

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**Produção integrada de bioetanol de cana-de-açúcar  
de primeira e segunda geração:  
Análises energética, ambiental e econômica**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

José Vitor Pereira Miguel

Nº USP: 6446137

Orientador:

Prof. Marcelo Zaiat

2013



José Vitor Pereira Miguel

**Produção integrada de bioetanol de cana-de-açúcar  
de primeira e segunda geração:  
Análises energética, ambiental e econômica**

**Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado junto ao departamento de  
Engenharia de Produção da Escola de  
Engenharia de São Carlos como parte dos  
requisitos para obtenção do título de Engenheiro  
de Produção Mecânico.**

Orientador: Prof. Marcelo Zaiat

São Carlos

2013



# DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a todos aqueles que investem seu tempo e trabalho em direção à resolução dos problemas energéticos e ambientais do planeta.



# AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e familiares serei eternamente grato por todo o processo educacional a que fui sujeito, reiterando sua essencialidade para a minha formação pessoal e profissional. Os valores a mim transmitidos e o suporte a mim oferecido muito contribuíram para a realização de mais uma etapa de minha vida, que agora se fecha, provendo-me condições para o recebimento deste título de engenheiro.

Agradeço também a todos os meus amigos e amigas que fizeram parte do meu cotidiano ao longo destes anos e que, comigo, compartilharam uma vivência indiscutivelmente digna de boas histórias.

Ao Prof. Marcelo Zaiat, pela amizade e confiança em mim depositada para a realização deste trabalho.

A todos outros professores e funcionários, que contribuem diariamente para a manutenção e evolução do ambiente universitário, estabelecendo e criando base para a formação de profissionais.





# EPÍGRAFE

**"Todos os organismos maiores, inclusive nós mesmos, são testemunhas vivas do fato de que práticas destrutivas não funcionam a longo prazo. No fim, os agressores sempre destroem a si mesmos, abrindo caminho para outros que sabem como cooperar e como progredir. A vida é muito menos uma luta competitiva pela sobrevivência do que um triunfo da cooperação e da criatividade."**

*Fritjof Capra*



## Resumo

MIGUEL, J. V. P. *Produção integrada de etanol de cana-de-açúcar de primeira e segunda geração: análises energética, ambiental e econômica*. São Carlos, 2013. Trabalho de Conclusão de Curso – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

O setor da produção de etanol da cana-de-açúcar no Brasil convive com o desafio de suprir com a demanda do consumidor brasileiro, ao mesmo tempo em que necessita melhorar a sustentabilidade da cadeia produtiva. Juntos, estes fatores são responsáveis por uma intensificação em pesquisas e estudos que visam melhorias dos processos produtivos aliadas ao manejo dos resíduos e subprodutos, no que tange à adequação ambiental, energética e econômica. A vinhaça e o bagaço (subprodutos mais abundantes da produção do etanol) merecem atenção especial devido aos seus potenciais energéticos que são, por vezes, subutilizados. Um modelo de integração da produção de etanol de primeira e segunda geração proposto foi estudado de modo a apresentar as vantagens em relação ao modelo vigente. Considerando uma usina anexa padronizada, simulações foram realizadas e demonstraram que o tratamento da vinhaça por digestão anaeróbia pode produzir biogás suficiente para gerar 25,8 GWh de energia elétrica, liberando bagaço para a produção de etanol de segunda geração e aumentando a produtividade para 63,25 litros de etanol por tonelada de cana-de-açúcar. Este trabalho enfatiza que os ganhos energéticos, ambientais e econômicos referentes à adoção deste modelo são interessantes para o futuro deste setor.

*Palavras-chave:* Etanol, cana-de-açúcar, vinhaça, bagaço, biogás, cogeração, 1G, 2G



## Abstract

MIGUEL, J. V. P. *Integrated first and second generation ethanol production: energetic, environmental and economic assessments*. São Carlos, 2013. Trabalho de Conclusão de Curso – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

The industry of ethanol made from sugarcane in Brazil faces the challenge of meeting the demand of the Brazilian consumer while improving the sustainability of the production chain. Together, these factors are responsible for an intensification in research and studies, aiming for the improvement of production processes combined with the management of waste and by-products, with regard to environmental, energy and cost. Vinasse and bagasse (the most abundant byproducts of ethanol production) deserve special attention due to their potential energy that are, sometimes, underutilized. A model of integrated first and second generation ethanol production proposed was studied in order to present the advantages over the current model. Considering an annexed sugar cane plant, simulations were performed and demonstrated that treatment of vinasse by anaerobic digestion can produce enough biogas to generate 25,8 GWh of electricity on an annual basis, releasing bagasse for the production of second generation ethanol and thus increasing productivity to 63,25 liters of ethanol per ton of sugarcane. This work emphasizes the gains on energy, environmental and economic fields, related to the adoption of this model, which can be interesting for the future of this industry.

*Keywords:* Ethanol, sugarcane, vinasse, bagasse, biogas, cogeneration, 1G, 2G



## Sumário

1.	INTRODUÇÃO .....	17
1.1.	CONTEXTUALIZAÇÃO.....	17
1.2.	OBJETIVOS .....	18
1.3.	JUSTIFICATIVAS.....	19
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	20
2.1.	SUSTENTABILIDADE .....	20
2.2.	RECURSOS RENOVÁVEIS E NÃO-RENOVÁVEIS.....	20
2.3.	COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS.....	21
2.4.	GASES CAUSADORES DO EFEITO ESTUFA E O AQUECIMENTO GLOBAL .....	21
2.5.	BIOCOMBUSTÍVEIS: BIOMASSA, ETANOL E BIOGÁS.....	23
2.6.	CANA-DE-AÇÚCAR .....	24
2.7.	SUBPRODUTOS DA PRODUÇÃO DE ETANOL: BAGAÇO E VINHAÇA.....	26
2.8.	PRODUÇÃO DE ETANOL DE PRIMEIRA GERAÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR .....	27
2.9.	COGERAÇÃO: CO-PRODUÇÃO DE CALOR E ENERGIA .....	29
2.10.	BIORREFINARIA .....	30
2.11.	PROCESSOS DA PRODUÇÃO DE ETANOL DE SEGUNDA GERAÇÃO .....	31
2.12.	DIGESTÃO ANAERÓBIA .....	33
2.13.	DEMANDA BIOQUÍMICA POR OXIGÊNIO (DBO) .....	33
3.	METODOLOGIA .....	34
3.1.	DADOS GERAIS .....	35
3.2.	AValiação ENERGÉTICA .....	37
3.3.	AValiação AMBIENTAL.....	37

3.3.1.	EMISSÕES DO USO DE BIOGÁS .....	39
3.3.2.	CÁLCULOS PARA O POTENCIAL DE AQUECIMENTO GLOBAL.....	39
3.4.	AVALIAÇÃO ECONÔMICA .....	40
4.	DESENVOLVIMENTO.....	41
4.1.	CONSUMO DE BIOETANOL NO BRASIL.....	41
4.2.	QUESTÃO DA VINHAÇA RESIDUAL .....	43
4.3.	PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DA VINHAÇA .....	45
4.4.	UTILIZAÇÃO DO BIOGÁS NA COGERAÇÃO DE ENERGIA E CALOR .....	46
4.5.	PRODUÇÃO INTEGRADA DE ETANOL DE SEGUNDA GERAÇÃO.....	48
5.	ANÁLISES E DISCUSSÕES DOS RESULTADOS .....	50
5.1.	AVALIAÇÃO ENERGÉTICA .....	52
5.2.	AVALIAÇÃO AMBIENTAL.....	52
5.3.	AVALIAÇÃO ECONÔMICA .....	53
6.	CONCLUSÃO .....	56
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	57



# **1. INTRODUÇÃO**

## **1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO**

A partir da década de 1960, a área ambiental passou a ser discutida nas relações internacionais entre as populações, como observa Elliot (1994). Desde então e cada vez mais preocupa-se com o consumo dos recursos naturais não-renováveis presentes em nosso planeta, em especial, os combustíveis fósseis.

Sabe-se que a emissão de gases causadores do efeito estufa é decorrente da queima de tais combustíveis e pode ser considerada um dos principais fatores de impactos ambientais. Segundo Dias et al. (2012), a substituição do uso de derivados do petróleo no setor de transportes por biocombustíveis, como o etanol, poderia mitigar estes impactos, além de promover ganhos nos patamares sócio-econômicos.

No Brasil, na década de 1970, alguns fatores contribuíram para o início do Programa Nacional do Alcool (Pró-Alcool), que, financiado pelo governo, pretendia substituir em larga escala os combustíveis veiculares derivados do petróleo por etanol da cana-de-açúcar. O mais notório entre os fatores foi a crise do petróleo, e a escolha da cana como matéria-prima foi devido à baixa nos preços do açúcar na época (MENEZES, 1980).

Dias et al. (2012) apontam que, atualmente, o Brasil e os Estados Unidos da América (EUA) são os países que lideram a produção de etanol, sendo que o último o faz utilizando o milho como a principal matéria-prima.

O Brasil, ao passar por profundas transformações sociais no período de 2005 a 2010, apresentou aumento de renda em todas as classes sociais. Reflexo disso foi o aumento da demanda por combustíveis em 8,4% no ano de 2010. Ademais, o

comportamento modificado dos brasileiros mostrou que a maioria mudaria seu estilo de vida para beneficiar o meio ambiente e cerca de 70% até pagaria mais por um produto ambientalmente saudável. Contudo, a prática revelou que o consumidor ainda é sensível aos preços, deixando de adquirir o biocombustível à medida que seu preço aumenta (LEITE, 2012, p.7).

Existe, portanto, a necessidade de aumentar a oferta de etanol ao mercado brasileiro. No entanto, isto deve ser almejado de uma maneira que não provoque a criação de novas lavouras de cana-de-açúcar, evitando assim desmatamentos de grandes áreas e competições com plantações de outros produtos agrícolas.

A cadeia de produção do etanol brasileiro segue um modelo que deve ser revisado e reestudado. O próspero melhor reaproveitamento dos resíduos da produção (principalmente o bagaço e a vinhaça) pretende introduzir nas usinas brasileiras a integração da produção do etanol de primeira geração (método convencional e vigente) com a produção de um novo etanol, de segunda geração, utilizando-se de biomassa residual como a principal matéria-prima.

## **1.2. OBJETIVOS**

O objetivo deste trabalho é avaliar uma proposta alternativa ao atual modelo de produção do etanol da cana-de-açúcar, já que este não é capaz de suprir a demanda crescente do consumidor brasileiro sem a criação de novas lavouras de cana.

Objetiva-se também mostrar que é possível desenvolver melhores práticas de aproveitamento do potencial energético contido nos subprodutos da cadeia produtiva do

etanol, reutilizando o bagaço e a vinhaça de maneira diferente e mais sustentável do que é atualmente feito.

A proposta é utilizar parte do bagaço produzido na produção de etanol de segunda geração, e tratar a vinhaça para a produção de biogás, antes de ser lançada nos solos como fertilizante, melhorando, de modo geral, a produtividade da produção de etanol por área plantada de cana-de-açúcar.

