

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS
CAMPUS POÇOS DE CALDAS

CAROLINA MANOCHIO

**PRODUÇÃO DE BIOETANOL DE CANA-DE-AÇÚCAR, MILHO E
BETERRABA: UMA COMPARAÇÃO DOS INDICADORES
TECNOLÓGICOS, AMBIENTAIS E ECONÔMICOS.**

Poços de Caldas/MG
2014

CAROLINA MANOCHIO

**PRODUÇÃO DE BIOETANOL DE CANA-DE-AÇÚCAR, MILHO E
BETERRABA: UMA COMPARAÇÃO DOS INDICADORES TECNOLÓGICOS,
AMBIENTAIS E ECONÔMICOS.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como parte dos requisitos para a conclusão do
curso de Engenharia Química pela
Universidade Federal de Alfenas- *campus*
Poços de Caldas.

Orientadora: Renata Piacentini Rodriguez

Poços de Caldas/MG

2014

M268p

Manochio, Carolina .

Produção de Bioetanol de cana-de-açúcar, milho e beterraba: uma comparação dos indicadores tecnológicos, ambientais e econômicos. /Carolina Manochio.

Orientação de Renata Piacentini Rodriguez. Poços de Caldas: 2014.

33 fls.: il.; 30 cm.

Inclui bibliografias: fl. 31- 33

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) –

Universidade Federal de Alfenas– Campus de Poços de Caldas, MG.

CAROLINA MANOCHIO

**PRODUÇÃO DE BIOETANOL DE CANA-DE-AÇÚCAR, MILHO E
BETERRABA: UMA COMPARAÇÃO DOS INDICADORES
TECNOLÓGICOS, AMBIENTAIS E ECONÔMICOS.**

A Banca examinadora abaixo-assinada aprova a Dissertação apresentada como parte dos requisitos para a conclusão do curso de Engenharia Química pela Universidade Federal de Alfenas- *campus* Poços de Caldas.

Aprovada em:

Profa. Renata Piacentini Rodriguez

Instituição: Unifal-MG

Assinatura: 

Profa. Giselle Patrícia Sancinetti

Instituição: Unifal-MG

Assinatura: 

Dra. Bruna de Souza Moraes

Instituição: CTB

Assinatura: 

AGRADECIMENTOS

À Deus por estar presente perante todas as dificuldades.

À esta universidade e aos professores que auxiliaram, direta ou indiretamente, para que eu alcançasse meus objetivos.

À minha orientadora, Prof. Dra. Renata Piacentini Rodriguez, pela dedicação constante e por nunca me deixar desistir.

Aos meus pais, Seli e Agnaldo, e ao meu irmão Rafael pelo amor, carinho e apoio incondicional.

Aos meus familiares, tios, primos e avós pela constante torcida por minhas vitórias.

À todos os meus amigos, de longe e de perto, em especial minhas irmãs da Cheia de Graça, pela amizade e companheirismo.

À Bruna de Souza Moraes que, mesmo conhecendo a pouco, dedicou um minuto do seu tempo a este trabalho e ao planejamento do próximo.

À minha amiga Bárbara Andrade que começou esta jornada comigo e mesmo de longe ainda me apoiou para a concretização deste trabalho.

À todas estas pessoas, o meus mais sinceros agradecimentos.

