cargas.	kWh t ⁻¹ cana	12	12	12

Fonte: BNDES e CGEE (2008).

Na tentativa de aumentar a produtividade de etanol, o uso do bagaço para a produção de etanol 2G vem ganhando destaque, apesar de ainda não ser uma tecnologia estabelecida nas usinas. Com isso, no futuro, a cogeração também deverá ocorrer com o bagaço pós-tratado no processo 2G (que vai conter o material fibroso), sendo que parte do bagaço deverá ser enviada diretamente para a caldeira de forma a atender a demanda energética da usina (DIAS, 2012).

Segundo Bosco (2014), uma tonelada de bagaço com 50% de umidade consegue produzir, através da queima, aproximadamente 500 kWh de energia. Se considerarmos que no Brasil o valor médio da energia elétrica é de 0,29016 R\$ kWh⁻¹ (Aneel – vigente até o dia 03/07/2015), é possível obter

um rendimento de R\$ 145,00 por tonelada de bagaço excedente, ou seja, que não é utilizado para a produção de energia para o funcionamento da usina.

No caso da conversão do bagaço em etanol 2G, sabe-se que uma tonelada de bagaço com 50% de umidade poderia produzir, de acordo com estudos realizados em escala piloto (LEITE; CORTEZ, 2013), de 70 a 150 litros de etanol anidro. Considerando o preço do etanol anidro até o dia 02/01/2015 de 1,4361 R\$ L⁻¹ de etanol (CEPEA, 2015), é possível obter um rendimento de R\$ 100 a R\$ 215,00 por tonelada de bagaço com a produção de etanol 2G.

Além disso, estima-se que, pela composição do bagaço (47% celulose; 27% hemicelulose; 25% lignina) e considerando que cerca de 40% da celulose e 10% da hemicelulose não seriam decompostas nas fases de pré-tratamento e hidrólise, seria possível retornar 53% do bagaço da produção do etanol 2G para a produção de energia através da queima. Considerando complementação de 10 a 15% da palha na cogeração, é possível atingir o equivalente a 66% de retorno do bagaço, em termos energéticos. Desta forma, a utilização desta biomassa no processo de produção de etanol 2G pode produzir até 95 R\$ t⁻¹bagaço com a venda de energia elétrica, que somado ao arrecadado com a venda de etanol pode gerar um rendimento total de até 310,00 R\$ t⁻¹bagaço. Cabe citar que a qualidade do etanol 2G é exatamente a mesma do etanol 1G, apesar do diferente método de produção.

Segundo Dantas Filho (2009) o bagaço de cana-de-açúcar representa uma grande fonte de biomassa no país, e pode ser aproveitado para diversos fins além da cogeração de energia e produção de etanol. Entre os destaques da utilização deste insumo estão os compostos de ração animal, fertilizantes, matéria-prima para compensados e para a utilização na indústria química em geral.

3.5 Indicadores ambientais

A crescente geração de gases do efeito estufa, bem como a elevação das emissões de poluentes que contaminam o solo, a água e afetam a qualidade do ar, principalmente nos grandes centros urbanos, são decorrentes do

desenfreado desenvolvimento e crescimento econômico voltado para a melhoria socioeconômica da população, desconsiderando as questões ambientais envolvidas (BRASIL, 2015).

Efeito estufa é chamado o processo físico onde a radiação infravermelha emitida pela superfície terrestre é irradiada de volta pelos chamados gases do efeito estufa, ao invés de ser liberado no espaço, sendo responsável pelo aumento da temperatura do planeta. Este fenômeno é causado, principalmente, pelos gases: CO₂, CH₄, óxido nitroso (N₂O), ozônio (O₃) e pelos clorofluorcarbonos (CFC's).

No Brasil, as emissões de gases e poluentes são, em sua maioria, ocasionadas pelas fontes renováveis na matriz energética brasileira, pela grande produção agrícola e pelas altas taxas de desmatamento, devido aos vastos recursos naturais do país. De acordo com a CETESB (2015), 92,4% das emissões de CO₂ no país são originadas no desflorestamento e uso da terra, sendo que o restante é associado ao setor energético, incluindo processos de combustão. Já no caso das emissões de N₂O, a utilização de fertilizantes orgânicos vem sendo apontada como uma das principais causadoras.

Devido às graves consequências das emissões dos gases causadores do efeito estufa, o estudo de suas emissões tornou-se de grande relevância na análise de processos e atividades econômicas, servindo como indicadores ambientais. Da mesma forma, o Protocolo de Quioto foi proposto em 1997 para que houvesse o comprometimento entre países desenvolvidos e em desenvolvimento para a redução das emissões antropogênicas destes gases. Além disso, o tratado intensificou a expectativa da geração de valor econômico por meio da venda dos créditos de carbono, incentivando a elaboração de projetos de mecanismo de desenvolvimento limpo (MDL).

Para a comercialização de créditos de carbono são contabilizadas as reduções nas emissões de todos os gases causadores do efeito estufa, como por exemplo o N₂O e o CH₄. Para isto, estas emissões devem ser convertidas em quantidade de gás carbônico equivalente por meio do potencial de aquecimento global (GWP), que relaciona a quantidade de radiação

infravermelha por cada um destes gases com a quantidade absorvida pelo gás carbônico.

O estudo das tecnologias limpas que se adequam às expectativas dadas pelos indicadores ambientais está presente também em um contexto econômico que vem se tornando cada dia mais relevante na sociedade. Da mesma forma como a preservação do meio ambiente é um fator importante no processo de tomada de decisão, levando em consideração os danos futuros, o retorno econômico vem como um fator limitante no desenvolvimento e viabilidade de implantação de alternativas biotecnológicas mais sustentáveis (BRASIL, 2015).

3.6 Indicadores econômicos

Em projetos onde existem diversos aspectos e variáveis, como no caso do investimento no setor energético, é necessário que haja uma análise detalhada de sua viabilidade econômico-financeira, se possível por uma equipe multidisciplinar, para analisar o negócio de forma sistêmica.

Os indicadores econômicos em um projeto tratam-se de medidas de desempenho que servirão para prever o desenvolvimento econômico do negócio. Seus estudos devem viabilizar que investidores, concessionários de empréstimos e outras partes interessadas tenham segurança no investimento e possam tomar decisões necessárias para a implementação e gestão do projeto (SILVA, 2001).

Para a análise econômica, é importante a elaboração de um fluxo de caixa. Neste fluxo, são contabilizadas todas as receitas e despesas previstas em um período de tempo pré-determinado. Neste fluxo devem estar presentes, além do investimento inicial, os custos de operação, capital de giro, imposto de renda, depreciação do valor de investimento, receita dos produtos e subprodutos, entre outros elementos. Através deste fluxo, é possível calcular os indicadores econômicos de uma proposta de projeto, como o *payback* e o TIR (taxa interna de retorno), que auxiliarão na tomada de decisão favorável ou não ao projeto.

Payback é a ferramenta utilizada para se determinar o tempo de retorno do investimento realizado dentro do fluxo de caixa, ou seja, quanto maior o *payback*, maior será o tempo para quitação do investimento realizado, o que impactará na decisão de concretização do projeto ou o estudo de rotas alternativas e de menores custos. O *Payback* ainda pode ser dado da forma simples ou descontada, sendo que neste último caso é considerado a mudança do valor do dinheiro no tempo, ou seja, o custo de capital da empresa.

A TIR é uma das ferramentas mais utilizadas no estudo de um investimento. Esta técnica iguala o valor presente do somatório das receitas líquidas futuras do fluxo de caixa ao valor do investimento. A TIR está diretamente relacionada com a TMA (taxa mínima de atratividade), que representa o retorno mínimo e de baixo risco exigido pelos investidores em um determinado projeto. Desta forma a TIR deve ser maior que a TMA para que os investidores decidam investir no negócio.

É importante ter em mente, durante os cálculos dos indicadores econômicos, as possíveis variações de mercado e a desvalorização do dinheiro no decorrer dos anos. Quanto mais fatores a serem considerados, mais seguro e preciso será o retorno do investimento (LUQUET, 2008).

3.7 Considerações Relevantes

É evidente que os biocombustíveis, tais como o etanol, vêm ganhando destaque na conjuntura atual, não só devido ao seu potencial energético, mas também como uma alternativa limpa à utilização de combustíveis fósseis e pelo enfoque ambiental devido à redução de GEE.

Neste contexto, o desenvolvimento tecnológico, econômico e ambiental é cada vez mais necessário, considerando que a cana-de-açúcar, matéria-prima da produção de etanol, pode também gerar uma série de subprodutos, principalmente se for associada à produção de etanol 2G. Além disso, a vinhaça, conhecida por ser um resíduo da fabricação do etanol de grande poder poluidor, apresenta também potencial para a produção de energia na forma de biogás.

O aumento da produtividade de etanol nas usinas por meio da produção de etanol 2G é uma opção com grande notabilidade atualmente. No entanto, a liberação do bagaço para esta finalidade ainda tem limitações no que diz respeito à demanda energética das usinas, que são dependentes do sistema de cogeração. Desta forma, torna-se necessário o estudo cuidadoso das diversas variáveis da produção de etanol e energia de acordo com fatores econômicos e ambientais, considerando também o potencial energético obtido pela biodigestão anaeróbia da vinhaça, que pode vir a ser uma alternativa para impulsionar a produção de etanol 2G por meio do incremento da cogeração.

4 METODOLOGIA

4.1 Modelo

O modelo proposto para este projeto foi desenvolvido no software Excel por meio de simulações estruturadas com uso da ferramenta Solver. O modelo foi baseado em um fluxograma simulado que permitiu a avaliação de dois cenários de distribuição de bagaço:

a) Cenário base: Bagaço direcionado apenas para a produção de energia (FIGURA 4.1);

b) Cenário otimizado: Bagaço destinado ao abastecimento da usina e à produção de etanol 2G, considerando que o biogás gerado na digestão anaeróbia da vinhaça 1G e 2G contribui para o abastecimento energético, liberando bagaço para a produção de etanol (FIGURA 4.2).

O modelo teve como principal objetivo permitir a análise da distribuição ótima de bagaço da produção de cana-de-açúcar em geração de energia térmica para o abastecimento da planta e em produção de etanol 2G, considerando a influência da biodigestão anaeróbia da vinhaça por meio do uso do biogás.

Para a implantação do modelo, seria empregada uma unidade de hidrólise anexa à refinaria, de modo que o etanol 1G e 2G seriam fermentados e destilados em conjunto. Para facilitar os cálculos, devido às poucas informações a respeito das características da vinhaça 1G/2G, essas correntes (vinhaça e etanol) foram calculadas separadamente no fluxograma.

A partir dos resultados obtidos foi possível discutir as implicações, vantagens e desvantagens das aplicações citadas.

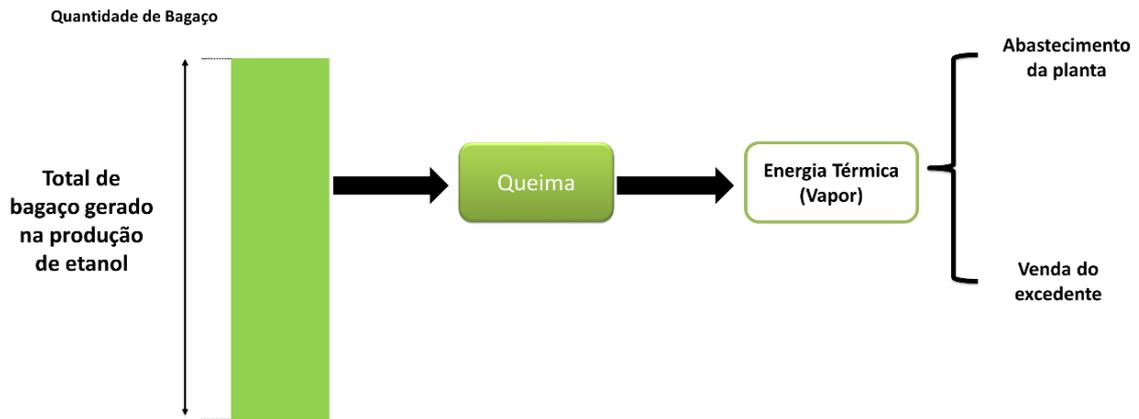


Figura 4.1 - Cenário base.
Fonte: Da autora.