Esta proposta será embasada nos resultados de análises qualitativas e quantitativas, que pretendem apresentar vantagens energéticas, ambientais e econômicas, quando comparadas ao modelo vigente.

### **1.3. JUSTIFICATIVAS**

Preocupações em torno das altas emissões de gases causadores do efeito estufa (GEEs) frequentemente colocam o meio ambiente em cheque, apontando para uma necessidade global de suas reduções.

Junto a tal fato, existe a possibilidade de melhorar a eficiência global das usinas produtoras do etanol, pois, ainda que aparentem ambientalmente amigáveis (por tratar-se da utilização de um recurso energético renovável) e que comercializem um biocombustível de maneira competitiva, convivem com desperdícios e problemas ambientais.

Utilizando como alicerce o melhor reaproveitamento de subprodutos da produção, é possível dar um salto positivo na direção de uma cadeia produtiva mais sustentável.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. SUSTENTABILIDADE**

Sustentabilidade é um relacionamento entre sistemas econômicos dinâmicos e sistemas ecológicos maiores e também dinâmicos, embora de mudança mais lenta, em que: a) a vida humana pode continuar indefinidamente; b) os indivíduos podem prosperar; c) as culturas humanas podem desenvolver-se; mas em que d) os resultados das atividades humanas obedecem a limites para não destruir a diversidade, a complexidade e a função do sistema ecológico de apoio à vida. (SACHS, 1993)

### **2.2. RECURSOS RENOVÁVEIS E NÃO-RENOVÁVEIS**

Os recursos são divididos em renováveis e não renováveis. Os primeiros são assim denominados por utilizarem majoritariamente o sol como fonte ilimitada de energia.

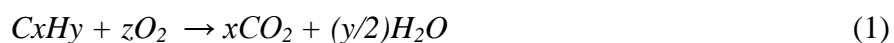
No caso da cana-de-açúcar, a energia do sol é convertida em energia química e é armazenada nos carboidratos presentes em sua estrutura por meio da fotossíntese (essa energia química que, de maneira geral, será transformada e armazenada na forma de combustível etanol ao final dos processos de obtenção). Desta forma, sua capacidade de regeneração é a qualidade interessante para o homem, sendo possível a reposição do que se gasta em uma escala de tempo compatível com a taxa de consumo.

Com relação aos recursos não-renováveis, sabe-se que suas reservas são limitadas, e a reposição é muito mais lenta do que o seu consumo. É o caso dos combustíveis fósseis, como o carvão, petróleo e gás natural.

### 2.3. COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS

Os combustíveis fósseis tiveram sua formação em eras geológicas remotas, quando processos geoquímicos transformaram plantas e outros organismos vivos em hidrocarbonetos. Estes são hoje encontrados na forma de carvão, petróleo e gás natural. Contudo, como previamente mencionado, são considerados recursos não-renováveis e sua reposição natural é um processo muito lento na escala de tempo humana.

Outro problema referente aos combustíveis fósseis é relacionado à obtenção de energia a partir deles, cuja queima em processos exotérmicos é necessária e que emite gases causadores do efeito estufa. Um exemplo é a reação de combustão de um hidrocarboneto com gás oxigênio, como expressado de maneira simplificada na reação química geral (1):



Vale ressaltar que a combustão de etanol também provoca emissão de gases estufa, conforme a reação química simplificada e balanceada (2):



### 2.4. GASES CAUSADORES DO EFEITO ESTUFA E O AQUECIMENTO GLOBAL

Os gases classificados como causadores do efeito estufa são aqueles que, presentes na atmosfera, absorvem parte da radiação infravermelha que é refletida da superfície terrestre, dificultando a sua passagem para o espaço. Do contrário, boa parte

do calor seria dispersado para o espaço e a temperatura seria bem abaixo do que se tem atualmente.

Este processo é fundamental para a manutenção do calor na Terra, o chamado efeito estufa.

Alguns destes gases que provocam este fenômeno natural são: dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ), vapor d'água ( $\text{H}_2\text{O}$ ) e também os perfluorcarbonetos (PFC's).

Na combustão de hidrocarbonetos que compõem os combustíveis fósseis, dióxido de carbono é lançado na atmosfera, acelerando o fenômeno natural do efeito estufa. Tendo em vista as quantidades altíssimas que são consumidas anualmente de derivados de petróleo, carvão e gás natural, mudanças climáticas podem ser provocadas, alterando a temperatura média terrestre (aumentando-a), no chamado fenômeno do aquecimento global.

Tendo em vista os problemas supracitados, é interessante que a humanidade reduza o consumo de combustíveis fósseis e conseqüentemente reduza as emissões dos gases de efeito estufa, de modo a evitar alterações climáticas e efeitos colaterais com potencial devastador para o meio ambiente. Tais reduções podem ser alcançadas com o uso de fontes e recursos renováveis de energia, como é o caso do etanol da cana-de-açúcar.

## 2.5. BIOCOMBUSTÍVEIS: BIOMASSA, ETANOL E BIOGÁS

Um biocombustível é um combustível (líquido, gasoso ou até mesmo sólido) que teve seu conteúdo energético originado por uma recente fixação de carbono.

Organismos vivos (como plantas e algas) e seus derivados constituem uma biomassa que pode ser convertida em substâncias que contêm energia conveniente para a produção destes combustíveis.

A biomassa é um recurso energético renovável, e pode ser utilizada diretamente na combustão para a produção de calor, ou ser indiretamente convertida em várias formas de biocombustível. Esta conversão pode ser alcançada por meio de diferentes métodos: conversão térmica, conversão química e conversão bioquímica.

Os biocombustíveis podem ser de primeira ou segunda geração. De modo geral, um biocombustível de primeira geração é aquele produzido a partir de açúcares, de amido ou de óleo vegetal, e a vantagem principal consiste na facilidade com que estas matérias-primas são convertidas em biocombustíveis. Contudo, suas produções estão, de certa forma, em competição com a produção de comida e indústrias do setor alimentício, tendo em vista a área de agricultura que deverá ser dedicada para a agricultura e cultivo de suas matérias-primas (CHERUBINI, 2010).

Já os biocombustíveis de segunda geração têm como matéria-prima materiais lignocelulósicos (presentes em células vegetais), o que significa que toda a planta pode ser utilizada para a produção desta bioenergia. O desenvolvimento de tecnologias que facilitem e permitam a exploração destas matérias-primas indubitavelmente aumentarão a produção de combustível por área plantada, já que existe certa uma grande quantidade de resíduos lignocelulósicos disponíveis na produção dos biocombustíveis de primeira geração (CHERUBINI, 2010).

O etanol derivado da cana-de-açúcar produzido no Brasil é de primeira geração, e tem como matéria-prima principal os açúcares presentes na cana. O bioetanol de segunda geração, ainda não produzido em escala comercial no Brasil, utiliza os materiais celulósicos que compõem a biomassa (da cana-de-açúcar) como matéria-prima.

Outro biocombustível importante para este trabalho é o biogás. Dotado de um elevado poder calorífico, o biogás é uma mistura gasosa composta principalmente por metano ( $\text{CH}_4$ ) e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Ele pode ser obtido através da biodigestão de matéria orgânica em condições específicas.

## **2.6. CANA-DE-AÇÚCAR**

A cana-de-açúcar (composta por caule, folhas e folhas superiores) é uma das poucas plantas que armazenam seus carboidratos na forma de açúcares (sacarose) ao invés de amido, como afirma Taiz e Zeiger (2004). Sua eficiência energética de conversão da radiação solar gira em torno de 4,8%, e é considerada alta ao se comparar com o milho (3,2%), como observa Odum (1971), e tal fato faz da cana-de-açúcar uma planta fotossintetizante bastante eficiente, explicando a sua produtividade no campo entre 80 e 90 toneladas por hectare.



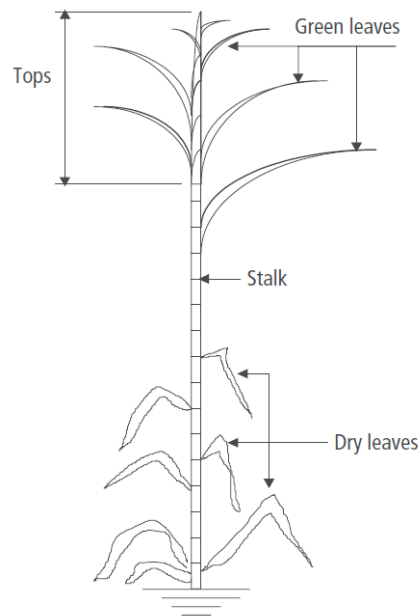


Figura 1. Partes da cana-de-açúcar (Hassuani et al., 2005)

A cana-de-açúcar apresenta melhor comportamento em regiões quentes, e que apresente duas estações distintas e bem definidas. Uma destas estações, quente e úmida, favorece a germinação e desenvolvimento vegetativo. A outra, fria e seca, promove a maturação e conseqüente acúmulo de sacarose nos colmos do caule.

A qualidade da planta varia consideravelmente com relação à estação do plantio, ao tipo de solo e às condições climáticas locais. Ensinas et al. (2007) afirma que a porcentagem de sacarose no caule é de 14%, e que quanto mais alto este valor, maior a produtividade de etanol.

A Tabela 1 apresenta a composição média da cana-de-açúcar.

Tabela 1 Composição Média da Cana-de-Açúcar (COPERSUCAR, 2013)

Componente	Fração Molar (%)
Água	65 – 75
Sacarose	11 – 18
Fibra	8 – 14
Sólidos Solúveis	12 - 23

## 2.7. SUBPRODUTOS DA PRODUÇÃO DE BIOETANOL: BAGAÇO E VINHAÇA

A produção de bioetanol a partir da cana-de-açúcar produz resíduos ao longo dos processos envolvidos. É o caso do bagaço e vinhaça, dentre muito outros, mas estes têm uma importância relativamente maior para este trabalho.

O bagaço (Figura 2) é constituído por materiais celulósicos: celulose, hemicelulose e lignina. No modelo vigente de produção de etanol de primeira geração, o bagaço é utilizado como combustível direto na cogeração, sendo queimado para produção de energia e calor. No modelo proposto neste trabalho, o bagaço será utilizado como matéria prima na produção de etanol de segunda geração.



Figura 2. Bagaço da cana-de-açúcar (CATRACALIVRE, 2013)

A vinhaça (Figura 3) é um resíduo rico em matéria orgânica e outros minerais (principalmente o potássio), e é gerada após o processo de destilação necessário à produção de etanol da cana-de-açúcar. A vinhaça é reaproveitada como fertilizante na própria agricultura da cana. No entanto, existem outros empregos possíveis para este resíduo, como a produção de biogás a partir do processo de digestão anaeróbia.



Figura 3. Fertilização dos solos com o uso da vinhaça (NATUREAMBIENTAL, 2013)

## **2.8. PRODUÇÃO DE BIOETANOL DE PRIMEIRA GERAÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR**

Como explicado por Dias et al. (2010), a produção convencional de bioetanol de primeira geração (proveniente da cana-de-açúcar) segue os seguintes passos: recebimento e limpeza da cana-de-açúcar, extração dos açúcares, tratamento e concentração do caldo, fermentação, destilação, desidratação.