RESUMO

Os biocombustíveis, como o etanol, vêm sendo empregados com o objetivo de substituir combustíveis de origem fóssil, trazendo benefícios ao meio ambiente não só pela preservação desses recursos, como também pela redução de gases que causam o efeito estufa. O etanol pode ser produzido a partir de matérias-primas amiláceas como o milho, celulósicas como o bagaço da cana e sacaríneas como a beterraba, sendo a cana-de-açúcar a mais utilizada no Brasil. O processo de produção deste combustível se dá, tanto para a cana-de-açúcar como para a beterraba, através da extração da sacarose, fermentação e destilação para a obtenção de etanol hidratado. Para a produção a partir do milho exige-se uma etapa a mais, pois os açúcares não estão presentes de forma direta na matéria-prima. Dentre as matérias-primas utilizadas, a cana-de-açúcar apresenta inúmeras vantagens, entre elas o rendimento por área plantada, que alcança 10.800 l/ha. Logo após está beterraba, com valores de rendimento de até 10.000 l/ha. Apesar de ser produzido até 460 litros de etanol por tonelada de milho, esta matéria-prima não apresenta a mesma vantagem da cana quanto ao rendimento, atingindo no máximo 4.600 l/ha. Além disso, o balanço energético referente ao etanol de cana-de-açúcar é o mais favorável, com ciclo de vida de 9,4, e reduções de gases do efeito estufa de até 89%. No caso do milho, apesar de ser a biomassa utilizada pelo país líder mundial em produção de etanol, apresenta balanço energético e redução de emissão de carbono de pouca significância. A beterraba, por sua vez, reduz as emissões de carbono em até 56%; porém, seu ciclo de vida também é modesto, em torno de 1,2 se contabilizados os co-produtos. O sistema de cogeração de energia nas biorrefinarias de cana-de-açúcar com o uso de palha e bagaço é mais um ganho da utilização desta matéria-prima na produção de etanol, pois apesar da grande quantidade de resíduos gerados na colheita do milho e da beterraba, estas biomassas não utilizam esta tecnologia, optando por utilizar os resíduos para fertilizar a terra. Quanto aos custos de produção, a cana-de-açúcar prevalece vantajosa, aproximadamente U\$ 0,25, seguido do milho com cerca de U\$ 0,28. A beterraba é a matéria prima mais cara para a produção do biocombustível, uma vez que os custos chegam à U\$ 0,76. Embora se saiba que o tipo de cultura utilizada para a produção do etanol está relacionado às condições climáticas de cada região, este estudo deixa claro as vantagens da cana-de-açúcar sob as demais biomassas apresentadas.

Palavras-chave: Etanol. Cana-de-açúcar. Milho. Beterraba. Balanço energético. Emissão de carbono.

ABSTRACT

Biofuels, like ethanol, has been employed in order to replace fossil fuels, bringing benefits to the environment not only for the preservation of these resources, as well as the reduction of gases that cause the greenhouse effect. Ethanol can be produced from raw materials such as corn starch, cellulose such as sugarcane bagasse and saccharíneas as beet, with cane sugar, the most used in Brazil. The production process of this fuel is done, either for sugarcane and sugarbeet by sucrose extraction, fermentation and distillation to obtain hydrous ethanol. Production from corn requires a step further, because the sugars are not presented directly in the raw material. Among the raw materials used, sugarcane has many advantages, including yield per planted area, which reaches 10,800 l/ha. Sugarbeet comes next with yield values of up to 10,000 l/ha. Even producing up to 460 gallons of ethanol per ton, corn does not have the same advantage as the sugarcane yield, reaching a maximum of 4,600 l/ha. Moreover, the energy balance of ethanol related to sugarcane is the most favorable, with life cycle of 9.4, and GHG reductions of up to 89%. Despite being the world leading in ethanol production, corn biomass presents energy balance and reduction of carbon emissions of little significance. Sugarbeet, in turn, reduces carbon emissions by up to 56%, but its energy relationship is also modest, around 1,2 if accounted the co-products. The power cogeneration system in sugarcane biorefineries is a gain from the use of this raw material in the production of ethanol, because despite the large amount of waste generated in the harvest of corn and beets, these biomasses do not use this technology, opting to use the waste to fertilize the land. In term of costs of production, sugarcane prevails, about U\$ 0.25, followed by corn with about U\$ 0.28. Sugarbeet is the most expensive for the production of biofuel, since the costs reach U\$ 0.76. Although it is known that the type of crop used for ethanol production is related to the climatic conditions of each region, this study makes clear the advantages of sugarcane in the remaining presented biomass.

Keywords: Ethanol. Sugar Cane. Corn. Beet. Energy Balance. Carbon Emission.

SUMÁRIO

1.	Introdução	6
2.	Objetivos	7
3.	Ciclo produtivo: estudo comparativo	7
3.1.	Processo de produção	7
3.1.1.	O etanol de cana-de-açúcar	7
3.1.2.	O etanol de milho	11
3.1.3.	O etanol de beterraba	13
3.2.	Produtividade comparativa da cana-de-açúcar, beterraba e milho	14
3.3.	O etanol de 2ª geração	18
3.4.	A utilização de fertilizantes	19
4.	Avaliação energética	20
4.1.	Demanda energética e o sistema de cogeração	20
4.2.	Balço energético	22
5.	Avaliação ambiental: as emissões de carbono	25
6.	Análise econômica	27
7.	Conclusão	28
8.	Referências	29

1. Introdução

O etanol é um álcool composto por um único tipo de molécula (C_2H_5OH) e é utilizado como combustível considerado ecologicamente correto, pois o cultivo de sua matéria-prima reduz a quantidade de gás carbônico na atmosfera através da fotossíntese (PETROBRAS, 2013).