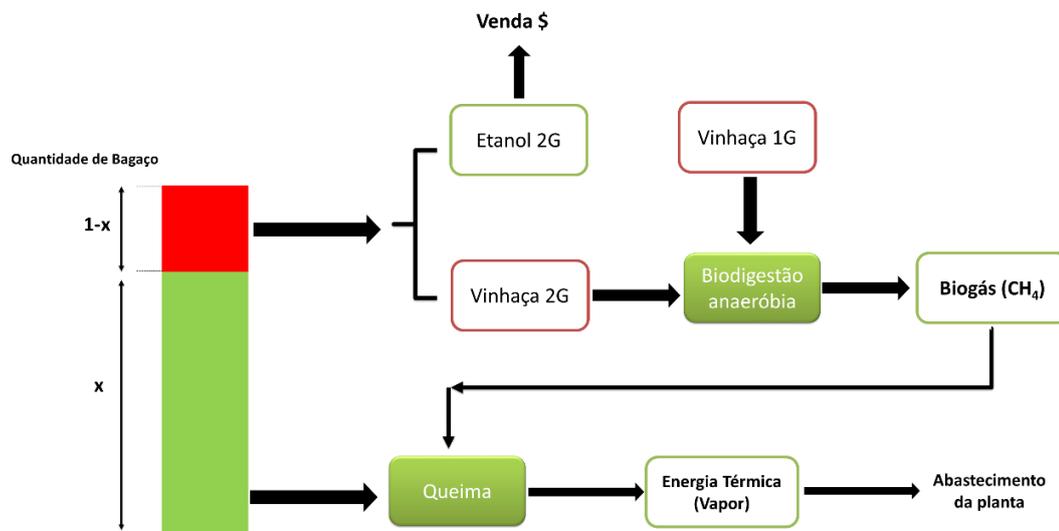


Figura 4.2 - Cenário otimizado.
Fonte: Da autora.

4.2 Levantamento de Dados

O processo de produção de etanol foi baseado em trabalhos que consideram a utilização do bagaço não só para cogeração de energia que abastece a planta, como também para a produção de etanol 2G. Foram analisados dados de biorrefinarias autônomas, ou seja, que produzem apenas etanol a partir de mosto simples (BNDES; CGEE, 2008; DIAS, 2011; LEITE; CORTEZ, 2013).

No caso da biodigestão anaeróbia de vinhaça, pesquisas que apontam não só sua viabilidade, mas também seus problemas e dificuldades serviram como pilares para a simulação e estudo dos cenários estipulados. Foram coletados dados do potencial energético do biogás produzido pelo tratamento biológico, para seu emprego no sistema energético da biorrefinaria (SOUZA et al. 1992; DIAS et al., 2012; FERRAZ JÚNIOR, 2013; MORAES et al., 2014). A Tabela 4.1 expressa os principais dados utilizados nas simulações, e que também serviram como base para os cálculos de novos parâmetros.

Devido aos poucos estudos realizados até o momento a respeito da vinhaça 2G, alguns dados foram estimados, como a eficiência de remoção de matéria orgânica e taxa de produção de CH₄ na biodigestão anaeróbia. Para isso, levaram-se em consideração as propriedades da vinhaça e da biodigestão 1G, bem como informações encontradas na literatura para encontrar um valor inicial aproximado da realidade. As implicações que a variação dos dados estimados pode inferir nos resultados finais deste trabalho também foram calculadas segundo o modelo proposto, resultando em um amplo cenário de possibilidades otimistas e pessimistas.

Tabela 4.1 - Dados utilizados nas simulações.

Parâmetro	Valor	Fonte
Quantidade de Bagaço 50% umidade (kg t⁻¹cana)	276,00	BNDES e CGEE, 2008
Produção de Etanol 1G (L t⁻¹cana)	81,80	Dias et al, 2012
Produção de Etanol 2G (L t⁻¹cana)	29,90	Dias et al, 2012
Volume de Vinhaça 1G (L Vinhaça L⁻¹ Etanol)	10,00	Moraes et al, 2014
Volume de Vinhaça 2G (L Vinhaça L⁻¹ Etanol)	10,00	Estimada
Demanda de Vapor (kg vapor t⁻¹cana)	551,00	Dias et al, 2012
Quantidade de vapor produzido pela queima de bagaço (kg t⁻¹ cana)	618,00	Dias et al, 2012
Período da safra de cana-de-açúcar (dias)	167,00	Moraes et al, 2014
Quantidade de cana processada (t cana safra⁻¹)	2,87 x 10 ⁶	Moraes et al, 2014
Taxa de produção de CH₄ através da vinhaça 1G (m³ kg⁻¹ DQO removida)	0,31	Ferraz Júnior, 2013
Taxa de produção de CH₄ através da vinhaça - 2G (m³ kg⁻¹ DQO removida)	0,29	Estimada
Quantidade de CH₄ no biogás (%)	60,00	Moraes et al, 2014
DQO 1G (kg m⁻³)	25,80	Ferraz Júnior, 2013
DQO 2G (kg m⁻³)	92,30	PCT,2012
Eficiência na remoção de DQO 1G	0,80	Ferraz Júnior, 2013
Eficiência na remoção de DQO 2G	0,60	Estimada
Vazão de vinhaça 1G por hora (m³ h⁻¹)	424,15	Moraes et al, 2014
Vazão de vinhaça 2G por hora (m³ h⁻¹)	149,20	Moraes et al, 2014
Bagaço da produção de etanol 2G recirculado para a caldeira (%)	66,00	Estimada
PCI do bagaço (kJ t⁻¹bagaço)	7,5 x 10 ⁶	Bomoni, 2012
PCI do CH₄ (kJ m⁻³)	35,8 x 10 ³	Moraes et al, 2014

Fonte: Da autora.

4.3 Plataforma de Simulações

Conforme o modelo proposto foram realizadas simulações com a ferramenta Solver do software Excel como mostra a Figura 4.3.

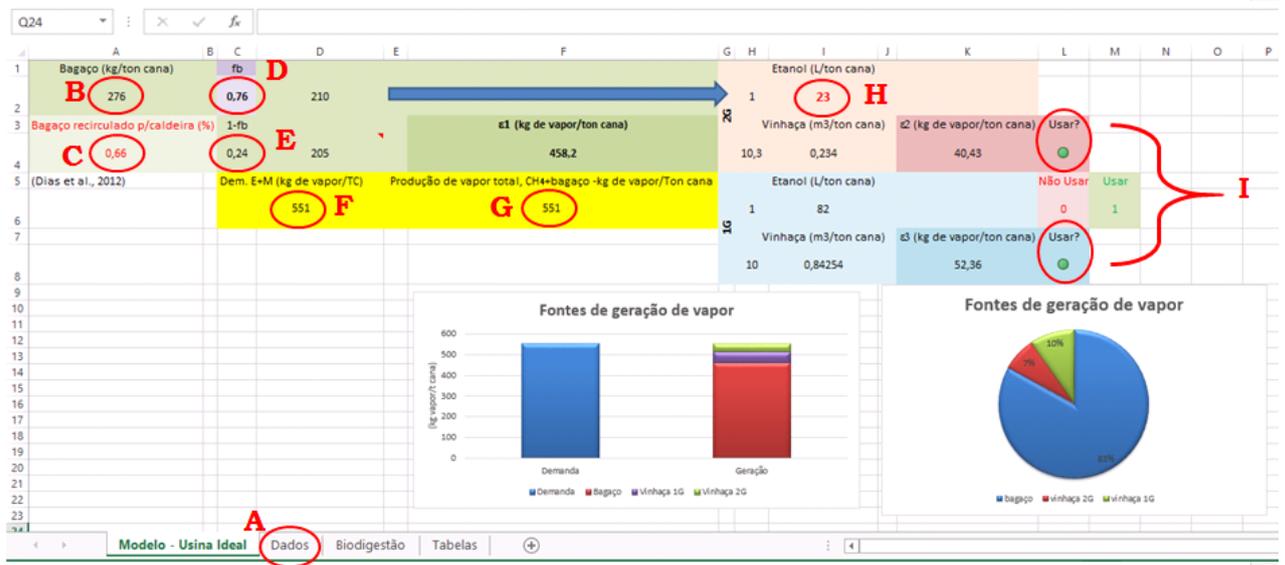


Figura 4.3 - Simulações realizadas em Excel.

Fonte: Da autora.

De acordo com a simulação ilustrada, tem-se:

- Local da planilha onde estão registrados os dados retirados da literatura;
- Dado de entrada: quantidade de bagaço (kg) equivalente a uma tonelada de cana-de-açúcar (276 kg). Desta forma, todos os resultados obtidos pela simulação foram em função de uma tonelada de cana-de-açúcar;
- Dado de entrada: quantidade de bagaço + palha (66%) recirculado do processo de produção de etanol 2G para a caldeira, contribuindo para a produção de vapor;
- Fração de bagaço direcionado para a produção de etanol 2G: esta célula é a variável do modelo, sendo determinada pela resolução do Solver (quanto de bagaço deve ser direcionado para cada segmento da biorrefinaria);

- E. Fração de bagaço direcionado para a produção de energia: esta célula é função da quantidade de bagaço direcionada para a produção de etanol 2G;
- F. Dado de entrada: demanda de energia da biorrefinaria para processar uma tonelada de cana-de-açúcar;
- G. Produção de vapor total (queima do bagaço + biodigestão anaeróbia 1G2G). Na ferramenta Solver, esta célula está condicionada a se igualar com a célula F, uma vez que a produção de vapor da usina visa somente o abastecimento da planta no caso do cenário otimizado, não devendo existir excesso. Assim, todo bagaço que não for utilizado para a produção de vapor (bagaço excedente) será direcionado para a produção de etanol;
- H. Quantidade (litros) de etanol 2G produzido. O objetivo estipulado para o Solver foi de maximizar esta célula, visando empregar a maior quantidade de bagaço possível na produção de biocombustível sem que haja falta de vapor para o abastecimento de unidade;
- I. Estes recursos possibilitam ativar ou desativar as células onde estão empregadas a produção de energia da biodigestão da vinhaça 1G e 2G para uso na biorrefinaria, permitindo a variação dos cenários e o estudo de sua influência.

4.4 Produção de energia através da biodigestão anaeróbia da vinhaça

Os cálculos da quantidade de energia térmica produzida através da queima do metano (CH₄), produto da biodigestão anaeróbia da vinhaça 1G e 2G, foram baseados nos estudos realizados por Moraes et al. (2014) e Bonomi et al. (2012). A quantidade de metano produzido na biodigestão dos dois tipos de vinhaça foi calculada segundo a Equação (4).

$$V_{CH_4} = \frac{\Omega_{CH_4} \cdot Q_V \cdot C_{DQOv} \cdot E_{DQOv}}{M_{cana}} \quad (4)$$

Nessa expressão, V_{CH_4} é a quantidade de metano produzida ($m^3 CH_4 t$ cana⁻¹) Ω_{ch_4} é a produção de CH_4 por DQO de vinhaça removida ($m^3 kg^{-1}$), Q_v é a vazão volumétrica da vinhaça ($m^3 h^{-1}$), C_{DQOv} é a DQO da vinhaça ($kg \cdot m^{-3}$), E_{DQOv} é a eficiência da remoção da DQO e M_{cana} é a produção de cana-de-açúcar ($t cana h^{-1}$). Cabe ressaltar de que todos os fatores da equação devem estar nas condições normais de temperatura e pressão (CNTP).

A comparação energética de metano e bagaço ($\xi_{bagaço} = t$ bagaço $m^{-3} CH_4$) foi feita em termos do poder calorífico inferior (PCI) de ambos (Equação 5).

$$\xi_{bagaço/CH_4} = \frac{PCI_{CH_4}}{PCI_{bagaço}}, \quad (5)$$

onde PCI_{CH_4} é o poder calorífico inferior do metano ($kJ \cdot m^{-3} CH_4$) e $PCI_{bagaço}$ é o poder calorífico inferior do bagaço ($kJ t$ bagaço⁻¹), ambos nas CNTP.