Após a colheita, transporte o recebimento, a cana deve ser limpa com água para remover a sujeira que provém da plantação.

A extração dos açúcares é feita em moendas, onde o caldo é separado do bagaço. O caldo da cana-de-açúcar contém água, sacarose e açúcares redutores, além de

impurezas como minerais, sais, ácidos orgânicos, sujeira e partículas fibrosas que devem ser removidas antes da fermentação. Basicamente o caldo passa por diversos processos de separação, envolvendo filtração, aquecimento, dissolução química para a posterior alimentação nos fermentadores.

O processo de fermentação tem a alimentação contínua, e os açúcares (sacarose, glicose e frutose) são convertidos em etanol, dióxido de carbono e outros produtos (alcoóis e ácidos orgânicos). Por tratar-se de um processo exotérmico, os reservatórios contendo a mistura são resfriados de modo a atingir uma alta concentração de etanol no líquido fermentado, para que posteriormente seja centrifugado e purificado na destilação e em colunas de retificação. Etanol hidratado (93%) é formado e tratado em um processo de absorção, produzindo álcool anidro (99,33%) (Dias et al, 2010).

Todos os processos estão representados na Figura 4 na forma de diagrama de simplificado, contendo o seu fluxo seqüencial e evidenciando os produtos finais, bem como seus resíduos e subprodutos.

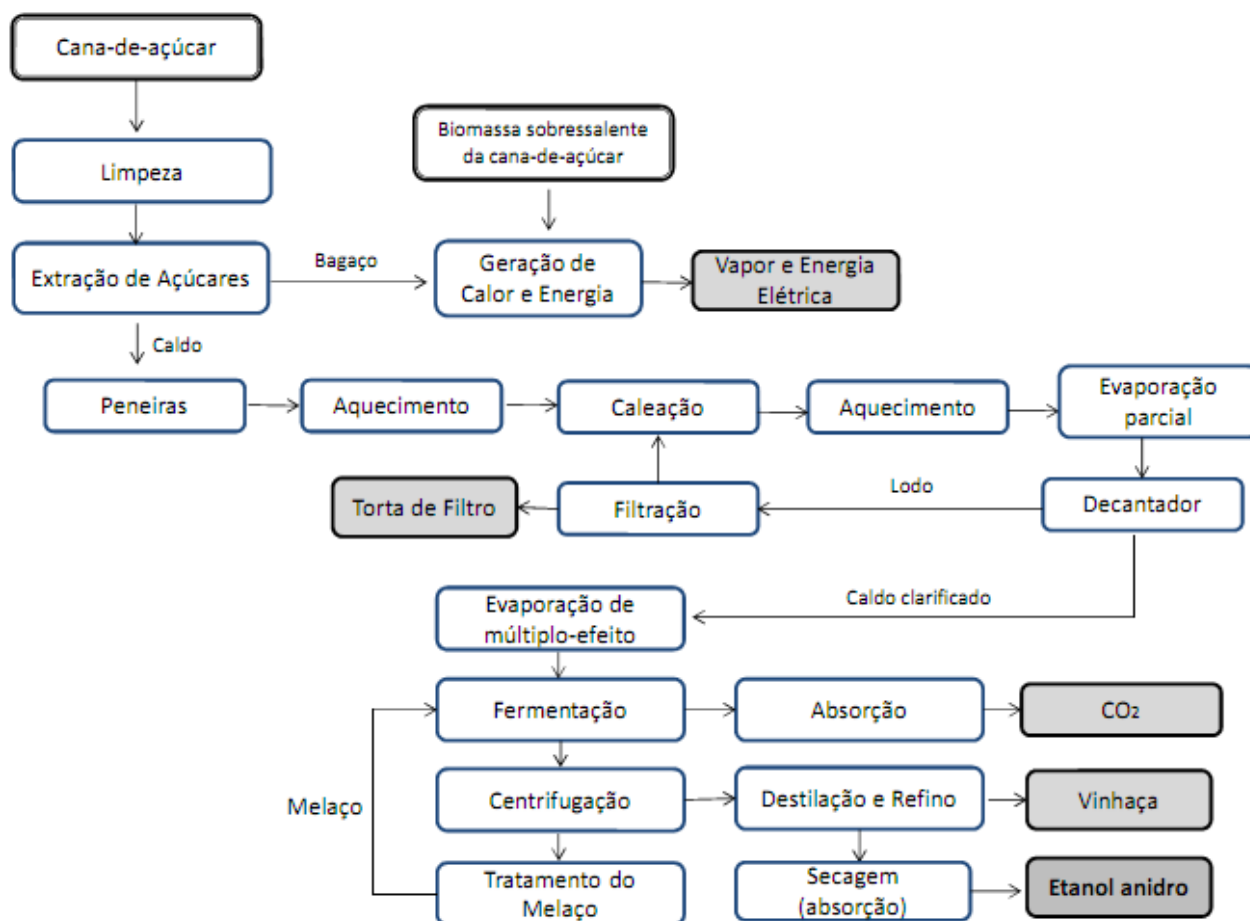


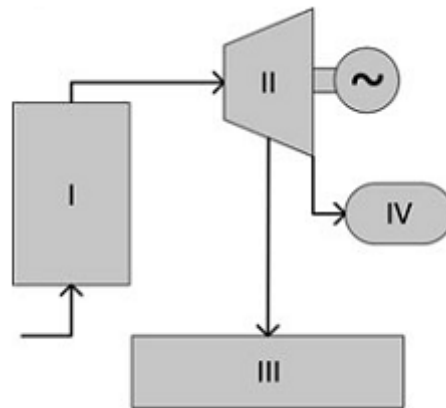
Figura 4. Diagrama de processamentos otimizados de uma destilaria produzindo bioetanol anidro de primeira geração (1G) da cana-de-açúcar. Adaptado e traduzido de Dias et al. (2012).

## 2.9. COGERAÇÃO: CO-PRODUÇÃO DE CALOR E ENERGIA

No sistema de cogeração, subprodutos fibrosos da cana-de-açúcar (bagaço e palhada) são utilizados como combustíveis para a produção de vapor e energia elétrica, abastecendo todo o processo de produção de etanol com respeito aos requisitos térmicos e elétricos, como exposto por Dias et al. (2010).

Os subprodutos são queimados na caldeira e produzem vapor pressurizado. Este vapor alimenta a turbina, que reduz sua pressão para a produção dos requisitos térmicos

e de energia elétrica. O vapor excedente é condensado, conforme esquema simplificado e representado na Figura 5.



**Figura 5 – Esquema simplificado do sistema de cogeração para a produção de bioetanol de primeira geração. (I: caldeira; II: turbinas à vapor; III: processo; IV: condensador). Dias et al. (2011)**

## **2.10. BIORREFINARIA**

O conceito por trás de uma biorrefinaria envolve um amplo espectro de tecnologias capazes de separar a os blocos construtores (carboidratos, proteínas, triglicérides e etc) da biomassa para convertê-los em produtos, biocombustíveis, químicos, todos com alto valor agregado.

Uma biorrefinaria é uma instalação (ou rede de instalações) que integra processos e equipamentos para a conversão de biomassa. Esse conceito é análogo à refinaria de petróleo, que produz diferentes combustíveis produtos a partir do petróleo (CHERUBINI, 2010).

Um dos processos envolvidos no conceito de biorrefinaria é o processo da Hidrólise Enzimática, que consiste na quebra (por enzimas que utilizam H<sub>2</sub>O) de

determinada molécula em outras menores. É um processo essencial para a produção de etanol 2G.

## **2.11. PROCESSOS DA PRODUÇÃO DE BIOETANOL DE SEGUNDA GERAÇÃO**

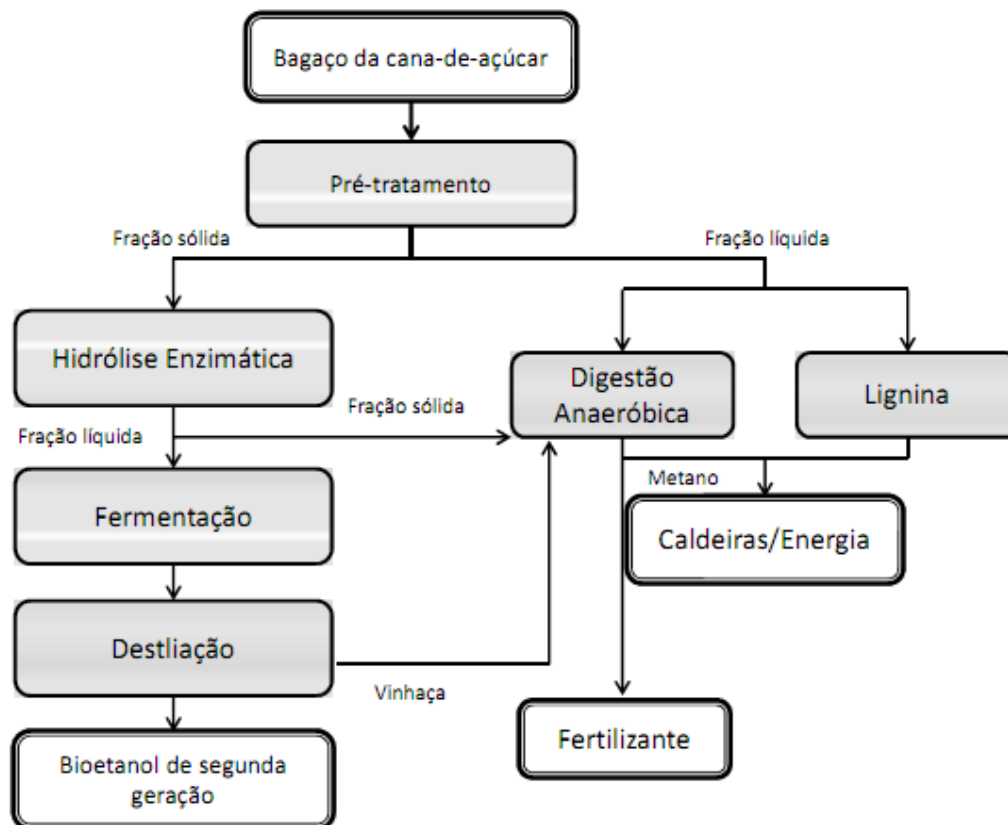
Dias et al. (2010) explicam que os bicompostíveis de segunda geração são produzidos a partir de biomassa lignocelulósica, que é basicamente composta de três polímeros: celulose, hemicelulose e lignina. Enquanto a fração de hemicelulose é convertida em monossacarídeo (principalmente pentoses) em condições brandas, a hidrólise da celulose em glicose, esta sendo facilmente fermentada em etanol, é considerada difícil de realizar.

Um processo de pré-tratamento é necessário à biomassa para que seja possível separar a lignina e a hemicelulose da celulose. Isto é feito promovendo suas solubilizações ou degradações, que aumenta a porosidade do material lignocelulósico e facilita o acesso da celulose pelo ataque enzimático.