Hoje em dia, no Brasil, consome-se uma quantidade de etanol que representa metade da gasolina que seria utilizada. Esse sucesso é derivado de dois fatores fundamentais: a ampla cobertura geográfica e a comercialização do etanol hidratado e da gasolina C (gasolina comum com adição de álcool etílico anidro) por todos os postos de combustíveis do país.

A expansão e popularização do etanol no Brasil começaram em 1975 com a criação do Proálcool – Programa Nacional do Álcool, que visava à diminuição da dependência do petróleo pelo país. Porém, com o aumento da produção interna de petróleo e o decréscimo de seus preços internacionais, a gasolina ganhou competitividade perante o etanol hidratado (BNDES; CGEE, 2008).

A partir de 2001, passou a prevalecer a livre competição entre os produtores, uma vez que o mercado no Brasil foi totalmente desregulamentado. Em 2002, o etanol voltou ao mercado competitivo devido à alta nos preços internacionais do petróleo (LEITE; LEAL, 2007).

É importante salientar que o etanol pode ser produzido a partir de matérias-primas que contenham amido ou açúcares. 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 à altas temperaturas. No caso das matérias-primas açucareiras, como é o caso da cana-de-açúcar e beterraba, os açúcares já estão disponíveis na biomassa, sendo necessária apenas a extração destes para a produção do biocombustível.

O etanol tem uma importância ambiental muito relevante, pois além de ser produzido a partir de uma matéria-prima renovável, gerar empregos na cadeia sucroalcooleira e novas oportunidades de negócios, o etanol também reduz a emissão de gases para a atmosfera, o que é uma preocupação mundial atualmente (SEBRAE, 2013).

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 (ASSEMBLEIA LEGISLATIVA DO ESTADO DE GOIÁS, 2009).

Porém, destaca-se que a produção de etanol, via qualquer fonte, só é considerada economicamente vantajosa, em comparação com a gasolina, quando o preço do barril de petróleo for superior a 40 dólares (KOHLHEPP, 2010). Para os consumidores, para que o etanol seja viável economicamente nos veículos *Flex-fuel*, a relação em quilometragem é de 0,7 litro de gasolina por litro de etanol, caso contrário, ainda é mais vantajoso comprar a gasolina como combustível (LEITE; LEAL, 2007).

Diante desse contexto, esse trabalho visou comparar, do ponto de vista tecnológico, energético, ambiental e econômico, a produção de etanol a partir das fontes mais comumente utilizadas: cana, beterraba e milho.

2. Objetivos

O desenvolvimento deste trabalho teve como objetivos:

- Estudar e comparar os processos de produção do etanol a partir da cana-de-açúcar, do milho e da beterraba, destacando suas diferenças;
- Fazer uma comparação do balanço energético, em termos de eficiência, dos processos de produção das três principais matérias-primas;
- Analisar quantitativamente a emissão de CO₂ equivalente em cada um dos processos e compará-los em relação à problemática do impacto sobre a camada de ozônio e em termos de sustentabilidade.

3. Ciclo produtivo: estudo comparativo

3.1. Processo de produção

3.1.1. O etanol de cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar, muito cultivada no Brasil, é uma planta semiperene da família das gramíneas. A sacarose se concentra nos colmos, que compõe a parte aérea da planta enquanto a palha da cana está em suas pontas e folhas, como mostra a Figura 3.1. (BNDES; CGEE, 2008).

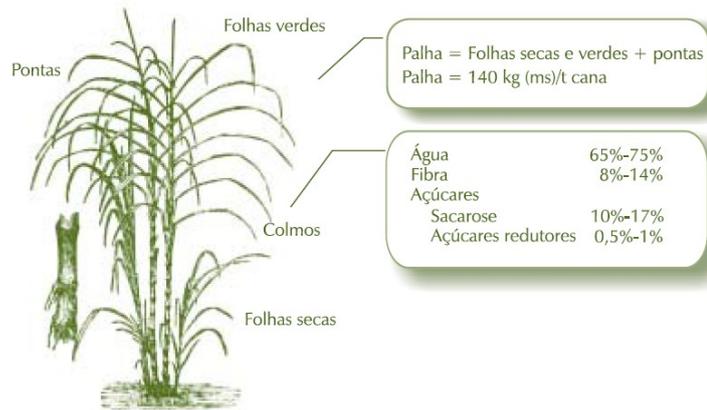


Figura 3.1. Estrutura da cana-de-açúcar.
Fonte: BNDES e CGEE (2008)

A sacarose é um açúcar que possui uma estrutura composta por glicose e frutose através de uma ligação glicosídica, formando um dissacarídeo, como é mostrado na Figura 3.2 (AMABIS; MARTHO, 2004).