Através das equações (4) e (5), e utilizando a quantidade de vapor produzido pela queima do bagaço em caldeira à 65 bar, foi obtida a quantidade de vapor produzido pela queima do metano por tonelada de cana (Σ_{ch_4} , kg de vapor $\cdot t$ cana⁻¹), de acordo com a expressão (6).

$$\Sigma_{ch_4} = V_{CH_4} \cdot \xi_{bagaço/CH_4} \cdot P_{bagaço}. \quad (6)$$

Nesta expressão, $P_{bagaço}$ é a quantidade de vapor produzida através da queima do bagaço (kg vapor t bagaço⁻¹).

4.5 Indicadores ambientais

A avaliação ambiental realizada neste trabalho teve como indicadores o equivalente de poluição populacional (EP) e as emissões evitadas em termos de N_2O considerando os efeitos da biodigestão anaeróbia da vinhaça.

O EP foi determinado em termos da equivalência de potencial poluidor da vinhaça 1G e 2G gerada no cenário otimizado e uma população que produz

a mesma carga de poluição em termos de matéria orgânica (DQO). Para esta avaliação, foram adotados os seguintes parâmetros de acordo com Moraes et al. (2014):

- Carga de poluição em termos de geração de esgoto doméstico.
- Características físico-químicas do "esgoto médio".
- Vazões de esgoto sujeitas às mesmas variações relacionadas ao consumo de água pela população (CP_{agua}), corrigido pelo coeficiente de esgoto/retorno da água (c).

Para os parâmetros citados, de acordo com a referência, foram adotados os valores de $0,43 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ de DQO para o esgoto (C_{DQOe}), $83,13 \text{ m}^3\cdot(\text{habitante}\cdot\text{ano})^{-1}$ para CP_{agua} , $0,8$ para o coeficiente de esgoto/retorno da água (c). A produção de esgoto pela população (PP_{esgoto}) foi calculada de acordo com a Eq. (7). Considerando estes fatores, foi obtido o equivalente de poluição populacional através da Eq.(8).

$$PP_{\text{esgoto}} = C_{DQOe} \cdot CP_{\text{agua}} \cdot c ; \quad (7)$$

$$EP = \frac{(Q_v \cdot C_{DQO_v})}{PP_{\text{esgoto}}} . \quad (8)$$

O cálculo das emissões cumulativas de N_2O devido a aplicação de vinhaça *in natura* no solo também foi baseado em Moraes et al. (2014). Para este indicador assumiu-se que a que a vinhaça biodigerida assemelha-se ao fertilizante inorgânico, uma vez que a maior parte da matéria orgânica biodegradável é removida na digestão anaeróbia. Desta forma, considerou-se que a aplicação da vinhaça biodigerida no solo resultaria em emissões de N_2O semelhantes aos do adubo inorgânico.

De acordo com a literatura (CARMO et al., 2012), as emissões anuais de N_2O resultantes da aplicação de vinhaça *in natura* no solo para o cultivo da cana-planta (primeiro corte) e da cana-soca (cortes subsequentes) são, respectivamente, duas e três vezes maiores quando comparadas às emissões causadas pela aplicação de fertilizantes inorgânicos. A premissa deste trabalho é que com a redução da carga orgânica da vinhaça 1G pela

biodigestão anaeróbia, essas emissões tenham redução relevante, semelhantes às emissões do fertilizante inorgânico.

É importante ressaltar que a vinhaça 2G, devido ao seu baixo teor de nutrientes, não deve ser utilizada como fertilizante nas plantações de cana. Portanto, o cálculo de emissões evitadas não foi aplicado neste caso.

Assim, considerando o cenário otimizado, onde é aplicada a vinhaça 1G biodigerida para fertilização do solo ($m_{N_2O(inv)}$), a diferença anual nas emissões de N_2O por unidade de área com relação a aplicação do substrato orgânico in natura ($m_{N_2O(IF)}$) é dada pela média ponderada de área de cultivo, durante um corte de cana planta cana e quatro cortes de cana-soca, como mostrado na Eq. (9) (MORAES et al., 2014).

$$m_{N_2O} = \frac{1}{5} \cdot [(m_{N_2O(inv)_{area}} - m_{N_2O(IF)_{area}}) \cdot A]_{cana-planta} + \frac{4}{5} \cdot [(m_{N_2O(inv)_{area}} - m_{N_2O(IF)_{area}}) \cdot A]_{cana-soca} \quad (9)$$

Na equação acima, A representa a fração da área total onde houve aplicação de vinhaça biodigerida, onde foi adotada uma taxa de aplicação de vinhaça de $100 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$.

Ainda segundo estudo apresentado por Carmo et al. (2012), não houve diferenças significativas entre as emissões de CO_2 e CH_4 referentes à utilização de fertilizante inorgânico e com aplicação de vinhaça. Assim sendo, estas emissões não foram consideradas neste estudo.

Com objetivo de fornecer melhor interpretação dos resultados e possibilitar alguns cálculos de indicadores econômicos, as emissões foram convertidas em termos de toneladas de CO_2 equivalente ($tCO_{2(Eq)}$). Para isto, utilizou-se como base os valores mais recentes de Global Warming Potential (GWP) estipulados pelo IPCC (2015), sendo o GWP do N_2O igual a 310, para o horizonte de tempo de 100 anos.

4.6 Indicadores econômicos

A avaliação econômica proposta neste trabalho objetivou a comparação entre o valor agregado dos produtos obtidos com os cenários propostos,

considerando os preços de mercado atual e dos três anos anteriores. Os parâmetros calculados tiveram base nos trabalhos publicados pela Nova Cana (2015) e Moraes et al. (2014), além do levantamento de dados obtido pela BM&FBOVESPA (2015), ANEEL (2015) e CEPEA (2015).

Foram avaliados os custos de operação, investimento e retorno por venda de produto através dos resultados obtidos pelo modelo de cenário otimizado, considerando uma biorrefinarias autônoma com implementação de hidrólise para a produção de etanol de 2G e sistema de biodigestão anaeróbia da vinhaça integrada. Os resultados destas análises foram comparados com os mesmos resultados obtidos para o cenário base, que compreende uma biorrefinaria autônoma com queima total do bagaço.

Além disso, o valor de CO₂ evitado calculado pelos indicadores ambientais possibilitou os cálculos de créditos de carbono que podem render retorno financeiro para a biorrefinaria quando considerado a variação do preço por leilão realizado.

A análise econômica de forma mais aprofundada foi dada através dos cálculos de TIR (Eq. 10) e payback, obtidos por meio da construção de fluxo de caixa simples e ajustado, considerando a desvalorização monetária com o passar dos anos (Eq. 11).

$$TIR = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+TIR)^t} - FC_0, \quad (10)$$

onde:

TIR: Taxa interna de retorno;

FC_t : Receitas líquidas futuras;

FC_0 : Receitas líquidas presente;

i: TMA;

n: ano de ocorrência do fluxo.

$$VP = \frac{VF}{(1+i)^n}, \quad (11)$$

onde:

VP: Valor Presente;

VF: Valor Futuro.

As premissas adotadas para estes cálculos estão presentes na Tabela 4.2. Para o fluxo de caixa as receitas contabilizadas envolveram a venda de etanol 2G gerado pelo modelo e a comercialização dos créditos de carbono obtidos pela digestão da vinhaça a preço mínimo de leilão.

Tabela 4.2 – Premissas adotadas para a análise econômica.

Premissas adotadas	Valor
Capital de giro (%)	10,00
Depreciação anual (% ao ano)	10,00
IRPL+CSLL (%)	34,00
TMA (% ao ano)	12,00
Tempo de vida (anos)	30,00

Fonte: Da autora.

Quanto às despesas, além do valor inicial de investimento da implementação da unidade de hidrólise para a produção de etanol 2G em uma usina autônoma e da unidade de biodigestão da vinhaça (TABELA 4.3.), ainda foram considerados todos os custos de operacionais anuais envolvidos nestes processos (NOVA CANA, 2015; MORAES et al., 2014). Para corrigir fatores de escala na produção e deixar os dados de investimento mais fiéis à realidade foi utilizado um expoente de 0,6. A taxa de conversão para o dólar americano utilizada foi de US\$ 0,33 e para o Euro foi de €\$0,29 por real brasileiro, considerando a data de 11/04/2015.

Tabela 4.3 - Investimentos iniciais para a implantação da unidade de hidrólise e digestão da vinhaça.

Investimentos	
Investimento na implantação da hidrólise (NOVA CANA, 2015)	R\$ 124.000.000,00
Investimento na biodigestão anaeróbia da vinhaça (MORAES et al., 2014)	R\$ 26.313.702,86
Total	R\$ 150.313.702,86

Fonte: Da autora.

5. RESULTADOS

5.1 Rendimento energético da biodigestão anaeróbia da vinhaça

A partir do principal produto da biodigestão anaeróbia da vinhaça 1G2G, biogás composto por 60% de CH₄ neste estudo, obteve-se, através da queima, energia térmica na forma de vapor. Desta forma, o objetivo foi poupar bagaço, que ao invés de ser utilizado totalmente para cogeração, foi parcialmente direcionado para a produção de etanol 2G. Por meio da equivalência energética em termos de vapor, foi calculado que cada metro cúbico de metano queimado equivale à geração de vapor proveniente da queima de $4,8 \times 10^{-3}$ toneladas de bagaço.

Através das equações (1), (2) e (3) e os dados da Tabela 5.1, foram calculados a quantidade de metano produzida, os potenciais energéticos do metano em relação à quantidade de cana utilizada, o volume tratado de vinhaça 1G2G e a porcentagem de bagaço liberado da queima, considerando uma pressão de 2,5 bar. Os resultados estão apresentados pela Tabela 5.1.

Tabela 5.1- Resultados referentes à produção de metano e vapor.

	Vinhaça 1G2G
Volume de metano gerado por volume de vinhaça (m³ m⁻³ vinhaça)	21,84
Volume de metano gerado por tonelada de cana (m³t⁻¹ cana)	9,82
Quantidade de bagaço liberado para a produção de etanol (t bagaço m⁻³ vinhaça)	0,1
Quantidade de bagaço liberado para a produção de etanol (t bagaço t⁻¹ cana)	0,05
Quantidade de vapor produzido (kg m⁻³ vinhaça)	234,76
Quantidade de vapor produzido (kg t⁻¹ cana)	105,52
Bagaço liberado para a produção de etanol (%)	17,1

Fonte: Da autora.

Cabe ressaltar que os resultados obtidos podem ser significativamente alterados de acordo com a eficiência e rendimento da produção de metano da biodigestão anaeróbia da vinhaça 2G, que ainda não foi elucidada, não sendo encontrados trabalhos na literatura a respeito. Considerando uma usina integrada 1G2G e os parâmetros de processo supracitados, foi possível liberar um total de 17,1% de bagaço através da utilização de metano produzido pela biodigestão anaeróbia.

Dos 307,19 kg de vapor produzido por volume de vinhaça, 230,15 kg foram gerados pela biodigestão da vinhaça 2G, enquanto apenas 77,04 kg foram provenientes da biodigestão da vinhaça 1G. Isso ocorre devido à característica DQO elevada da vinhaça 2G, como já tratado anteriormente. No entanto, esse valor ainda é uma suposição com base em valores estimados da literatura, já que não há valores experimentais para este tipo de efluente.

Apesar da biodigestão da vinhaça 2G produzir maior quantidade de metano, é importante salientar que o volume de vinhaça 1G gerado, no caso deste trabalho e com a tecnologia atual, foi maior devido à quantidade de etanol produzido por tonelada de cana, como é tratado no item a seguir. Sendo assim, a diferença entre as quantidades de vapor gerado pela vinhaça de etanol 1G e 2G no modelo foram semelhantes.