O processo de produção do bioetanol de material lignocelulósico consiste em uma seqüência de operações: pré-tratamento da biomassa, hidrólise enzimática, concentração, fermentação, separação, purificação e tratamento dos efluentes (bem como seus devidos despejos).

No Brasil, o bagaço da cana-de-açúcar é importante matéria-prima a ser considerada para a produção de etanol de segunda geração (via hidrólise enzimática) devido ao baixo custo (no que diz respeito à obtenção de matéria-prima) e da desnecessidade de altos investimentos, decorrente da utilização da infra-estrutura já

existente nas usinas. Existe também a possibilidade de utilizar a palhada (restos de folhas das plantações de cana-de-açúcar) como matéria-prima para a produção de etanol 2G. No entanto, parte desta biomassa produzida deve ser deixada no solo das plantações para promover a conservação e reciclagem de fertilizantes.



**Figura 6. Diagrama de processos para a produção de bioetanol de segunda geração (2G) da cana-de-açúcar, integrado com o tratamento de resíduos para a produção de biogás e fertilizantes. Adaptado e traduzido de Rabelo et al. (2011).**

No diagrama representado pela Figura 6, é possível observar o fluxo simplificado dos processos envolvidos na produção de bioetanol 2G. Estão também incluídos e integrados no esquema, processos de tratamento de resíduos para a produção de biogás (e seu subsequente uso na cogeração de eletricidade e calor) e fertilizantes. No caso, a vinhaça, junto com a fração líquida do bagaço (após a fase de pré-



tratamento) e a fração sólida (resultante do processo de hidrólise enzimática do bagaço), sofrem o processo de digestão anaeróbia.

## **2.12. DIGESTÃO ANAERÓBIA**

Essencial para a produção de biogás a partir da vinhaça, a digestão anaeróbia é uma coleção de processos em que microorganismos quebram matéria biodegradável na ausência de oxigênio.

O processo de digestão passa por quatro etapas. Inicia-se com a hidrólise, quebrando polímeros orgânicos, como carboidratos, em derivados solúveis. Estes ficam disponíveis para a próxima etapa (acidogênese), na qual continuam sendo quebrados em moléculas menores, como ácidos carbônicos, amônia e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ).

Na etapa que se segue (acetogênese), os ácidos carbônicos são quebrados em hidrogênio e ácido acético, que sofrem a quarta e última etapa (metanogênese), produzindo, por fim, o biogás, composto principalmente por metano ( $\text{CH}_4$ ) e  $\text{CO}_2$ .

## **2.13. DEMANDA BIOQUÍMICA POR OXIGÊNIO (DBO)**

A demanda bioquímica de oxigênio (DBO) se dá pela quantidade de Oxigênio necessária para que se viabilize a biodegradação da matéria orgânica contida no meio (água).

### 3. METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho tem como ponto de partida alguns questionamentos com respeito ao modelo de produção de etanol da cana-de-açúcar de primeira geração, especificamente no que toca o manejo dos principais subprodutos, a vinhaça e o bagaço.

- O tratamento dado aos subprodutos da produção de etanol da cana-de-açúcar é adequado? É possível remodelar este tratamento de modo a mitigar possíveis impactos ambientais?
- Em termos de energia, quais são as vantagens de se integrar processos de produção de etanol de primeira geração com o de segunda geração?
- Qual seria o balanço global do novo modelo proposto, feitas as análises energética, ambiental e econômica?

Estes questionamentos direcionaram o trabalho para o uso de uma metodologia de construção de um modelo, pois, segundo Miguel et al. (2010):

“(...) sua utilização permite compreender melhor o ambiente em questão, identificar problemas, formular estratégias e oportunidades. Um modelo pode ser definido como uma representação de uma situação ou realidade, conforme vista por uma pessoa ou um grupo de pessoas, e construída na forma de auxiliar o tratamento daquela situação de uma maneira sistemática.”

Desta forma, foi construído um modelo quantitativo abstrato baseado em uma pesquisa empírica descritiva, utilizando-se de ferramentas de simulação e linguagem matemática para calcular valores numéricos das propriedades do sistema em questão.

Determinou-se este tipo de pesquisa tendo em vista o objetivo do modelo de descrever de forma adequada as relações causais que poderiam influenciar na realidade, levando a uma melhor compreensão dos processos reais.

### **3.1. DADOS GERAIS**

Os dados utilizados neste trabalho para as avaliações energética, ambiental e econômica foram obtidos da Biorrefinaria Virtual da Cana-de-açúcar (BVC), uma ferramenta em desenvolvimento pelo Programa de Avaliação Tecnológica (PAT) do Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol (CTBE).

O CTBE é uma instituição de pesquisa, desenvolvimento e inovação na área de etanol de cana-de-açúcar. Aberto a usuários externos, o CTBE foi criado para contribuir com o Brasil na manutenção da liderança na produção de etanol, buscando respostas para desafios científicos e tecnológicos em todo o ciclo produtivo (BIOETANOL, 2013).

A BVC é uma plataforma de simulação que permite a avaliação da integração de novas tecnologias (etanol celulósico, de segunda geração) com as tecnologias praticadas atualmente na cadeia produtiva do bioetanol. Essa ferramenta utilizará simulação computacional de processos para avaliar a sustentabilidade econômica, ambiental e social desta tecnologia, comparada a uma cadeia de produção padrão do setor (BIOETANOL, 2013).

No Brasil, o processamento da cana-de-açúcar é feito em dois tipos de usinas, anexa, produzindo etanol e açúcar, e autônoma, produzindo apenas etanol. O cenário considerado para as avaliações foi o de uma usina anexa padrão, já que

aproximadamente 70% das usinas brasileiras são anexas (CGEE, 2009). Os dados gerais foram apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2 – Dados gerais de entrada para o cenário analisado em uma usina anexa padrão. (MORAES et al., 2014)**

Principais dados de base	Usina Anexa
<b>Usina</b>	
Período da safra (dias)	167
Cana-de-açúcar processada (toneladas/safra)	$2 \times 10^6$
Produtividade da cana-de-açúcar (toneladas/hectare)	85
Área plantada de cana-de-açúcar (hectare)	$23,5 \times 10^3$
Produção anual de etanol ( $m^3$ /safra)	$106,8 \times 10^3$
Produção anual de açúcar (toneladas/safra)	$101,6 \times 10^3$
Volume de vinhaça por volume de etanol (L/L)	9,8
Produção anual de vinhaça ( $m^3$ /safra)	$1,0 \times 10^6$
Produtividade de etanol (litros de etanol/TC)	53,4
Produtividade de açúcar (kg de açúcar/TC)	50,8
Produção anual de bagaço, 50% de humidade (toneladas/safra)	$547,7 \times 10^3$
Produção anual de bagaço, seco (toneladas/safra)	$273,8 \times 10^3$
Uso anual de palha, 15% de humidade (toneladas/safra)	$164,8 \times 10^3$
Uso anual de palha, seca (toneladas/safra)	$140 \times 10^3$
<b>Processo de digestão anaeróbia</b>	
Demanda química de oxigênio da vinhaça ( $kg/m^3$ )	33,6
Total de nitrogênio na vinhaça ( $kg/m^3$ )	0,37
Eficiência de remoção de demanda química de oxigênio	0,72
Vazão volumétrica da vinhaça ( $m^3 h^{-1}$ )	260,6
Fração volumétrica de CH <sub>4</sub> do biogás ( $m^3/m^3$ )	0,6
Fração volumétrica de CO <sub>2</sub> do biogás ( $m^3/m^3$ )	0,35
Produção de CH <sub>4</sub> por demanda química de oxigênio removida ( $N m^3 kg/DQO$ )	0,29
Poder calorífico do biogás ( $kJ N/m^3$ )	$21,5 \times 10^3$
Temperatura (°C)	55

TC = Tonelada de cana-de-açúcar

A vinhaça residual foi, na simulação, tratada em um processo de biodigestão anaeróbia, produzindo biogás. Este biocombustível teve sua energia ( $P$ ) calculada de acordo com a equação (1), no qual se considerou a vinhaça como o único componente a sofrer a biodigestão anaeróbia e a energia gerada foi na forma de gás metano (CH<sub>4</sub>).

$$P = (LHV_b/f_V) \cdot (E_{DBO} \cdot Q_V \cdot C_{DBO_V}) \cdot \Omega_{CH_4} \quad (1)$$

Nesta equação,  $LHV_b$  é o poder calorífico inferior do biogás ( $\text{kg Nm}^{-3}$ ),  $f_V$  é a fração volumétrica de  $\text{CH}_4$  do biogás,  $E_{DBO}$  é a eficiência da remoção da demanda bioquímica de oxigênio,  $Q_V$  é vazão volumétrica da vinhaça ( $\text{m}^3\text{h}^{-1}$ ),  $C_{DBO_V}$  é a demanda bioquímica de oxigênio da vinhaça ( $\text{kg m}^{-3}$ ), e  $\Omega_{CH_4}$  é a produção de metano ( $\text{CH}_4$ ) por demanda bioquímica de oxigênio removida ( $\text{Nm}^3 \text{kg}^{-1}$ ).

### 3.2. AVALIAÇÃO ENERGÉTICA

Os resultados obtidos (energia gerada do biogás) foram avaliados em relação ao seu uso para a cogeração de vapor e energia, que abastecem a própria usina anexa de produção de etanol.

Nas caldeiras industriais testadas (Siemens, modelo SGT 100, 4700 KW – origem alemã) a eficiência da combustão e geração de energia utilizando o biogás gerado pela biodigestão da vinhaça foi equivalente a 30% (MORAES et al., 2014).

### 3.3. AVALIAÇÃO AMBIENTAL

A avaliação ambiental realizada levou em consideração o equivalente populacional e o potencial de aquecimento global (redução na emissão de GEEs).

O equivalente de poluição potencial da vinhaça gerada em uma usina produtora de etanol da cana-de-açúcar e uma população que produz uma carga poluente em termos

de matéria orgânica (DBO) foi determinado. Para essa análise, levou-se em consideração:

- Carga poluente em termos de geração de esgoto doméstico.
- Características físico-químicas de um esgoto padrão.
- Vazão de esgoto sujeito a variações do consumo populacional de água ( $CPC_{\text{água}}$ ), afetado pelo coeficiente de esgoto/água ( $c$ ).

Os valores adotados para os parâmetros acima citados, de acordo com Metcalf & Eddy (2003, p. 1819) e Von Sperling (2005, p. 24), foram  $0,43 \text{ g L}^{-1}$  de DBO para o esgoto ( $C_{DBOs}$ ),  $225 \text{ L hab}^{-1} - \text{d}^{-1}$  para o consumo médio de água em cidades grandes ( $CPC_{\text{água}}$ ),  $0,8$  para  $c$  em contribuição de esgoto per capita ( $CPC_{\text{esgoto}}$ ), calculado utilizando a equação (2). Finalmente, os valores de  $EP$  foram determinados para o cenário utilizando a equação (3).

$$CPC_{\text{esgoto}} = C_{DBOs} \cdot CPC_{\text{água}} \cdot c \quad (2)$$

$$EP = (Q_V \cdot C_{DBO_V}) / CPC_{\text{esgoto}} \quad (3)$$

Para a avaliação do potencial de aquecimento global, as emissões de GEEs, que foram evitadas pelo uso da vinhaça biodigerida ao invés da vinhaça *in natura*, e o uso do biogás para a cogeração de vapor e energia elétrica em uma usina anexa foram considerados.