5.2 Produção de etanol 2G e distribuição de bagaço

De acordo com os fluxogramas propostos para este trabalho, os dados obtidos através da biodigestão anaeróbia da vinhaça e as informações coletadas na literatura, foi possível estabelecer um modelo passível de resolução pelo Solver que visou maximizar a produção de etanol 2G. Para isso, variou-se a quantidade de bagaço direcionada para este fim e para a geração de energia. Desta forma, foi possível avaliar não só a quantidade de etanol 2G produzido com o excedente do bagaço, mas também quando empregado no sistema, a energia gerada pela biodigestão anaeróbia das vinhaças 1G2G, que resultou em uma maior disponibilidade de matéria-prima para a produção de combustível. É importante mencionar que este método visa a autossuficiência de vapor da planta, ou seja, a energia produzida será suficiente apenas para abastecer a unidade produtora de etanol. A Tabela 5.2 apresenta os resultados obtidos por este método.

Tabela 5.2 - Volume de etanol 2G e distribuição de bagaços obtidos pelo Solver.

Produção de etanol e consumo de bagaço	Valor
Bagaço direcionado para a produção de etanol 2G considerando a biodigestão anaeróbia da vinhaça (%)	76,00
Bagaço direcionado para a produção de etanol 2G desconsiderando a biodigestão anaeróbia da vinhaça (%)	32,00
Volume de etanol 2G produzido considerando a biodigestão anaeróbia da vinhaça (L t⁻¹ cana)	23,00
Volume de etanol 2G produzido desconsiderando a biodigestão anaeróbia da vinhaça (L t⁻¹ cana)	10,00

Fonte: Da autora.

Conforme citado anteriormente, estima-se que 53% do total de bagaço utilizado para a produção de etanol 2G volta para o processo de cogeração de vapor (valor em equivalente energético). Com a suplementação de palha na cogeração, considerando cerca 13% de recolhimento de palha, o bagaço equivalente em termos energéticos que retorna para a cogeração atinge cerca de 66%. Desta forma, temos que, com o bagaço excedente da produção de energia para o abastecimento da usina, desconsiderando a biodigestão anaeróbia da vinhaça, é possível produzir até 10 litros de etanol 2G por tonelada de cana. Estes valores podem ainda ser acrescidos considerando a possibilidade do maior aproveitamento da palha na cogeração de energia.

Os resultados da simulação mostraram que a utilização da biodigestão anaeróbia das vinhaças 1G2G em uma usina integrada possibilitou a produção de 23 litros de etanol 2G por tonelada de cana, ou seja, a produção deste combustível foi acrescida em 13 L t⁻¹cana, 130% a mais em relação à produção de etanol 2G sem a integração com o tratamento biológico das vinhaças, mantendo a autossuficiência energética da planta. Considerando o processamento de 2,0 x 10⁶ de toneladas de cana em uma safra, a produção anual de etanol 2G chegaria a 4,60 x 10⁷ litros, valor equivalente a quase 30% da produção anual de etanol 1G em uma usina de mesma capacidade, apresentada por Moraes et al., 2014.

Sabendo que a demanda energética considerada foi de 551 kg de vapor por tonelada de cana, obteve-se que a principal fonte de abastecimento da biorrefinaria 1G2G ainda é o bagaço, fornecendo 452 kg vapor t⁻¹cana, contra 52,36 kg vapor t⁻¹cana da vinhaça 1G e 40,43 kg vapor t⁻¹cana da

vinhaça 2G. Desta forma, em uma planta integrada de etanol 1G2G pode-se gerar cerca de 72,8 kg vapor t^{-1} cana para acrescer o abastecimento energético, ou seja, 16,84% do total da demanda. O gráfico da Figura 5.1 mostra esta relação de fontes de vapor.

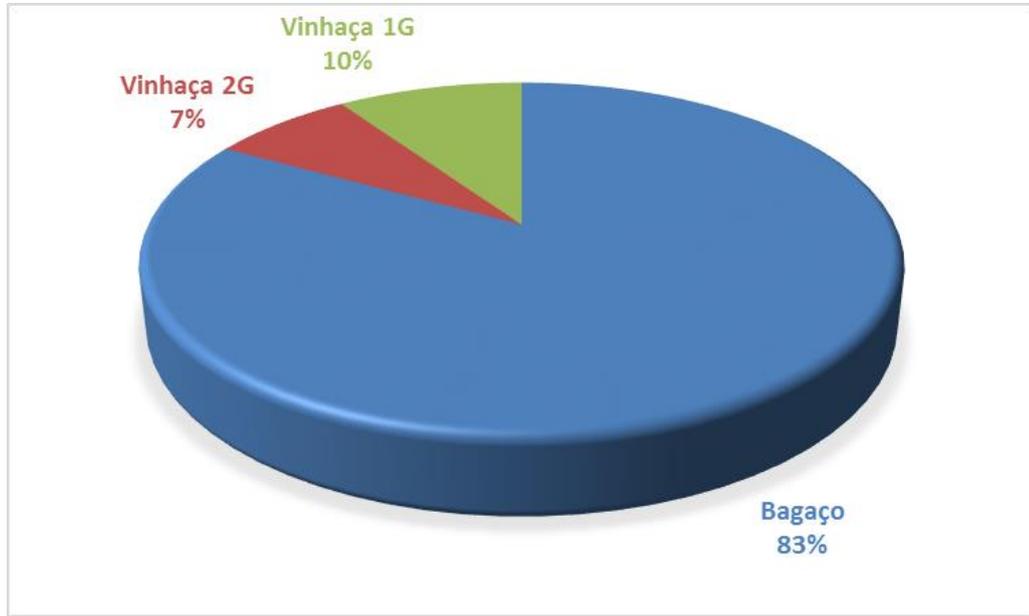


Figura 5.1 - Fontes de vapor para atender a demanda da planta.
Fonte: Da autora.

O aumento da produção de etanol a partir da utilização de biomassa lignocelulósica associada à biodigestão anaeróbia da vinhaça, também traria benefícios com relação à questão da ocupação de terras recobertas por vegetação ou destinada à produção de alimentos. Segundo Dias (2012) o processamento de $2,0 \times 10^6$ toneladas de cana produz um total de $1,64 \times 10^8$ litros de etanol 1G. Admitindo que esta quantidade de cana é produzida em uma área de $2,35 \times 10^4$ hectares no período de uma safra, obtemos um rendimento de $6,97 \times 10^3$ L ha^{-1} . Sendo assim, os $4,6 \times 10^7$ L t^{-1} cana de etanol 2G obtidos pelo modelo, cuja eficiência da biodigestão anaeróbia era de 60%, corresponderiam à ocupação de uma área de $6,6 \times 10^3$ ha. Em suma, segundo o cenário otimizado, seria possível aumentar em até 28% a produção por safra de etanol sem a necessidade da ocupação de novas terras, evitando o desmatamento de áreas florestadas e possibilitando o aproveitamento de terras para a produção de alimentos.

5.3 Indicadores ambientais

5.3.1 Equivalente Populacional

O estudo do equivalente de poluição populacional aponta que a aplicação anual de vinhaça 1G *in natura* diretamente no solo, no caso de uma biorrefinaria autônoma que processa $2,87 \times 10^6$ t cana ano⁻¹, conforme descrito na metodologia, gera uma poluição equivalente a cerca de $1,5 \times 10^6$ habitantes, população aproximada da cidade de Porto Alegre (IBGE, 2015). No caso da vinhaça 2G, o EP é ainda maior: em um ano, a poluição gerada é equivalente a $2,0 \times 10^6$ habitantes, população aproximada da cidade de Manaus (FIGURA 5.2). Essa diferença se deve ao maior teor orgânico da vinhaça 2G e seu menor teor de nutrientes, motivo pelo qual esse substrato não é comumente utilizado como fertilizante. O descarte inadequado deste resíduo sem prévio tratamento, considerando seu alto valor de EP, pode causar sérios danos ambientais, como já citados na revisão da literatura.

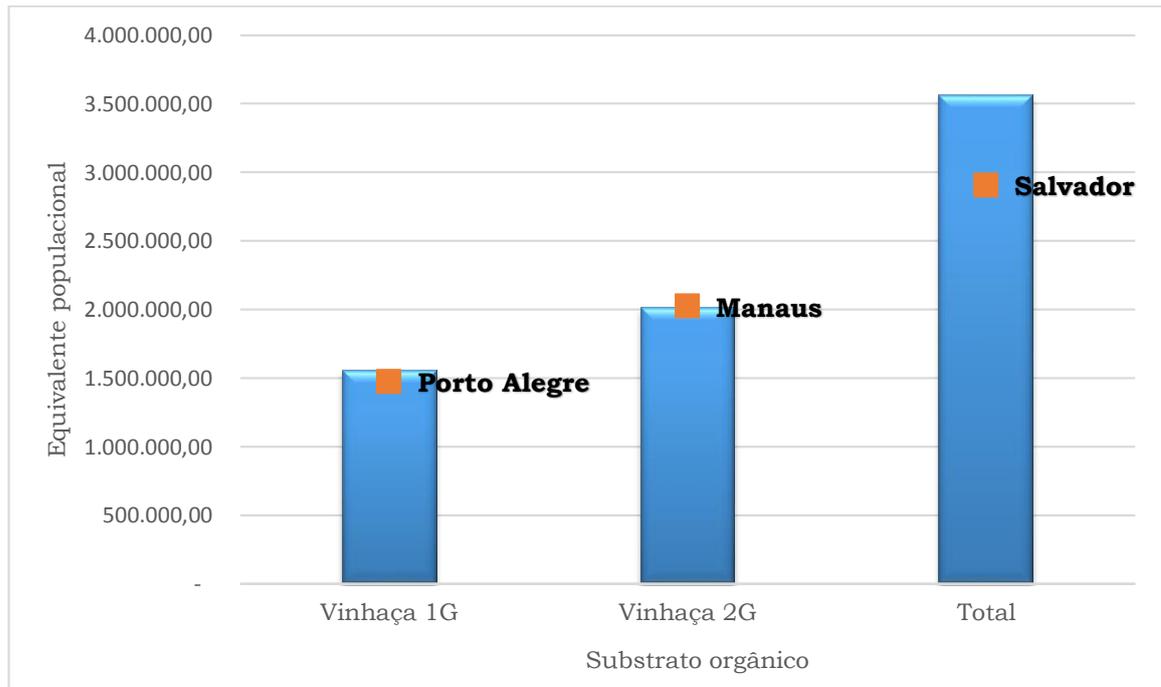


Figura 5.2 - Equivalente de poluição populacional das vinhaças 1G e 2G comparado com a população de grandes cidades brasileiras.

Fonte: Da autora.

Considerando a poluição anual total dos dois tipos de vinhaça, no caso de uma única usina integrada 1G2G, o EP chega a aproximadamente $3,6 \times$

10⁶ habitantes, valor superior à população de Salvador, 3^a maior cidade brasileira.

Os resultados alcançados neste item elucidaram a importância ambiental do tratamento biológico da vinhaça para redução de sua carga orgânica, uma vez que seu potencial poluidor, considerando as variáveis adotadas neste estudo, alcança altos níveis a serem equiparados com a poluição gerada por grandes cidades brasileiras.

5.3.2 Emissões de N₂O evitadas

As emissões de N₂O calculadas, bem como seu correspondente em tCO_{2(Eq)}, consideraram apenas a vinhaça 1G, ressaltando que a vinhaça 2G não é adequada para uso como fertilizante. Desta forma, considerando uma taxa de aplicação de vinhaça de 100 m³ ha⁻¹, que cobre 72% da área total de plantio, foi obtido um total de 1,07 x 10⁵ kg N₂O safra⁻¹ emitidos pela fertirrigação com vinhaça *in natura*, o que corresponde a emissões anuais de 66.10³ tCO_{2(Eq)} safra⁻¹. Considerando a redução da carga orgânica da vinhaça pela biodigestão anaeróbia, e que as emissões provenientes da aplicação da vinhaça biodigerida se assemelhariam às emissões de fertilizante inorgânico, as emissões anuais de N₂O evitadas corresponderiam a 33.10³ tCO_{2eq} (Tabela 5.3).

Em termos comparativos, se cada brasileiro é responsável por 7,8 t CO₂ anuais (LEITE, 2014), as emissões evitadas pela biodigestão anaeróbia da vinhaça em uma usina autônoma com capacidade de processamento anual de 2 x 10⁶ toneladas de cana correspondem a uma população de 4.246 habitantes.

Tabela 5.3 - Emissões de N₂O evitadas.

Dados da aplicação na cultura (BVC,2014)		
Volume total de vinhaça	1,70 x 10 ⁶	m ³ ano ⁻¹
Quantidade de cana processada	2,00 x 10 ⁶	t cana safra ⁻¹
Produtividade	85,00	t cana ha ⁻¹
Área total de cana	2,35 x 10 ⁴	ha safra ⁻¹
Taxa de aplicação de vinhaça	100,00	m ³ ha ⁻¹
Área com vinhaça	1,70 x 10 ⁴	ha
Fração da área com vinhaça	72	%
Emissões evitadas (Carmo et al., 2012)		
Cana-planta + fertilizante inorgânico	2,00 x 10 ³	gN ₂ O-N (ha safra) ⁻¹
Cana-planta + fertilizante inorgânico + vinhaça	4,00 x 10 ³	gN ₂ O-N (ha safra) ⁻¹
Cana-soca + fertilizante inorgânico	4,50 x 10 ³	gN ₂ O-N (ha safra) ⁻¹
Cana-soca + fertilizante inorgânico + vinhaça	9,00 x 10 ³	gN ₂ O-N (ha safra) ⁻¹
Emissões evitadas calculadas [1/5 cana-planta + 4/5 cana-soca]		
Emissões evitadas por área (N)	4,00 x 10 ³	gN ₂ O-N (ha safra) ⁻¹
Emissões evitadas (N)	6,80 x 10 ⁴	kgN ₂ O-N safra ⁻¹
Emissões evitadas (N₂O)	1,07 x 10 ⁵	kg N ₂ O safra ⁻¹
Emissões evitadas (anual)	-33.10³	tCO₂(Eq) safra⁻¹

Fonte: Da autora.

5.4 Indicadores econômicos

De acordo com os resultados obtidos pelo modelo, tem-se que para o cenário otimizado, onde direciona-se 76% do bagaço para cogeração e realiza-se a biodigestão anaeróbia das vinhaças 1G2G, podem ser gerados, sem comprometer a autossuficiência de vapor da planta, 23 litros de etanol 2G por tonelada de cana. Considerando um preço de venda do etanol anidro até o dia 15/04/2015 de 1,26 R\$ L⁻¹etanol, segundo CEPEA (2015), o cenário resulta em um acréscimo em sua produção de até 29,01 R\$ t⁻¹ cana.

No caso do cenário base, comumente utilizado nos dias atuais, temos que a planta produz, além de sua demanda, 67 kg de vapor por tonelada de cana para ser vendido na forma de energia. De acordo com Bosco (2014), esta quantidade de vapor equivale à 8,67 kWh t⁻¹ cana. Admitindo um preço de venda de energia de 0,29 R\$ kWh⁻¹ (Aneel – vigente até o dia 03/07/2015) a usina poderia receber até 3,22 R\$ t cana⁻¹, quando o excesso energético de bagaço é destinado a venda de energia elétrica, ou seja, o produto final

proveniente do excedente de bagaço é a energia elétrica. No caso do cenário otimizado, no qual o produto final do excedente de bagaço consiste no etanol 2G, seria possível obter um ganho de até 29,01 R\$ t cana⁻¹, fazendo a comparação somente em termos dos produtos finais provenientes do uso do bagaço para cada cenário. Vale ressaltar que tal comparação não considera os custos embutidos para obtenção dos produtos, sendo considerados apenas os valores de venda. No entanto, pode-se observar que o cenário otimizado permite um uso mais nobre do bagaço excedente, de forma que maior valor pode ser agregado ao mesmo. A comparação dos cenários de acordo com a economia atual e dos três anos anteriores pode ser observada pela Tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Comparação dos cenários quanto ao valor agregado do produto final.

Ano	Cenário Base - Venda de energia* (R\$ t⁻¹cana)	Cenário Otimizado - Venda de etanol 2G* (R\$ t⁻¹cana)	Diferença (R\$ t⁻¹cana)
2015	2,52	29,01	26,50
2014	2,52	33,47	30,96
2013	2,08	27,97	25,89
2012	2,53	27,80	25,28

*média anual

Fonte: Da autora.

Sendo assim, considerando os modelos analisados e os produtos finais provenientes do bagaço em cada cenário, para que os ganhos com a venda de energia sejam equivalentes aos ganhos da venda de etanol 2G, seu preço de venda deveria ser aproximadamente 165% maior que o preço do biocombustível.

Segundo artigo da Nova Cana (2015), o custo operacional para a implementação de hidrólise enzimática em uma usina autônoma, até 2015, é de 1,53 R\$/L etanol considerando uma produção anual de $2,52 \times 10^7$ L de etanol 2G. Aplicando este valor na produção anual de etanol 2G obtida pela simulação do cenário otimizado, igual a $4,60 \times 10^7$ L, juntamente com um expoente de escalonamento de 0,6, no caso de aumento de produtividade sem a necessidade do acréscimo de aparelhos e mão-de-obra, é obtido um

custo de operação anual igual a R\$ 55 milhões. O ganho anual com a venda deste biocombustível, considerando os preços de venda citados, é de R\$ 58 milhões, ou seja, com a tecnologia de hidrólise existente até o momento, o lucro anual obtido pela biorrefinaria com o etanol 2G seria de apenas cerca de R\$ 2,7 milhões. No entanto, segundo o artigo, a melhoria de tecnologia para a produção de etanol 2G prevista para até 2025, como por exemplo, o desenvolvimento de enzimas mais produtivas e um processo de pré-tratamento do bagaço mais eficiente, impactarão fortemente na redução dos custos de produção, onde será possível, com os mesmos dados de simulação, obter um lucro anual de até R\$ 28,0 milhões, 10 vezes maior do que o obtido com a tecnologia atual. A Tabela 5.5 resume estes resultados.

Tabela 6 – Ganhos e custos anuais do cenário otimizado.

	2015	2025
Produção anual total de etanol 2G (R\$ ano⁻¹)	58.024.400,00	
Custo operacional etanol 2G (R\$ L⁻¹)	1,53	0,72
Custo operacional etanol 2G - considerando o fator 0,6 (R\$ ano⁻¹)	55.347.659,28	29.940.015,47
Lucro do etanol 2G (R\$ ano⁻¹)	2.676.740,72	28.084.384,53

Fonte: Da autora.

Outra fonte de renda possível no cenário otimizado é a venda de créditos de carbono. Como já discutido, a implantação da biodigestão anaeróbia das vinhaças 1G e 2G poderiam evitar a emissão de até 33.125,71 t CO₂/safra. De acordo com o ultimo edital da BM&FBOVESPA (2015) para o leilão de créditos de carbono, o preço mínimo de venda era de 9,23 R\$ t⁻¹ CO₂. Neste caso, o mínimo obtido com as vendas de crédito de carbono seria cerca de 305 mil R\$ safra⁻¹.

Considerando o custo de operação da biodigestão anaeróbia 1G2G igual a 0,74 R\$ m⁻³, de acordo com Moraes et al.(2014) e admitindo o fator de correção de 0,6 pelo aumento de escala, o custo anual total da operação é de R\$ 1,5 milhões. Assim, a venda dos créditos de carbono ao preço mínimo possibilitaria cobrir 20,14% dos custos (FIGURA 5.3). Em um cenário cujo leilão de créditos atinja o valor de 45,83 R\$ t⁻¹CO₂, seria possível cobrir inteiramente os custos de operação empregados na biodigestão anaeróbia.

Devido à instabilidade do mercado de créditos de carbono e a importância ambiental decorrente dos benefícios da biodigestão anaeróbia, torna-se importante a existência de políticas públicas e legislações voltadas para o setor sucroalcooleiro. Com a ausência de apoio político e governamental para os aspectos ambientais, a viabilidade da biodigestão pode estar comprometida.

No caso do cenário base, os custos de operação de produção de etanol 2G e biodigestão anaeróbia são inexistentes. Além disso, o sistema de cogeração de energia elétrica deve estar presente em ambos os cenários, tanto para a queima de bagaço quanto para a queima de metano, de forma que os custos desta operação não serão contabilizados para a comparação dos mesmos. Sendo assim, anualmente, a venda de energia excedente na forma de vapor pode gerar uma receita de até aproximadamente R\$ 6,5 milhões. Desta forma, o cenário base apresenta-se mais viável economicamente se considerarmos a tecnologia atual para produção de etanol 2G, apenas comparando-se os preços dos produtos finais de cada cenário.

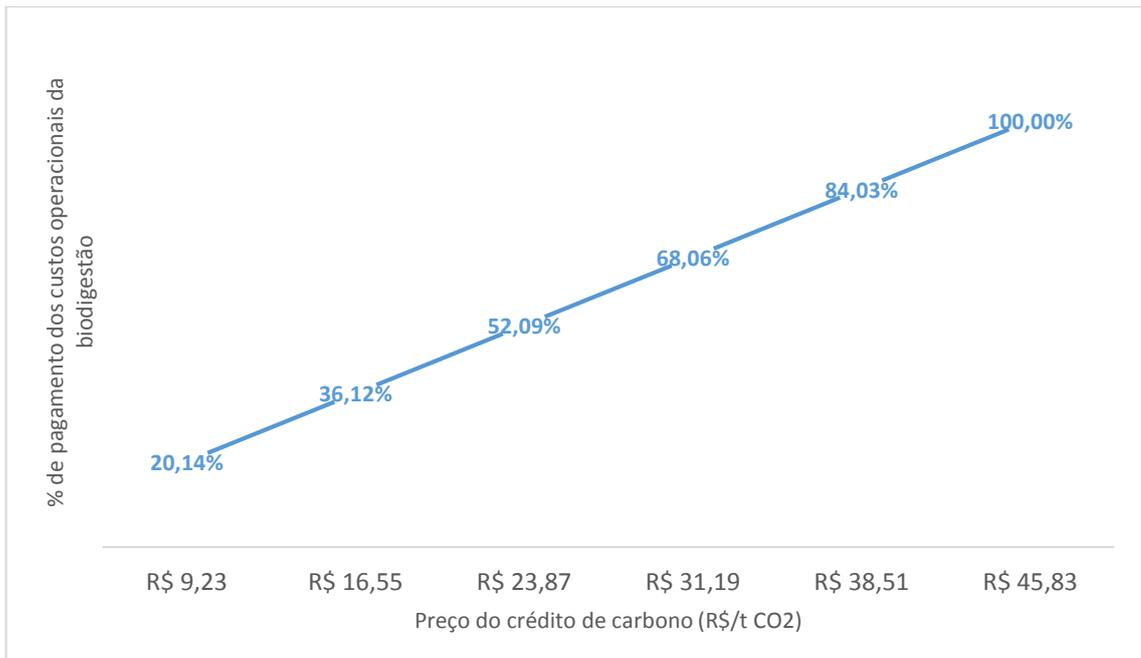


Figura 5.3 - Relação entre o preço de créditos de carbono e os custos da biodigestão anaeróbia de vinhaça 1G2G.

Fonte: Da autora.

As Tabelas 5.6 e 5.7 ilustram os fluxos de caixa construídos para uma análise econômica mais aprofundada do cenário otimizado. No primeiro, foi considerado o ano inicial (ano 0) em 2015, onde estão vigentes as tecnologias atuais de alto custo e, apenas após 10 anos (2025), são contabilizadas as melhorias tecnológicas previstas segundo estudo realizado pela Nova Cana (2015), como já mencionado anteriormente. No segundo, foi estudada a influência destas novas tecnologias no rendimento do projeto, de modo que o ano inicial contabilizado foi o de 2025, onde os custos de investimento e operação são menores.

Tabela 5.5 - Fluxo de caixa considerando as tecnologias atuais (2015).