Para efeitos de cálculo, o potencial de créditos de carbono obtido foi estimado como toneladas de  $\text{CO}_2$  equivalente ( $\text{tCO}_{2\text{eq}}$ ). Os fatores de caracterização considerados para o cálculo do potencial de aquecimento global foram  $22 \text{ kg CO}_{2\text{eq}} \text{ kg}^{-1} \text{ CH}_4$  e  $296 \text{ kg CO}_{2\text{eq}} \text{ kg}^{-1} \text{ N}_2\text{O}$  para  $\text{CH}_4$  e  $\text{N}_2\text{O}$ , respectivamente, dentro de um horizonte de 100 anos (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC), 2007).

### 3.3.1. EMISSÕES DO USO DE BIOGÁS

Com relação às emissões de GEEs provocadas pela queima de biogás para cogeração de energia elétrica, o fator de intensidade de carbono de 0,25 tCO<sub>2eq</sub> MW h<sup>-1</sup>, utilizando uma caldeira para gás natural, foi adotado (DONES et al., 2007). Esta fonte de energia elétrica leva em consideração as variações acerca da demanda básica de energia elétrica no Brasil, como se a energia produzida pelo biogás fosse utilizada e distribuída pela rede elétrica convencional.

### 3.3.2. CÁLCULOS PARA O POTENCIAL DE AQUECIMENTO GLOBAL

O potencial de aquecimento global foi calculado para o cenário proposto considerando emissões de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O e emissões evitadas devido à energia elétrica substituída. O total de emissão de GEEs por ano ( $E_{(anual)}$ ), em toneladas de carbono equivalente, foi estimado de acordo com a equação (6) ao considerar o uso de todo o biogás produzido durante a colheita da cana-de-açúcar. O preço médio dos créditos de carbono dos últimos três leilões da BM&F Bovespa foi utilizado (€12,90 por tCO<sub>2eq</sub>, sendo a taxa de conversão para o dólar norte-americano de 1,35 USD por Euro, cotado em Outubro de 2013).

$$E_{(anual)} = (tCO_{2eq(CB)cogeração}) + (- tCO_{2eq(ED)}) + (- tCO_{2eq(VB)}) \quad (6)$$

Nesta expressão,  $tCO_{2eq(CB)cogeração}$  corresponde à emissão de GEEs a partir do biogás queimado para produção de energia no processo de cogeração;  $- tCO_{2eq(ED)}$  representa as emissões evitadas por energia substituída; e por fim,  $- tCO_{2eq(VB)}$

corresponde às emissões evitadas de CO<sub>2</sub> devido à aplicação de vinhaça biodigerida nos solos.

### **3.4. AVALIAÇÃO ECONÔMICA**

Uma avaliação econômica foi realizada para considerar os efeitos da construção e operação dos processos de digestão anaeróbia em uma usina anexa e também da infraestrutura necessária à produção de etanol 2G, com uma unidade capaz de processar 268.000 toneladas de bagaço de cana-de-açúcar (DIAS et al., 2011). Os investimentos e custos operacionais de uma planta de digestão anaeróbia foram baseados em Procknor (2008), considerando um reator do tipo IC (*Internal Circulation*) e incluindo também nos cálculos e simulações um sistema de tratamento e remoção de H<sub>2</sub>S do biogás.

A realização do cálculo do *payback* foi o método utilizado para a análise econômica.

Os dados relacionados aos investimentos e custos necessários para viabilização e operação do modelo decorrem de estudos ainda incipientes na área. Por se tratar de valores estimados, a análise econômica foi simplificada, com um nível de detalhamento relativamente baixo.



## 4. DESENVOLVIMENTO

### 4.1. CONSUMO DE BIOETANOL NO BRASIL

O bioetanol proveniente da cana-de-açúcar é produzido no Brasil em grande escala há mais de 30 anos. Ocorre que, desde a introdução de veículos *flex-fuel* (compatíveis com etanol e gasolina) no mercado brasileiro em 2003, o consumo de etanol cresceu consideravelmente até que, em 2007, superou o consumo de gasolina (UNIÃO DA INDÚSTRIA DA CANA-DE-AÇÚCAR (UNICA), 2013).

É possível observar a evolução da frota de veículos brasileiros no período de 2006 a 2012 na tabela 4.

Tabela 3. Frota brasileira de autoveículos leves (ciclo Otto). (UNICA, 2013)

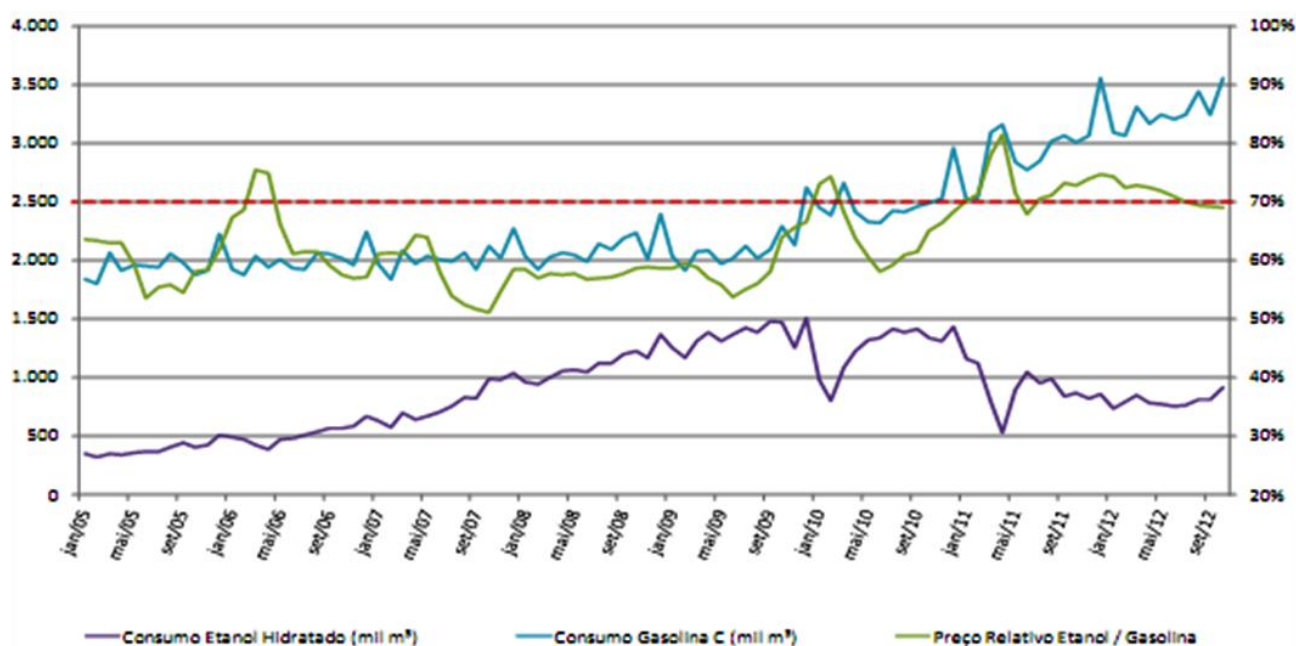
Ano	Frota total	Flex fuel	Gasolina	Etanol
2006	20.177.701	2.603.914	15.541.077	2.032.710
2007	21.517.698	4.586.512	15.085.856	1.845.330
2008	23.104.220	6.878.189	14.555.523	1.670.508
2009	24.967.140	9.467.825	13.991.052	1.508.263
2010	27.058.723	12.244.937	13.455.428	1.358.358
2011	29.160.425	14.944.734	12.995.272	1.220.419
2012	31.410.752	17.895.425	12.421.215	1.093.995

Valendo-se de várias hipóteses, em um estudo temático sobre a evolução do mercado de combustíveis e derivados para o período de 2000 a 2012, a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) constatou que:

“A grande penetração de veículos flex-fuel no mercado nacional tornou a demanda por combustíveis automotivos bastante sensível aos preços relativos, ocasionando por vezes movimentos bruscos de migração de um

combustível para outro, o que aumenta o nível de estresse logístico em razão do maior grau de imprevisibilidade da demanda. A Tabela 5 ilustra essa situação, mostrando o consumo de etanol e de gasolina, assim como o preço relativo entre ambos. A linha tracejada vermelha assinala a condição de competitividade do etanol com a gasolina (preço máximo de 0,7 vez o da gasolina, em razão do menor poder calorífico do etanol em relação à gasolina). Pode-se observar que o comportamento ascendente do consumo do etanol foi interrompido entre o final de 2009 e o início de 2010, quando foi violada a condição de competitividade, e desde então o produto tem tido dificuldade de recuperar sua participação no mercado.”

Tabela 4. Consumo de etanol e gasolina, e preço relativo, 2005 - 2012. (ANP, 2013)



Assim sendo, o fato de o consumo de etanol no Brasil sofrer variações (decorrentes de qualquer que seja o fator) se comunica com a necessidade de aumentar a produtividade do bioetanol da cana-de-açúcar.

## 4.2. QUESTÃO DA VINHAÇA RESIDUAL

Dentre os vários resíduos agrícolas das plantações de cana e dos processos industriais, a vinhaça produzida após a destilação é, junta com o bagaço, os que mais possuem um potencial energético a ser explorado.

Ainda que este efluente seja altamente poluente e considerado danoso ao meio ambiente, ele possui características boas no que diz respeito ao seu uso como fertilizante nos solos, afirmam Salomon e Lora (2009). Isto se dá por ser rico em matéria orgânica e por ter uma alta demanda bioquímica de oxigênio (DBO).

No Brasil, a vinhaça é diretamente aplicada no solo como fertilizante e como fonte de potássio. No entanto esta prática deveria ser posterior a uma análise cuidadosa do solo. Do contrário, quantidades desproporcionais podem vir a ser utilizadas, aumentando as chances de alterar e danar o ecossistema local.

Já foi constatado que a vinhaça, se aplicada de maneira descontrolada, pode alterar o ecossistema local da lavoura de cana-de-açúcar. Por exemplo, nos últimos anos (posteriores à aplicação de vinhaça nos solos), vêm ocorrendo surtos populacionais da mosca *Stomoxys calcitrans* (Figura 7), conhecida popularmente como mosca-dos-estábulos, em algumas regiões do Brasil.

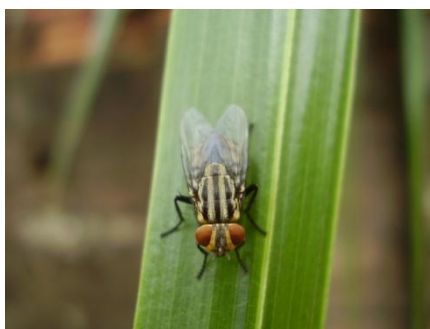


Figura 7. Mosca-do-estábulo (MOSCADOESTABULO, 2009)

A prática de fertirrigação com vinhaça criou um ambiente favorável à criação e reprodução da mosca, principalmente em micro-áreas em que ocorre o acúmulo da vinhaça. O surto da mosca tem provocado prejuízo a alguns pecuaristas, visto que a mosca ataca o gado, picando-o. Os animais, agitados pelas freqüentes picadas, mudam seus hábitos alimentares, e se aglomeram para se livrarem do parasita. Esta mudança comportamental, caso atinja níveis extremos, pode provocar a morte do gado por deficiência alimentar (BIOLOGICO, 2013).