Ano	Fluxo de caixa anual líquido (payback simples)	Lucro acumulado (payback simples)	Fluxo de caixa anual líquido (payback descontado)	Lucro acumulado (payback descontado)
0	-R\$ 82.672.537	-R\$ 82.672.537	-R\$ 82.672.537	-R\$ 82.672.537
1	-R\$ 82.672.537	-R\$ 165.345.073	-R\$ 73.814.765	-R\$ 156.487.301
2	R\$ 23.608.679	-R\$ 141.736.394	R\$ 18.820.694	-R\$ 137.666.607
3	R\$ 23.608.679	-R\$ 118.127.715	R\$ 16.804.191	-R\$ 120.862.416
4	R\$ 23.608.679	-R\$ 94.519.037	R\$ 15.003.742	-R\$ 105.858.674
5	R\$ 23.608.679	-R\$ 70.910.358	R\$ 13.396.198	-R\$ 92.462.475
6	R\$ 23.608.679	-R\$ 47.301.679	R\$ 11.960.891	-R\$ 80.501.584
7	R\$ 23.608.679	-R\$ 23.693.000	R\$ 10.679.367	-R\$ 69.822.216
8	R\$ 23.608.679	-R\$ 84.321	R\$ 9.535.149	-R\$ 60.287.067
9	R\$ 23.608.679	R\$ 23.524.358	R\$ 8.513.526	-R\$ 51.773.541
10	R\$ 23.608.679	R\$ 47.133.037	R\$ 7.601.363	-R\$ 44.172.178
11	R\$ 23.608.679	R\$ 70.741.716	R\$ 6.786.931	-R\$ 37.385.247
12	R\$ 18.498.013	R\$ 89.239.729	R\$ 4.747.979	-R\$ 32.637.268
13	R\$ 18.498.013	R\$ 107.737.742	R\$ 4.239.267	-R\$ 28.398.000
14	R\$ 18.498.013	R\$ 126.235.755	R\$ 3.785.060	-R\$ 24.612.941
15	R\$ 18.498.013	R\$ 144.733.768	R\$ 3.379.518	-R\$ 21.233.423
16	R\$ 18.498.013	R\$ 163.231.781	R\$ 3.017.427	-R\$ 18.215.996
17	R\$ 18.498.013	R\$ 181.729.794	R\$ 2.694.131	-R\$ 15.521.865
18	R\$ 18.498.013	R\$ 200.227.807	R\$ 2.405.474	-R\$ 13.116.391
19	R\$ 18.498.013	R\$ 218.725.820	R\$ 2.147.745	-R\$ 10.968.646
20	R\$ 18.498.013	R\$ 237.223.833	R\$ 1.917.629	-R\$ 9.051.017
21	R\$ 18.498.013	R\$ 255.721.846	R\$ 1.712.169	-R\$ 7.338.848
22	R\$ 18.498.013	R\$ 274.219.858	R\$ 1.528.722	-R\$ 5.810.126
23	R\$ 18.498.013	R\$ 292.717.871	R\$ 1.364.931	-R\$ 4.445.196
24	R\$ 18.498.013	R\$ 311.215.884	R\$ 1.218.688	-R\$ 3.226.508
25	R\$ 18.498.013	R\$ 329.713.897	R\$ 1.088.114	-R\$ 2.138.393
26	R\$ 18.498.013	R\$ 348.211.910	R\$ 971.531	-R\$ 1.166.863
27	R\$ 18.498.013	R\$ 366.709.923	R\$ 867.438	-R\$ 299.425
28	R\$ 18.498.013	R\$ 385.207.936	R\$ 774.498	R\$ 475.074
29	R\$ 18.498.013	R\$ 385.207.936	R\$ 691.516	R\$ 1.166.590
30	R\$ 18.498.013	R\$ 403.705.949	R\$ 617.425	R\$ 1.784.015
31	R\$ 33.529.383	R\$ 437.235.333	R\$ 999.233	R\$ 2.783.248

Fonte: Da autora.

Tabela 5.6 - Fluxo de caixa considerando apenas as tecnologias de baixo custo (2025).

Ano	Fluxo de caixa anual líquido (payback simples)	Lucro acumulado (payback simples)	Fluxo de caixa anual líquido (payback	Lucro acumulado (payback descontado)
0	-R\$ 82.672.537	-R\$ 82.672.537	-R\$ 82.672.537	-R\$ 82.672.537
1	-R\$ 82.672.537	-R\$ 165.345.073	-R\$ 73.814.765	-R\$ 156.487.301
2	R\$ 2.619.649	-R\$ 162.725.425	R\$ 2.088.368	-R\$ 154.398.934
3	R\$ 2.619.649	-R\$ 160.105.776	R\$ 1.864.614	-R\$ 152.534.319
4	R\$ 2.619.649	-R\$ 157.486.127	R\$ 1.664.834	-R\$ 150.869.485
5	R\$ 2.619.649	-R\$ 154.866.479	R\$ 1.486.459	-R\$ 149.383.026
6	R\$ 2.619.649	-R\$ 152.246.830	R\$ 1.327.196	-R\$ 148.055.831
7	R\$ 2.619.649	-R\$ 149.627.182	R\$ 1.184.996	-R\$ 146.870.835
8	R\$ 2.619.649	-R\$ 147.007.533	R\$ 1.058.032	-R\$ 145.812.803
9	R\$ 2.619.649	-R\$ 144.387.884	R\$ 944.672	-R\$ 144.868.131
10	R\$ 2.619.649	-R\$ 141.768.236	R\$ 843.457	-R\$ 144.024.675
11	R\$ 2.619.649	-R\$ 139.148.587	R\$ 753.086	-R\$ 143.271.588
12	R\$ 18.498.013	-R\$ 120.650.574	R\$ 4.747.979	-R\$ 138.523.609
13	R\$ 18.498.013	-R\$ 102.152.561	R\$ 4.239.267	-R\$ 134.284.342
14	R\$ 18.498.013	-R\$ 83.654.548	R\$ 3.785.060	-R\$ 130.499.282
15	R\$ 18.498.013	-R\$ 65.156.535	R\$ 3.379.518	-R\$ 127.119.764
16	R\$ 18.498.013	-R\$ 46.658.522	R\$ 3.017.427	-R\$ 124.102.337
17	R\$ 18.498.013	-R\$ 28.160.509	R\$ 2.694.131	-R\$ 121.408.207
18	R\$ 18.498.013	-R\$ 9.662.496	R\$ 2.405.474	-R\$ 119.002.733
19	R\$ 18.498.013	R\$ 8.835.517	R\$ 2.147.745	-R\$ 116.854.988
20	R\$ 18.498.013	R\$ 27.333.530	R\$ 1.917.629	-R\$ 114.937.359
21	R\$ 18.498.013	R\$ 45.831.543	R\$ 1.712.169	-R\$ 113.225.190
22	R\$ 18.498.013	R\$ 64.329.556	R\$ 1.528.722	-R\$ 111.696.468
23	R\$ 18.498.013	R\$ 82.827.569	R\$ 1.364.931	-R\$ 110.331.537
24	R\$ 18.498.013	R\$ 101.325.582	R\$ 1.218.688	-R\$ 109.112.849
25	R\$ 18.498.013	R\$ 119.823.594	R\$ 1.088.114	-R\$ 108.024.735
26	R\$ 18.498.013	R\$ 138.321.607	R\$ 971.531	-R\$ 107.053.204
27	R\$ 18.498.013	R\$ 156.819.620	R\$ 867.438	-R\$ 106.185.766
28	R\$ 18.498.013	R\$ 175.317.633	R\$ 774.498	-R\$ 105.411.268
29	R\$ 18.498.013	R\$ 175.317.633	R\$ 691.516	-R\$ 104.719.751
30	R\$ 18.498.013	R\$ 193.815.646	R\$ 617.425	-R\$ 104.102.326
31	R\$ 33.529.383	R\$ 227.345.030	R\$ 999.233	-R\$ 103.103.093

Fonte: Da autora.

O payback descontado, considerando a desvalorização monetária, no fluxo de caixa a partir de 2015, não é constatado no período de vida do projeto, estipulado em 30 anos, o que mostra que o investimento não é pago completamente neste período de tempo e o projeto é inviabilizado. Mesmo se analisarmos o payback simples, o investimento só trará retorno após 18 anos e meio, período consideravelmente longo e que traria riscos ao negócio. No caso do modelo estudado, a digestão anaeróbia da vinhaça estaria inserida em um contexto puramente ambiental, já que com as tecnologias vigentes na atualidade não seria capaz de trazer lucro em um período de tempo aceitável. Além disso, a TIR deste cenário foi de 4,9, muito abaixo da TMA estipulada (12%), o que reafirma a inviabilidade do projeto (TABELA 5.8).

Tabela 5.7 - Resultados de payback e TIR dos fluxos de caixa estudados.

A partir de 2015	
payback simples	18 anos e 6 meses
payback descontado	-
TIR	4,9%
A partir de 2025	
payback simples	8 anos
payback descontado	27 anos e 4 meses
TIR	12,2%

Fonte: Da autora.

No caso da utilização apenas da tecnologia prevista para 2025, o investimento só traria bons resultados segundo avaliação por payback simples, que indica a quitação do valor do investimento em 8 anos. Já no caso do payback descontado, o investimento traria retorno dentro do tempo de seu tempo de vida, porém só após 27 anos e 4 meses. Apesar disso, o TIR encontrado é ligeiramente maior do que a TMA adotada, indicando que o projeto ainda assim pode ser viabilizado, apesar do alto risco.

É importante salientar que nas receitas contabilizadas para a elaboração dos fluxos de caixa foi considerado que os créditos de carbono foram vendidos a preço mínimo do leilão, uma vez que este mercado é incerto. Em um panorama onde os créditos de carbono possam custear a operação do setor de biodigestão, é possível acrescer o TIR, no caso da tecnologia a partir de 2025, em 0,1%.

Apesar dos resultados desanimadores com relação à análise econômica deste modelo, a implantação da digestão anaeróbia da vinhaça, principalmente no caso da vinhaça 2G que não apresenta potencial para a utilização como fertilizante, é um recurso a ser considerado tendo em vista a gravidade dos impactos ambientais causados por estes resíduos e a potencialidade de seu emprego em alternativas mais rentáveis economicamente.

O panorama estabelecido pelo melhoramento das tecnologias até 2025 mostra a necessidade do investimento em pesquisas no setor, tanto na

produção de etanol 2G como do tratamento biológico da vinhaça. As novas rotas de produção, equipamentos e métodos para a produção de enzimas possuem potencial para a drástica redução dos custos empregados nesta alternativa, não só viabilizando o setor econômico, mas também trazendo diversos benefícios nas áreas ambientais e sociais.

5.5 Influência da variação dos dados de entrada

Como mencionado anteriormente, devido aos poucos resultados conclusivos a respeito da biodigestão anaeróbia da vinhaça 2G, os cálculos deste trabalho foram baseados em uma estimativa de eficiência de 60% de remoção de matéria orgânica (medida em DQO). Além disso, embora a eficiência da digestão da vinhaça 1G mais próxima da realidade atual seja de aproximadamente 80%, como adotado neste trabalho, estudos recentes utilizando diferentes configurações de biorreatores têm mostrado que é possível se obter até 90% de remoção da matéria orgânica para este resíduo (FERRAZ JÚNIOR, 2013). De tal modo, os efeitos do desempenho da biodigestão na produção tanto do etanol 1G como 2G são impactantes, sobretudo considerando o modelo estudado.

Por exemplo, em um cenário cuja apenas a eficiência da biodigestão anaeróbia da vinhaça 2G varie, de acordo com a Figura 5.4, uma baixa eficiência de remoção, de 30%, pode resultar em um total de 19 litros de etanol por tonelada de cana processada. Já para uma alta eficiência, onde o desenvolvimento da tecnologia alcance 90% da remoção de carga orgânica da vinhaça 2G, a produção de etanol, segundo o modelo idealizado, seria de 27 litros por tonelada de cana processada. Neste caso, a produção anual de etanol 2G, com capacidade de processamento de $2,0 \times 10^6$ toneladas de cana, alcançaria $5,4 \times 10^7$ litros, ou seja, aproximadamente 17% a mais do que com a eficiência estipulada neste trabalho.

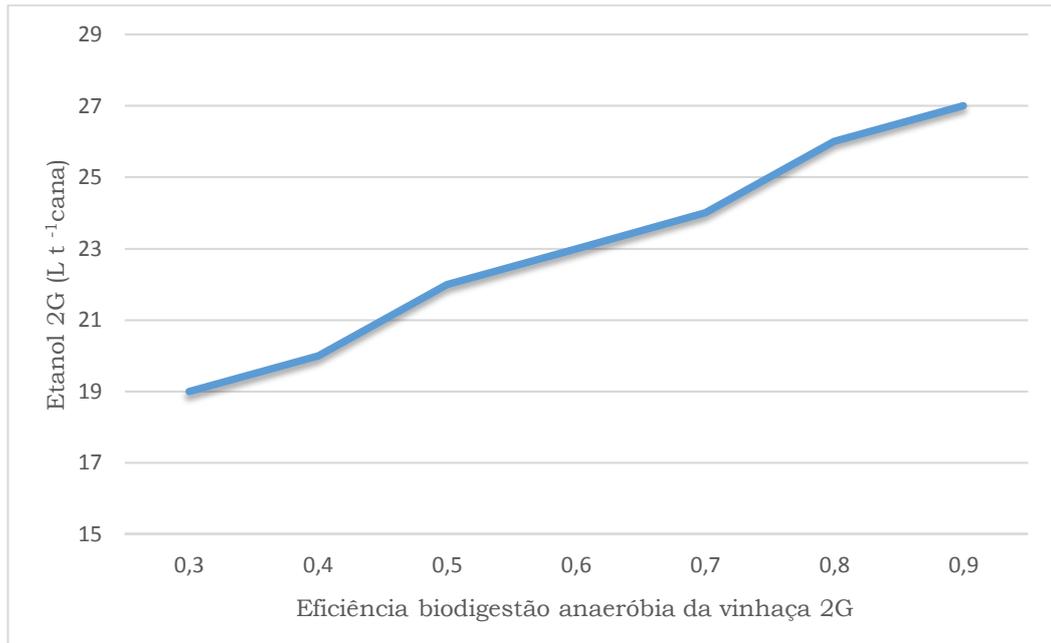


Figura 5.4 – Relação da eficiência da biodigestão anaeróbia da vinhaça 2G com a produção de etanol 2G.

Fonte: Da autora.

Além da eficiência da remoção de DQO, a quantidade de vinhaça gerada no caso do etanol 2G, que ainda é pouco elucidada, também possui um papel de grande influência sobre os resultados do modelo. Considerando que a etapa adicional de hidrólise necessária para a produção do etanol 2G seja responsável pela menor concentração do mosto a ser fermentado, é possível inferir que a vinhaça 2G seja produzida em maior volume do que a vinhaça 1G.

Considerando os diversos fatores consistentes que podem afetar os resultados obtidos pelo modelo proposto, a Tabela 5.9 apresenta os resultados de um cenário com padrões mais otimizados relacionados ao rendimento da biodigestão anaeróbia e sua influência nos parâmetros analisados. Para isso, foram consideradas eficiências na biodigestão das vinhaças 1G e 2G de, respectivamente, 90 e 80%, além da vazão de vinhaça 2G igual a 15 litros por volume de etanol.

Tabela 5.9 - Resultados do modelo a partir de dados de entrada otimizados.

Dados de entrada	Efi ciência biodigestão 1G 90% Efi ciência biodigestão 2G 80% Vinhaça 2G: 15 L vinhaça L ⁻² etanol
Rendimento energético da biodigestão anaeróbia da vinhaça	
Volume de metano gerado por tonelada de cana (m ³ t ⁻¹ cana)	28,58
Quantidade de vapor produzido (kg t ⁻¹ cana)	168,13
Bagaço substituído (%)	27,21
Produção de etanol 2G e distribuição de bagaço	
Bagaço direcionado para a produção de etanol considerando a biodigestão anaeróbia da vinhaça (%)	100,00
Volume de etanol produzido considerando a biodigestão anaeróbia da vinhaça (L t ⁻¹ cana)	30,00
Indicadores ambientais	
Equivalente Populacional Total - Vinhaça 1G2G (habitantes)	4.483.136,88
Indicadores econômicos	
Lucro anual etanol 2G (2015) (R\$)	10.770.457,56
Lucro anual etanol 2G (2025) (R\$)	40.569.372,03
payback ajustado a partir de 2015 (anos)	-
payback ajustado a partir de 2025 (anos)	11,00
TIR a partir de 2015 (%)	8,60
TIR a partir de 2025 (%)	17,10

Fonte: Da autora.

Os resultados obtidos pelo Solver mostram que é possível, nas condições estipuladas, converter 100% do bagaço em etanol 2G, utilizando como fonte de energia, para abastecer a unidade, somente o biogás gerado pela biodigestão anaeróbia das vinhaças, juntamente com a queima de 62% do bagaço equivalente (em termos energéticos) utilizado na produção de etanol 2G, conforme adotado nos cenários avaliados. Desta forma, a produção de etanol 2G alcançaria 30 litros por tonelada de cana, acrescentando também o rendimento econômico do investimento. Cabe mencionar que o valor do bagaço equivalente pode ainda gerar energia térmica excedente, como pode ser observado pela Figura 5.5, que pode ainda ser exportada para a rede pública gerando valor econômico. Alternativas para aumentar o valor energético dos “inputs” das caldeiras são de extrema importância para aprimorar a produção de etanol 2G, como por exemplo suplementar a cogeração com palha recolhida do campo.

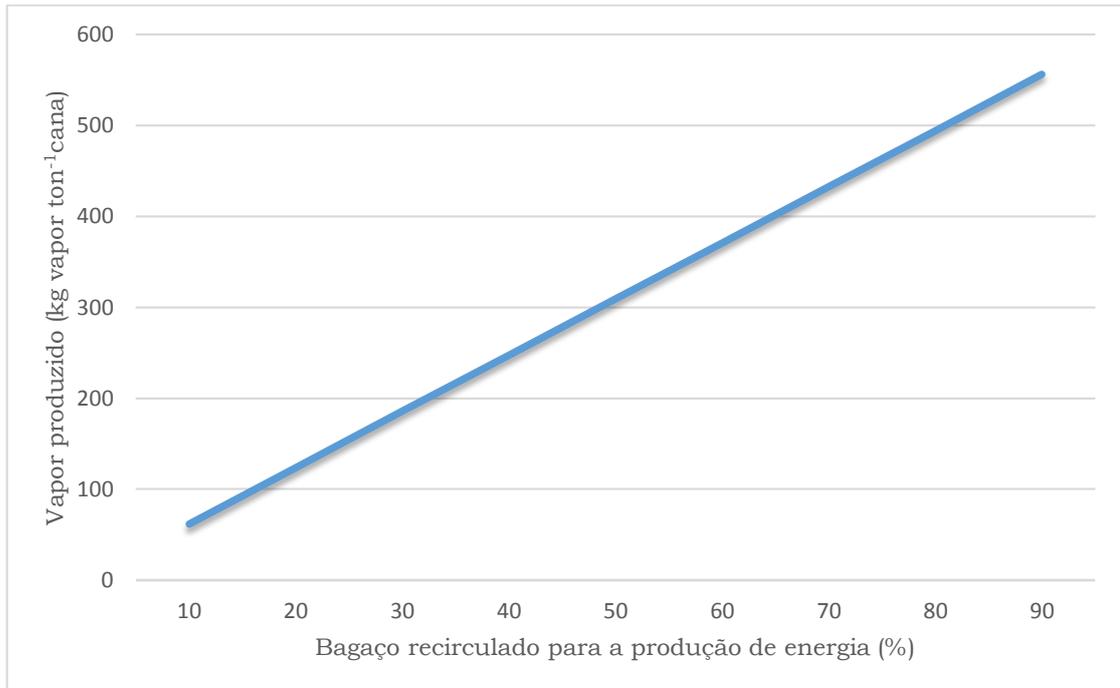


Figura 5.5 - Relação da quantidade de energia térmica com a quantidade de bagaço equivalente.

Fonte: Da autora.

O aumento do volume de vinhaça reflete proporcionalmente nos resultados do equivalente de poluição populacional, onde a poluição anual gerada chega a atingir o equivalente de uma população de quase 4500 habitantes. No caso das emissões de N₂O evitadas, os resultados obtidos permanecem os mesmos dos obtidos com os dados de entrada iniciais, uma vez que apenas a vinhaça 1G é aplicada no solo e é utilizado como comparação um fertilizante inorgânico.

Os efeitos da alteração dos valores de entrada do modelo são ainda mais significantes quanto aos indicadores ambientais. O lucro anual obtido com a venda do etanol 2G, considerando a tecnologia de 2015, é quase cinco vezes maior do que com os valores obtidos neste estudo no cenário otimizado. A perspectiva para o ano de 2025 fica ainda melhor, na qual o lucro anual chega a atingir mais de 40,5 milhões R\$ ano⁻¹. Além disso, a TIR para esta perspectiva passa a ser mais favorável, atingindo 17% e possibilitando a aprovação deste investimento.

Assim como exemplificado nesta seção, o desenvolvimento dos estudos no setor e aprimoramento das técnicas de biodigestão e produção de etanol

2G possibilitaria obter melhores resultados na produção com menores custos, de forma a aumentar sua rentabilidade econômica e seus benefícios ambientais.

Por fim, a criação de políticas públicas com maior foco nas questões ambientais no setor sucroalcooleiro é essencial para a viabilização das tecnologias propostas. Maiores incentivos governamentais voltados para a redução dos impactos ambientais relacionados à destinação dos resíduos gerados durante a produção de etanol refletiriam na necessidade de alternativas sustentáveis, o que contribuiria para o melhoramento e expansão das tecnologias limpas, como a produção de biogás.

6. CONCLUSÕES

Através dos resultados apresentados neste trabalho foi possível concluir que:

- É possível obter, segundo as simulações do cenário otimizado, até 23 L t⁻¹cana de etanol 2G através da utilização de 76% do bagaço disponível, sem comprometer a autossuficiência de vapor da planta;
- A economia atual permite que a venda de etanol 2G no cenário otimizado gere até R\$ 2,7 milhões de receita, enquanto no cenário base a receita com a venda de energia excedente seria de até R\$ 6,5 milhões.
- Com o aprimoramento da tecnologia na produção de etanol 2G até 2025, o cenário otimizado poderia ter sua receita acrescida em até 10 vezes, o que também auxiliaria na questão dos altos investimentos envolvidos nesta alternativa que inviabiliza sua implementação;
- A vinhaça 1G2G apresentou equivalente de poluição populacional superior à população de Salvador, terceira maior cidade brasileira. Com a biodigestão anaeróbia da vinhaça, a carga orgânica deste resíduo seria reduzida, podendo ser redirecionado para a venda de fertilizantes de forma a reduzir a poluição de corpos hídricos, além de poupar a emissão de até 33.125,71 tCO_{2(Eq)} para a atmosfera.
- Apesar de o cenário base ser amplamente utilizado pela indústria do etanol e apresentar um menor custo de implementação, o cenário otimizado traz uma alternativa para um melhor aproveitamento energético de importância tanto econômica quanto ambiental.
- A viabilidade da implementação da biodigestão anaeróbia está diretamente relacionada com a criação de políticas públicas ambientais, que incentivem o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis.

7. TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, sugere-se a pesquisa a respeito das diferentes propriedades da vinhaça 2G, ainda pouco estudada, bem como o estudo da biodigestão anaeróbia do resíduo 1G2G. Além disso, é importante uma análise detalhada das melhorias a serem implementadas nas tecnologias de produção de etanol 2G e da biodigestão anaeróbia da vinhaça.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Tarifas residenciais vigentes.** 2015. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=493>>. Acesso em: 23 jan. 2015.