**Figura 8. Vinhaça acumulada no solo (MOSCADOESTABULO, 2009)**

Além da possibilidade de criar condições de reprodução da mosca, existe uma hipótese de que a vinhaça, devido seu alto teor de matéria orgânica em sua composição e quando mal utilizada, pode vir a provocar uma competição com a própria cana-de-açúcar nos solos, causando uma diminuição na taxa de crescimento e subsequente queda na produtividade.

Vale ressaltar que é apenas uma hipótese e não foram, ainda, realizados estudos específicos que comprovem esta possível queda na produtividade.

Outro ponto importante é que parte do conteúdo orgânico da vinhaça é provavelmente usado como um doador de elétrons para desnitrificação heterotrófica do solo, já que emissões de óxido nitroso ( $N_2O$ ), um produto intermediário do processo de desnitrificação, foi detectado por Oliveira<sup>1</sup> (2010 *apud* MORAES et al. 2014) em seus estudos. Neste caso, o impacto ambiental seria muito pior devido ao potencial de intensificação do aquecimento global do  $N_2O$ , que é cerca de 296 vezes mais alto do que o do  $CO_2$  (IPCC, 2007).

Todos estes fatores contribuem para que se estude e viabilize a produção de biogás a partir da vinhaça em escala comercial e que cada vez mais se adote esta prática por parte das usinas sucroalcooleiras.

### **4.3. PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DA VINHAÇA**

Como mencionado, é possível explorar o potencial energético da vinhaça. Sabe-se que para cada litro de etanol produzido, aproximadamente 10 litros de vinhaça são produzidos (Tabela 2). O volume total da vinhaça gerado na safra (Tabela 2) foi utilizado e tratado no processo de digestão anaeróbia (simulação pela BVC). Desta forma, a matéria orgânica que compõe parte da vinhaça, foi transformada em biogás. Os resultados obtidos foram dispostos na Tabela 6.

É conveniente ressaltar que esta quantidade de biogás seria produzida utilizando-se apenas da vinhaça resultante da produção de etanol de primeira geração. Em uma usina anexa que integra também a produção de etanol de segunda geração, mais vinhaça

---

<sup>1</sup> OLIVEIRA, B. G.. Vinhaça da cana-de-açúcar: fluxos de gases de efeito estufa e comunidades de archaea presente no sedimento do canal de distribuição. 2010. 96f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade Estadual Paulista, Piracicaba, SP, 2010.

seria produzida, o que implicaria em um potencial ainda maior para a quantidade de biogás produzido.

**Tabela 5. Biogás que pode ser produzido durante toda a safra e o seu respectivo potencial de geração de energia para o cenário da cogeração. (MORAES et al., 2014)**

<b>Parâmetro</b>	<b>Usina Anexa</b>
Vazão de biogás (m <sup>3</sup> /h)	3,6 x 10 <sup>3</sup>
Produção total de biogás na safra (m <sup>3</sup> /ano)	14,5 x 10 <sup>6</sup>
Potencial energético produzido (MW)	18,2
Potencial energético por volume de vinhaça (W/m <sup>3</sup> )	17,5
Potencial energético por volume de etanol (W/m <sup>3</sup> )	169,9
Potencial energético por peso de cana-de-açúcar (W/TC)	9,1
Eletricidade gerada na cogeração (MW h)	21,8 x 10 <sup>3</sup>

A fração residual, separada após o processo de digestão anaeróbia, contém todos os nutrientes que justificavam a aplicação da vinhaça no solo por meio da fertirrigação. Esta vinhaça biodigerida, em tese, já pode ser lançada aos solos como fertilizante sem a preocupação de causar os possíveis danos ambientais em escala local:

- Formação de criadouros da mosca-de-estábulo;
- Acúmulo de matéria orgânica que, de certa forma, poderia vir a criar uma biota que competiria com a própria cana-de-açúcar;
- Emissões de N<sub>2</sub>O.

#### **4.4. UTILIZAÇÃO DO BIOGÁS NA COGERAÇÃO DE ENERGIA E CALOR**

A proposta defendida neste trabalho é a de utilização do biogás resultante da biodigestão anaeróbia da vinhaça em processos internos e necessários à cadeia produtiva do bioetanol da cana-de-açúcar.

Este biocombustível produzido detém um poder calorífico alto o suficiente para a geração de energia e calor. É conveniente, portanto, utilizar o biogás no processo de cogeração de calor e eletricidade, alimentando a própria usina anexa.

Moraes et al. (2014) apontam que o biogás poderia ser utilizado para outras aplicações, como o combustível de veículos automotores necessários para processos agrícolas (feitas as devidas adaptações de seus motores). Este uso, ainda que economicamente atrativo, requer mais recursos financeiros quando comparado ao seu uso como combustível na cogeração industrial, visto que usinas sucroalcooleiras no Brasil já possuem a tecnologia necessária (caldeiras industriais) para tal processo.

Os dados simulados pela BVC (contidos na Tabela 6) apontam que a quantidade de eletricidade gerada pela combustão do biogás no processo de cogeração foi de  $21,8 \times 10^3$  MWh para o período da produção de cana de 167 dias (Tabela 2), o que remete a aproximadamente  $4,0 \times 10^3$  MWh por mês.

De acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2011), a atual produção de termoeletricidade por meio da queima do bagaço da cana-de-açúcar no processo de cogeração nas usinas brasileiras é de  $46,2 \text{ kWh TC}^{-1}$ , dos quais  $21,1 \text{ kWh TC}^{-1}$  são consumidos em processos internos, e o excedente de  $25,1 \text{ kWh TC}^{-1}$  é vendido para a rede elétrica convencional.

Assim sendo, o bagaço da cana-de-açúcar poderia ser substituído parcialmente pelo biogás. Este é capaz de gerar  $10,9 \text{ kWh TC}^{-1}$  (MORAES et al. 2014), fazendo com que, dos  $46,2 \text{ kWh TC}^{-1}$  potenciais da queima do bagaço, apenas  $10,2 \text{ kWh TC}^{-1}$  sejam necessários para alimentar a cadeia produtiva do etanol 1G. Tal fato, se alcançado, liberaria os  $36 \text{ kWh TC}^{-1}$  excedentes potenciais de energia do bagaço.

É possível, portanto, destinar este excedente à produção de etanol de segunda geração (2G), aumentando, por fim, a produtividade em termos de volume de bioetanol produzido por área plantada de cana-de-açúcar.

#### **4.5. PRODUÇÃO INTEGRADA DE ETANOL DE SEGUNDA GERAÇÃO**

Este modelo proposto trata da produção de bioetanol a partir de materiais celulósicos (no caso, bagaço e palha da cana-de-açúcar) integrado ao modelo vigente e convencional de produção de bioetanol a partir da cana.

É possível utilizar esses materiais celulósicos de maneira mais eficiente. Por exemplo, o bagaço já presente na cadeia produtiva do etanol 1G funcionaria como matéria-prima para a produção de etanol 2G, utilizando parte da própria infra-estrutura da produção convencional 1G (DIAS et al., 2009).

Neste novo modelo esquematizado na Figura 9, está representado a integração entre a produção de bioetanol 1G e 2G, já com o tratamento da vinhaça para produção de biogás.



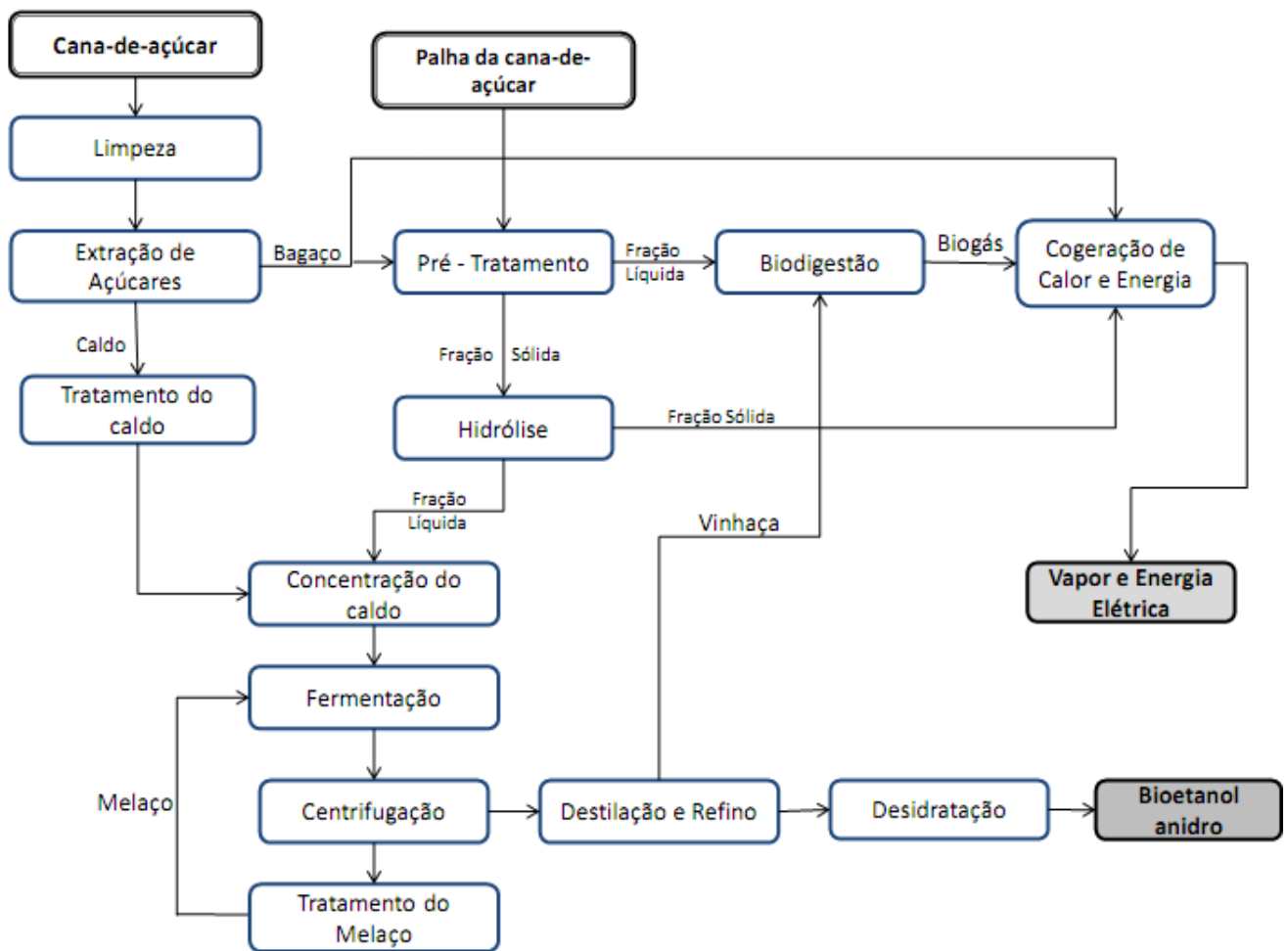


Figura 9. Esquema de processos integrados da produção de bioetanol 1G e 2G com uso da vinhaça para produção de biogás. Adaptado de Dias et al. 2012.