_____. **Usinas UTE em operação no Brasil.**

Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicações/capacidadebrasil.asp>>. Acesso em 08 maio 2015.

ALCARDE, A.R. **Processamento da cana-de-açúcar.** Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa. 2007, Brasília, DF.

BONOMI, Antonio et al. **The Virtual Sugarcane Biorefinery (VSB).**

Campinas: CNPEM e CTBE, 2012. 124 p.

BOSCO, João Henrique. **Energia produzida a partir do bagaço da cana-de-açúcar ainda é pouco utilizada no país.** 2014. Disponível em:

<<http://www.canalrural.com.br/noticias/agricultura/energia-produzida-partir-bagaco-cana-de-acucar-ainda-pouco-utilizada-pais-32595>>. Acesso em: 20 dez. 2014.

BM&FBOVESPA; (Brasil) (Org.). **Leilões de Crédito de Carbono.** Disponível em: <<http://www.bmfbovespa.com.br/consulta-leiloes>>. Acesso em: 02 maio 2015.

BNDES E CGEE. (Org.). **Bioetanol de cana-de-açúcar: energia para o desenvolvimento sustentável.** Rio de Janeiro: Bndes, 2008. 316 p.

BRASIL. CETESB. **Gases do efeito estufa.** Disponível em:

<<http://www.cetesb.sp.gov.br/mudancas-climaticas/proclima/>>. Acesso em: 17 jun. 2015.

BRASIL. INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE. **Mitigação de gases do efeito estufa e mudanças climáticas.** Disponível em:

<<http://www.energiaeambiente.org.br/index.php/conteudo/13>>. Acesso em: 19 maio 2015.

BRASIL. LABORATÓRIO NACIONAL CIÊNCIA TECNOLOGIA BIOETANOL (CTBE). **Divisão de Avaliação Integrada de Biorrefinarias.** 2013.

Disponível em: <<http://ctbe.cnpem.br/pesquisa/avaliacao-integrada-biorefinarias/>>. Acesso em: 22 maio 2014.

CARMO, Janaina Braga do et al. Infield greenhouse gas emissions from sugarcane soils in Brazil: effects from synthetic and organic fertilizer application and crop trash accumulation. **Gcb Bioenergy**, v. 5, n. 3, p.267-280, 27 jul. 2012. Wiley-Blackwell. DOI: 10.1111/j.1757-1707.2012.01199.x.

CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA. **Indicador Semanal Etanol Anidro**. CEPEA/ESALQ Estado de São Paulo. 2015. Disponível em: <<http://cepea.esalq.usp.br/etanol/>>. Acesso em: 23 jan. 2015.

DANTAS FILHO, P.L. **Análise de custos na geração de energia com bagaço de cana-de-açúcar**: um estudo de caso em quatro usinas de São Paulo, 2009, 175p. Dissertação de mestrado – Programa de Pós-Graduação em Energia. Universidade de São Paulo

DIAS, M.O.S. et al. Second generation ethanol in Brazil: Can it compete with electricity production?. **Bioresource Technology**, v. 102, p.8964-8971, 13 jul. 2011.

_____. Improving second generation ethanol production through optimization of first generation production process from sugarcane. **Bioresource Technology**, Campinas, v. 43, p.246-252, 2012.

DRABER, Katia Maria Mandu. **Etanol de segunda geração já é realidade**. 2013. 55 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Bioquímica, Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo. Lorena, 2013.

DUARTE, J. C.; LOURENÇO, V.; RIVEIRO, B. **Continuous culture of flocculent yeast for ethanol production**. Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação, Biotechnology Department, Portugal, 2006.

FERRAZ JÚNIOR, A. D.N. **Digestão anaeróbia da vinhaça da cana de açúcar em reator acidogênico de leito fixo seguido de reator metanogênico de manta de lodo**. 2013. 164 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

FIGUEIREDO E.B., LA SCALA N. Greenhouse gas balance due to the conversion of sugarcane areas from burned to green harvest in Brazil. **Agric Ecosyst Environ**, n. 141 p.77–85, 2011.

GAMBOA, Elda Espanã et al. Vinasses: characterization and treatments. **Waste Management & Research**, São Paulo, v. 12, n. 29, p.1235-1250, 17 jan. 2011. Disponível em: <<http://wmr.sagepub.com/content/29/12/1235>>. Acesso em: 07 jan. 2014.

GRANATO, E. F. **Geração de Energia Elétrica pela Biodigestão Anaeróbica da Vinhaça**. Bauru, 2003. 130p. Dissertação (Mestra em Engenharia) – Faculdade de Engenharia, Campus de Bauru, Universidade Estadual Paulista.

HARADA, H. et al. Anaerobic treatment of a recalcitrant distillery wastewater by a thermophilic uasb reactor. **Bioresource Technology**, v. 55, p.215-221, dez. 1995.

HOEFNAGELS R. et al. Greenhouse gas footprints of different biofuel production systems. **Renew Sustain Energy Ver.** v. 7, n. 14, p.1661–1694, 2010.

HOWARD, R. L., ABOTSI, E., JANSEN VAN RENSBURG, E. L., HOWARD, S. **Lignocellulose biotechnology**: issues of bioconversion and enzyme production. *African Journal of Biotechnology*, 2:602-619, 2003.

HSU, T. Pretreatment of biomass. In: **Handbook on bioethanol production and utilization**. Wyman, C. F. (Ed.), Taylor & Francis, Bristol, 179-195.1996.

IBGE. **Senso 2014**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 02 maio 2015.

IPCC, Intergovernmental Panel On Climate Change. **Working Group III: Mitigation**. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch>>. Acesso em: 02 maio 2015.

LAIME, E. M. O. et al. Possibilidades tecnológicas para a destinação da vinhaça: uma revisão. **Revista Trópica: Ciências Agrárias e Biológicas**, v. 5, n. 3, p.1-16, 2011.

LEITE, R.C.; CORTEZ, A.B. **O etanol combustível no Brasil**. 2004 Disponível em <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/etanol3_000g7gq2cz702wx5ok0wtedt3xdrmfk.pdf> Acesso em: 03 nov. 2013

LEITE, M. **Emissões de carbono do Brasil**. Folha de São Paulo. São Paulo, p. 11-18. Nov. 2014. Disponível em: <<http://www1.folha.uol.com.br/ambiente/>>. Acesso em: 02 maio 2015.

LEITE, R.C.C; LEAL, M.R.L.V.O Biocombustível no Brasil. **Novos Estudos** v. 78 pp. 15-21, 2007.

LUQUET, Mara. **Guia Valor Econômico de Finanças Pessoais**. São Paulo: Globo, 2008.

MACEDO I.C. et al. Green house gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: the 2005/2006 averages and a prediction for 2020. **Biomass Bioenergy**, n.32, p.582–595, 2008.

MORAES, B. S. et al. Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane biorefineries in Brazil from energy, environmental, and economic perspectives: Profit or expense? **Applied Energy**, n. 113, p.825-835, 2014.

NOVA CANA (Brasil). Implantação da hidrólise nas usinas de etanol e açúcar. 2015. Disponível em: <www.novacana.com_usina_implantacao-hidrolise-usinas-etan.pdf>. Acesso em: 22 abr. 2015.

NOGUEIRA, L. H. **Biodigestão: A Alternativa Energética**. Editora Nobel, São Paulo, 1986.

NYKO, D. et al. A corrida tecnológica pelos biocombustíveis de segunda geração: uma perspectiva comparada. Bndes Setorial, Brasil, n. 32, p.5-48, set. 2010.

OLIVEIRA, F. F. et al. Produção do etanol de segunda geração a partir do bagaço da cana-deaçúcar. In: VII ENCONTRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO AGROINDUSTRIAL, 2013. Produção do etanol de segunda geração a partir do bagaço da cana-deaçúcar.

PREVITALI, Noemi Rafaela. **Uso de vinhaça para fertirrigação**. 2011. 62 f. TCC (Graduação) - Curso de Tecnologia em Biocombustíveis, Faculdade de Tecnologia de Araçatuba, Araçatuba, 2011.

PINTO, Cláudio Plaza. **Tecnologia da Digestão Anaeróbia da Vinhaça e Desenvolvimento Sustentável**. 1999. 162 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Planejamento de Sistemas Energéticos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.

PCT (Brasil). Petrobrás. Claudia Julia Silveira; Lidia Maria Mello Santa Anna; Aline Machado de Castro. PROCESSO PARA PRODUÇÃO DE GASES ENERGÉTICOS A PARTIR DE CORRENTES OBTIDAS DE MATERIAIS LIGNOCELULÓSICOS. BR n° WO 2012/003556 A1, 14 dez. 2010, 12 jan. 2012.

PETROBRAS. **ETANOL**. Disponível em:

<<http://www.br.com.br/wps/portal/portalconteudo/produtos/automotivos/etanol>>. Acesso em: 26 nov. 2014.

_____. Claudia Julia Gruposos Silveira; Lidia Maria Mello Santa Anna; Aline Machado de Castro. **Processo para produção de gases energéticos a partir de correntes obtidas de materiais lignocelulósicos**. BR n° WO 2012/003556 A1, 05 jul. 2010, 12 jan. 2012.

RANATUNGA T.D., Jervis J., Helm R.F., McMillan J.D., Hatzis C. Toxicity of hardwood extractives toward *Saccharomyces cerevisiae* glucose fermentation, **Biotechnol. Lett.**, 19(11), 1125-1127, 1997.

ROSA, S. S. da; GARCIA, J. L. F. O etanol de segunda geração: limites e oportunidades. **Revista do BNDES**, n. 32, p. 119-150, dez. 2009.

SAINT-EXUPERY, Antoine de. **O Pequeno Príncipe**. Agir, 1952.

SOUZA, M.e. et al. Thermophilic anaerobic digestion of vinasse in pilot plant UASB reactor. **Wat. Sci. Tech.**, v. 25, n. 7, p.213-222, 1992.

SCHIRIM, O. Metano – Aproveitamento em Usinas de Alcool – ASA

Consultoria S/C LTDA – São Paulo, 1991.

SEABRA, J. E. A. Análise de opções tecnológicas para uso integral da biomassa no setor de cana-de-açúcar e suas implicações. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, 2008 (Tese de Doutorado).

SILVA, Carlos Arthur Barbosa da. **Uma Introdução à Preparação e Avaliação de Projetos Agroindustriais**: Parte II: Análise Financeira. Universidade Federal de Viçosa, 2001.

SOUZA, R. M. **Estimativa do Potencial Brasileiro de Produção de Biogás através da Biodigestão da Vinhaça e Comparação com outros Energéticos**. Trabalho apresentado no IX Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Porto Seguro – Ba, 2000.

SUN, Y., CHENG, J. Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review. *Bioresource Technology*, 83: 1-11, 2002.

UNICA – União da Indústria de Cana-de-Açúcar. **Produção e Uso do Etanol Combustível no Brasil**: respostas às questões mais frequentes. São Paulo: UNICA, 2007. 70 p. Disponível em: <http://www.ie.ufrj.br/infosucro/biblioteca/bic_Unica_ProducaoUsoEtanol.pdf>. Acesso em: 03 nov. 2014.

_____. **Área plantada com cana-de-açúcar**. Disponível em: <<http://www.unicadata.com.br/historico-de-area-ibge.php?idMn=33&tipoHistorico=5&acao=visualizar&idTabela=1522&produto=%C3%81rea+Plantada&anoIni=2011&anoFim=2012&estado=RS%2CSC%2CPR%2CSP%2CRJ%2CMG%2CES%2CMS%2CMT%2CGO%2CDF>>. Acesso em: 03 nov. 2014.

WALTER A. et al. Sustainability assessment of bio-ethanol production in Brazil considering land use change, GHG emissions and socio-economic aspects. **Energy Policy**. doi: 10.1016/j.enpol.2010.07.043, 2011.

WALTER, A. **Potential of electricity Production from Sugarcane Residues**. In: Luis Augusto Barbosa Cortez (Org.). *Sugarcane Bioethanol: R&D for productivity and sustainability*. 1st ed. São Paulo, SP - Brasil: Editora Blucher, 1, 577-582, 2010.