É possível notar que, como previamente esclarecido, parte do bagaço ainda é utilizado na cogeração de energia, visto que o biogás resultante da biodigestão da vinhaça não é suficiente para alimentar toda a necessidade de energia elétrica e vapor que demandam os processos.

## 5. ANÁLISES E DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

A integração dos processos de produção do bioetanol 1G e 2G certamente melhora e aumenta a produtividade de etanol em termos de volume de etanol por área plantada de cana-de-açúcar (L/ha) e, obviamente, também em termos de volume de etanol por tonelada de cana processada (L/TC).

Ademais, ao se produzir mais etanol nos processos integrados de produção de bioetanol 2G, mais vinhaça é gerada, aumentando, por conseguinte, a quantidade de biogás e o potencial energético para os processos internos.

Na Tabela 7 estão dispostos alguns parâmetros que foram adotados para os novos processos. Também é possível observar os resultados finais de interesse, que foram simulados para as produções do bioetanol 1G e 2G, isoladas e integradas. Alguns dados foram fornecidos pelo CTBE e não foram ainda divulgados em nenhum material.

É interessante ressaltar que a fração do total de bagaço 50% úmido (produzido nos processos de produção do bioetanol 1G) determina a quantidade a ser produzida de bioetanol 2G. Para o cenário em que os dados da Tabela 7 foram gerados, apenas 30% do total de bagaço 50% úmido foi excedente e disponibilizado para a produção do etanol 2G.

Em tese, quanto mais etanol (1G ou 2G) produzido mais vinhaça é gerada, mais biogás pode ser produzido, e menos bagaço será utilizado no processo de cogeração, liberando este último para aumentar a produtividade de bioetanol 2G, até atingir um limite em que se consiga produzir o máximo de bioetanol por tonelada de cana-de-açúcar sem que se aumente a área plantada. É um ciclo que se retroalimenta e pode ser influenciado por fatores externos que alteram o total de cana-de-açúcar que pode ser

processada e os totais produzidos de cada subproduto da cana-de-açúcar (vinhaça, bagaço, bioetanol 1G e 2G).

**Tabela 6. Parâmetros e resultados obtidos das produções isoladas de bioetanol 1G e 2G e da produção integrada 1G+2G com uso de biogás na cogeração de energia e calor. Adaptado de Moraes et al. (2014)**

<b>Dados base (comuns a ambos os modelos em um ano)</b>	
Safra (dias)	167
Área plantada de cana (ha)	23500
Produção de cana (TC/safra)	2000000
Produção de bagaço 50% umidade (TB/safra)	547700
Excedente de bagaço 50% úmido utilizável (Tbu) <sup>1</sup>	164310
Produtividade de vinhaça (litros de vinhaça/litros de etanol)	9,8
Produtividade de biogás (m <sup>3</sup> /litros de vinhaça)	0,013853856
Produtividade de eletricidade na cogeração (kWh/m <sup>3</sup> de biogás)	1,503448276
Emissões evitadas de CO <sub>2</sub> por volume de biogás (tCO <sub>2eq</sub> /m <sup>3</sup> )	0,01386207
<b>Produção de bioetanol 1G isolada (por ano)</b>	
Consumo de eletricidade (kWh/TC)	21,1
Consumo de eletricidade 1 (kWh)	42200000
Produtividade de etanol 1G (litros/TC)	53,4
Total de etanol 1G produzido (litros)	106800000
<b>Produção de bioetanol 2G isolada (por ano)</b>	
Consumo de eletricidade (kWh/TBu) <sup>2</sup>	24
Cosumo de eletricidade 2 (kWh)	3943440
Produtividade de etanol 2G (litros/TBu) <sup>1</sup>	120
Total de etanol 2G produzido (litros)	19717200
<b>Produção de bioetanol integrada 1G+2G (por ano)</b>	
Total de bioetanol produzido (litros)	126517200
Total de vinhaça produzida (litros)	1239868560
Total de biogás produzido (m <sup>3</sup> )	17176960,49
Total de eletricidade cograda pelo biogás (kWh)	25824671,63
Consumo total de eletricidade (kWh)	46143440
Necessidade de cogeração com uso do bagaço (kWh)	20318768,37
Emissões de CO <sub>2</sub> evitadas pelo uso de biogás (tCO <sub>2eq</sub> )	238108,2287
Produtividade final de bioetanol (litros/TC)	63,2586
Produtividade final de bioetanol (litros/ha)	5383,710638

ha = Hectare; TC = Tonelada de cana-de-açúcar processada;

TBu = Tonelada de bagaço com 50% de umidade excedente e utilizável para a produção de bioetanol 2G;

tCO<sub>2eq</sub> = Tonelada de CO<sub>2</sub> equivalente

<sup>1</sup>: Dados fornecidos pelo CTBE (2013)    <sup>2</sup>: Dados fornecidos por Dias et al. (2013)

## 5.1. AVALIAÇÃO ENERGÉTICA

Os resultados obtidos em termos de energia potencial do biogás para transformação em eletricidade foram avaliados e comparados com a geração de eletricidade em usinas hidrelétricas, que representam a fonte de energia mais comum no Brasil.

O total de energia que pode ser produzida anualmente pelo biogás na cogeração de eletricidade em uma única usina anexa com produção integrada de bioetanol 1G e 2G, foi de aproximadamente 25,8 GWh (Tabela 7). Este valor chega a 69,23% da produção total de eletricidade para o ano 2011 nas oito usinas hidrelétricas que integram o grupo Furnas, que foi de 37,268 GWh (Relatório Anual – Eletrobras Furnas, 2011).

Outro fator comparativo interessante sugerido por Moraes et al. (2014) é que o potencial energético do biogás ( $2,15 \times 10^3$  MWh por mês) pode ser comparado ao consumo mensal de uma cidade brasileira de 50 mil habitantes, ao levar-se em consideração o consumo médio doméstico de eletricidade *per capita* no Brasil sendo 0,038 MWh por mês (ACHÃO e SCHAEFFER, 2009).

## 5.2. AVALIAÇÃO AMBIENTAL

A aplicação de vinhaça (quantidade referente apenas à produção de bioetanol 1G) *in natura* nos solos feita por uma usina anexa resulta, de acordo com os resultados obtidos na BVC e apresentados por Moraes et al. (2014), em uma carga poluente de aproximadamente  $2,7 \times 10^6$  habitantes, podendo ser equivalente ou superior a cidades como Salvador ( $2,7 \times 10^6$  habitantes) e Brasília ( $2,6 \times 10^6$  habitantes), a terceira e a quarta maiores cidades brasileiras, respectivamente (Instituto Brasileiro de Geografia e

Estatística (IBGE), 2010). Este alto valor poderia ser mitigado com o tratamento da vinhaça anterior ao seu lançamento nos solos para fertirrigação.

Outro fator importante foi relatado por Carmo et al. (2012), em que a aplicação da vinhaça *in natura* nos solos para a fertirrigação da cana-de-açúcar aumentou as emissões acumuladas de N<sub>2</sub>O em uma base anual, se comparada com a aplicação de fertilizantes inorgânicos. Assumindo que a vinhaça biodigerida é similar ao fertilizante inorgânico, já que quase toda sua matéria orgânica foi biodegradada, pode-se considerar que a sua aplicação nos solos resultaria em emissões de N<sub>2</sub>O similares às emissões de N<sub>2</sub>O dos fertilizantes inorgânicos, equivalendo em uma economia anual nas emissões deste gás.

Moraes et al. (2014), contudo, ressaltam que, mesmo que existam trabalhos que demonstrem economia nas emissões de N<sub>2</sub>O, urge que estudos e experimentos sejam realizados no campo em questão.

### **5.3. AVALIAÇÃO ECONÔMICA**

O cenário avaliado economicamente foi restrito ao potencial de etanol 2G que pode ser produzido e vendido anualmente frente aos investimentos necessários para a infra-estrutura dos novos processos. Ademais, foi avaliado o potencial de produção de biogás (a ser utilizado para a cogeração de eletricidade e calor) a partir da vinhaça frente aos investimentos que tais processos requerem, conforme Tabela 8.

Tabela 7. Análise de investimentos, custos e receita

Preço litro de etanol 2G (USD) <sup>a</sup>	0,48
Investimentos necessários para viabilizar a produção de etanol 2G (USD) <sup>b</sup>	75000000,00
Receita anual da venda de bioetanol (2G apenas)	9464256,00
Valor da tCO <sub>2</sub> eq (USD/tCO <sub>2</sub> eq) <sup>a</sup>	17,42
Custo anual para infra-estrutura, operação e manutenção da planta de biodigestão da vinhaça <sup>a</sup> (USD)	260961,00
Receita da venda anual de créditos carbono (USD)	4146654,80

a: Moraes et al. (2014)

b: CGEE (2009)

Como já mencionado, os dados relacionados aos investimentos e custos necessários para viabilização e operação do modelo decorrem de estudos ainda incipientes na área.

As emissões evitadas pelo uso da vinhaça biodigerida como fertilizante e pelo uso do biogás na geração de energia trouxeram ganhos econômicos devido ao total de créditos de carbono acumulados, que giraram em torno de 238.108 tCO<sub>2</sub>eq. A partir desta avaliação econômica específica, os valores monetários que seriam lucrados com a comercialização de créditos de carbono foram mais que suficientes para cobrir custos anuais de operação e manutenção da infra-estrutura necessária ao processo de biodigestão anaeróbia, que são estimados em US\$260.961,00 para uma usina anexa (MORAES et al. 2014).

O total da renda da venda do etanol 2G (hidratado) também foi calculado e girou em torno de  $9,4 \times 10^6$  USD, dada a produção anual de 19.717.200 litros.

A partir desses dados, construiu-se um gráfico que avalia o fluxo de caixa do investimento e da receita realizados ao longo dos anos. É possível observar (Figura 10) que o *payback* deve ocorrer na passagem do quinto para o sexto ano, confirmando também a viabilidade e atratividade econômica para a realização destes investimentos.

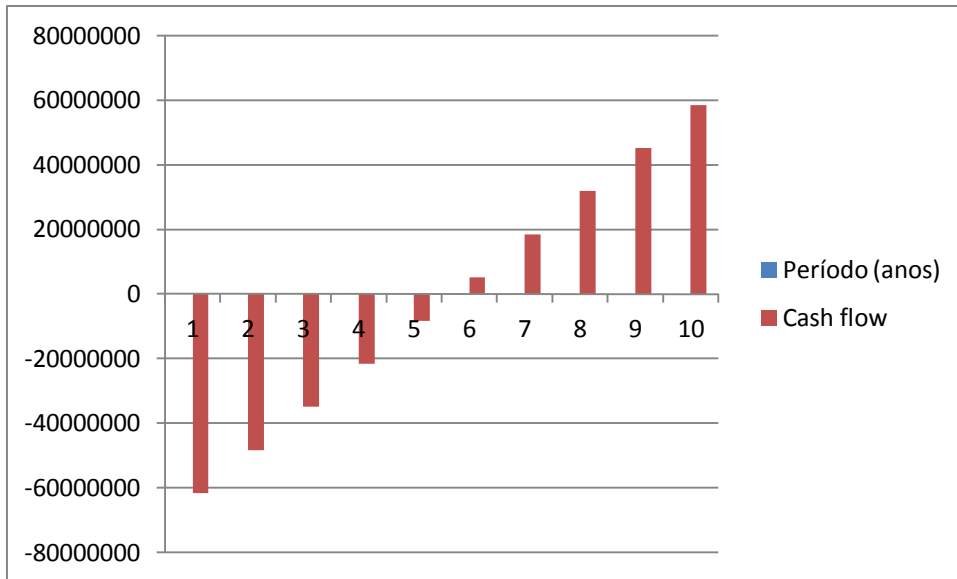


Figura 10. Fluxo de caixa da receita e investimentos necessários para a biodigestão da vinhaça e produção de etanol 2G.

## 6. CONCLUSÃO

Avaliações feitas com base em um conjunto de dados simulados para um novo modelo de produção de bioetanol de primeira e segunda geração a partir da cana-de-açúcar foram realizadas. Os resultados obtidos foram analisados e então foi possível afirmar que a adoção deste modelo proposto traz benefícios na direção de um desenvolvimento mais sustentável, quando se comparado ao modelo vigente de produção de bioetanol.

A redução nas emissões de GEEs foi consideravelmente alta, e representa um ganho no caminho da mitigação de impactos ambientais e seus possíveis efeitos colaterais a que estão sujeitos os meios locais. Da mesma forma, o aumento na produtividade de etanol e o melhor aproveitamento dos potenciais energéticos da cana-de-açúcar e seus subprodutos (principalmente o bagaço e a vinhaça) mostram que é possível extrair mais benefícios do que se tem na atualidade.

Por último, e não menos importante, uma simples análise econômica da possível comercialização de créditos carbono e de uma maior quantidade de etanol foi simulada de modo a despertar a atenção dos produtores brasileiros de etanol e de modo a comprovar a viabilidade de ganhos financeiros com a implementação deste novo modelo sugerido.

Do ponto de vista de um balanço global, este modelo pode potencializar lucros de perspectivas ambientais, energéticas e econômicas, otimizando as usinas em termos de sustentabilidade.



## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACHÃO, C., SCHAEFFER, R.. *Decomposition analysis of the variations in residential electricity consumption in Brazil for the 1980–2007 period: measuring the activity, intensity and structure effects*. Energy Policy 2009;37:5208–20.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). *Evolução do mercado de combustíveis e derivados: 2000 – 2012*. Estudo Temático 01/2013/SPD. Fev. 2013

BIOETANOL, Campinas. Disponível em: <http://www.bioetanol.org.br/>. Acessado em 23/10/2013.

CARMO, J. B., FISOLO, S., ZOTELLI, L. C., SOUSA NETO, E. R., PITOMBO, L. M., DUARTE-NETO, P. J.. *Infield greenhouse gas emissions from sugarcane soils in Brazil: effects from synthetic and organic fertilizer application and crop trash accumulation*. Glob Change Biol Bioenergy 2012; 5: 267-80.

CATRACALIVRE (2013), São Paulo. Disponível em: [http://catracalivre.com.br/wp-content/uploads/2013/04/67312\\_ext\\_arquivo.jpg](http://catracalivre.com.br/wp-content/uploads/2013/04/67312_ext_arquivo.jpg). Acessado em 30/10/2013.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS (CGEE), 2009. *Bioetanol combustível: uma oportunidade para o Brasil*. Disponível em: <http://www.cgee.org.br/publicacoes/bietanol.php>. Acessado em 30/10/2013.

CHERUBINI, F.. *The biorefinery concept: Using biomass instead of oil for producing energy and chemicals*. Energy Conversion and Management. 2010. 51: 1412 – 1421.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, 2011. *A Geração Termoelétrica com a Queima do Bagaço de Cana-de-Açúcar no Brasil. Análise do Desempenho da*

safra de 2009-2010. Brasília: CONAB; 2011. 160 p.

[http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/11\\_05\\_05\\_15\\_45\\_40\\_geracao\\_termo\\_baixa\\_res..pdf](http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/11_05_05_15_45_40_geracao_termo_baixa_res..pdf). Acesso em 30/10/2013.

COPERSUCAR, Piracicaba. Disponível em: <http://www.copersucar.com.br/>. Acessado em 23/10/2013

DIAS, M. O. S., ENSINAS, A. V., NEBRA, S. A., MACIEL FILHO, R., ROSSELL, C. E. V., MACIEL, M. R. W., 2009. *Production of bioethanol and other bio-based materials from sugarcane bagasse: integration to conventional bioethanol production process*. **Chemical Engineering Research and Design** 87, p. 1206–1216, 2009.

DIAS, M. O. S., CUNHA, M. P., FILHO, R. M., BONOMI, A., JESUS, C. D. F., ROSSELL, C. E. V. (2011), *Simulation of integrated first and second generation bioethanol production from sugarcane: comparison between different biomass pretreatment methods*. **Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology**, v. 38, ed. 8, p. 955-966, ago. 2011.

DIAS, M. O. S., JUNQUEIRA, T. L., CAVALETT, O., CUNHA, M. P., JESUS, C. D. F., ROSSELL, E. V., FILHO, R. M., BONOMI, A., (2012) . *Integrated versus stand-alone second generation ethanol production from sugarcane bagasse and trash*. **Bioresource Technology**, n. 103, p. 152-161, jan. 2012.

DIAS, M. O. S., JUNQUEIRA, T. L., CAVALETT, O., PAVANELLO, L. G., CUNHA, M. P., JESUS, C. D. F., FILHO, R. M., BONOMI, A. (2013). *Biorefineries for the production of first and second generation ethanol and electricity from sugarcane*. **Applied Energy**, 109, p. 72 – 78. Abr. 2013.

DONES, R., BAUER, C., BOLLIGER, R., BURGER, B., FAIST EMMERNEGGER, M., FRISCHKNECHT, R.. *Life cycle inventories for energy systems: Results for current energy systems in switzerland and other UCTE countries*. Ecoinvent report No. 5. Paul Scherrer Institut Villigen, Swiss Centre for Life Cycle inventories, Dübendorf, Switzerland. 2007.

ELLIOT, J. A. (1994). *An Introduction to Sustainable Development: the developing world*. London & New York, Routledge.

ENSINAS, A.V., NEBRA, S.A., LOZANO, M.A., SERRA, L.M, 2007. *Analysis of process steam demand reduction and electricity generation in sugar and ethanol production from sugarcane*. **Energy Conversion and Management**, 48, 2978–2987.

HASSUANI, S.J., LEAL M.R.L.V., MACEDO I.C. (eds), 2005. *Biomass Power Generation-Sugarcane Bagasse and Trash*. CTC and PNUD, Piracicaba.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Cidades, Disponível em <http://cidades.ibge.gov.br/>. Acessado em 31/10/2013.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. *IPCC fourth assessment report*. The Physical Science Basis; 2007. Disponível em <http://www.ipcc.ch/ipccreports/ar4wg1.htm>. Acessado em 24/10/2013.

LEITE, L. F. Considerações sobre as estratégias público-privadas para o desenvolvimento de biorrefinarias. **Agroenergia Em Revista**, Brasília, n. 4, p. 7-9, mai. 2012.

LETTINGA, G., HAANDEL, A. C. V., 1993. *Anaerobic digestion for energy production and environmental protection*. In: Johansson, T.B., Kelly, H., Reddy,

A.K.N., Williams, R.H. (Eds.), *Renewable Energy Sources for Fuels and Electricity*. Island Press, Washington, p. 817–840.

MENEZES, T. J. B. (1980). *Etanol, o Combustível do Brasil*. São Paulo, Editora Agronomica Ceres.

METCALF & EDDY, Inc. *Wastewater engineering: treatment, disposal, reuse*. 3<sup>rd</sup> ed, New York: McGraw-Hill, p. 1819, 2003.

MIGUEL, P. A. C., FLEURY, A., MELLO, C. H. P., NAKANO, D. N., TURRIONI, J. B., HO, L. L., MORABITO, R., MARTINS, R. A., PUREZA, V.. (2010). *Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações*. Elsevier Editora Ltda., Rio de Janeiro, p. 165 – 192.

MORAES, B. S., JUNQUEIRA, T. L., PAVANELLO, L. G., CAVALETT, O., MANTELATTO, P. E., BONOMI, A., ZAIAT, M., 2014. *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, jan. 2014.

MOSCADOEESTABULO (2009). Disponível em <http://moscadoestabulo.blogspot.com.br/2009/06/mosca-do-estabulo.html>. Acessado em [30/10/2013](#). Acessado em 30/10/2013.

NATUREAMBIENTAL (2013). Disponível em: <http://www.natureambiental.com.br/site/plano-de-aplicacao-de-vinhaca-pav/>. Acessado em 30/10/2013.

ODUM, E. P., **Fundamentals of Ecology**. 3<sup>rd</sup> Edition, Philadelphia: W. B. Saunders Company, 1971. 574 p.

OMETTO, A. R., **Avaliação do ciclo de vida do álcool etílico hidratado combustível pelos métodos EDIP, exergia e emergia**. 2005. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

PROCKNOR, C., Energia elétrica a partir da vinhaça. Revista da Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil. 2009. Disponível em: <http://www.unica.com.br/convidados/25641156920337715081/energia-eletrica-a-partir-da-vinhaca/>. Acessado em 25/10/2013.

RABELO, S. C., CARRERE, H., MACIEL FILHO, R., COSTA, A. C., 2011. *Production of bioethanol, methane and heat from sugarcane bagasse in a biorefinery concept*. Bioresource Technology. 102, p. 7887 – 7895.

SACHS, I. (1993). Estratégias de Transição para o Século XXI: Desenvolvimento e Meio Ambiente. São Paulo: Studio Nobel, Fundação do Desenvolvimento Administrativo (Cidade Aberta).

SALOMON, K. R., LORA, E. E. S., 2009. *Estimate of the electric energy generating potential for different sources of biogas in Brazil*. Biomass Bioenergy. 33, p. 1101–1107.

TAIZ, L.; ZEIGER, E., **Plant Physiology**. 3<sup>rd</sup> Edition, Porto Alegre: Artmed, 2004. p. 764.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DA CANA-DE-AÇÚCAR (ÚNICA), Estado de São Paulo. Disponível em: <http://www.unica.com.br/>. Acessado em out/2013.

VON SPERLING, M., CHERNICHARO, C. A. L.. Biological wastewater treatment in warm climate regions. Vol. 1, London: IWA Publishing; 2005, p. 24.