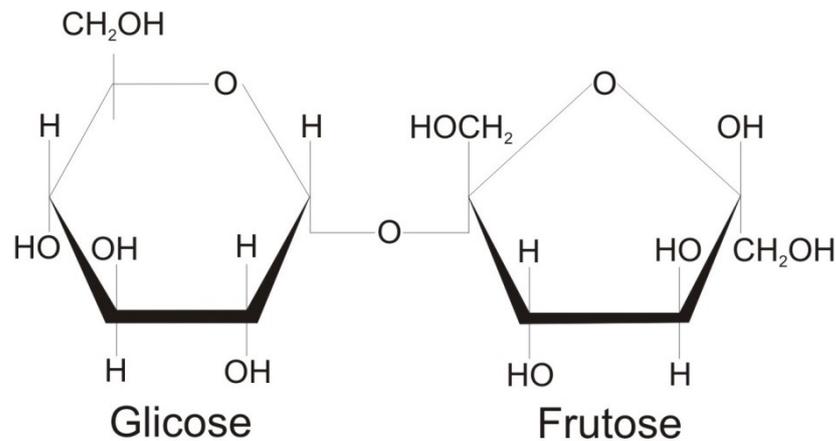


Figura 3.2. Estrutura da sacarose.
Fonte: Amabis e Martho (2004).

No Brasil, foram produzidos mais de 7 milhões de hectares de cana-de-açúcar nos anos de 2006 e 2007 graças ao seu clima privilegiado, correspondendo a cerca de 42% do total produzido no mundo. Desta forma, nos anos referenciados, o Brasil ficou em 1º lugar em produção de cana-de-açúcar, mas em 2º lugar em produção de etanol, atrás dos EUA com etanol a partir do milho (UNICA,2007).

A produção de etanol por base de açúcares, como é o caso da cana-de-açúcar, é mais simples do que quando comparada com a produção por meio de materiais amiláceos, como o trigo e o milho, e celulósica, como o bagaço da cana. Nos caso de matérias amiláceas ou

celulósicas, como observado na Figura 3.3, há a necessidade da transformação da matéria prima em açúcares simples por ações enzimáticas, enquanto na cana os açúcares já estão disponíveis na biomassa (BNDES; CGEE, 2008).



Figura 3.3. Diferentes rotas tecnológicas para a produção do etanol.
Fonte: BNDES e CGEE (2008) alterada.

No Brasil, o sistema tradicional de colheita é dado pela queima prévia do canavial e também pelo corte da cana inteira de forma manual. De acordo com BNDES e CGEE (2008), a restrição ambiental relacionada ao processo de queima impulsionou a substituição desse pelo sistema mecanizado da cana crua picada, ou seja, sem queima.

O transporte da cana-de-açúcar até as usinas é realizado predominantemente por caminhões através do transporte rodoviário. Este deve ocorrer logo após o corte da cana para evitar perdas na sacarose (BNDES; CGEE, 2008).

O processo produtivo do etanol inicia-se logo com a chegada da matéria prima à indústria, onde amostras de cana são colhidas e levadas para análise. A cana é então lavada para a eliminação de terra e impurezas e conduzida para a realização do preparo básico, que visa aumentar sua densidade e capacidade de moagem, de modo que as células se rompam ao máximo para a liberação do caldo (PAYNE, 1989).

A extração do caldo pode ser realizada por difusão ou, mais usualmente empregado, por moendas. O bagaço proveniente deste processo ainda contém uma quantidade de caldo que é constituído por água e sólidos voláteis. Assim, muitas vezes é empregado o processo de embebição, que consiste em adicionar água ou mesmo o caldo diluído ao bagaço entre uma

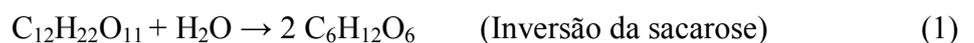
moenda e outra, com a finalidade de diluir a sacarose que ainda exista neste bagaço (SANTOS, 2010). O bagaço remanescente é levado para a planta de energia da indústria para ser utilizado para a co-geração combustível através de sua queima (BNDES; CGEE, 2008).

O caldo proveniente das moendas ou dos difusores deve ser submetido a um peneiramento a fim de eliminar impurezas grosseiras. Esta etapa é importante considerando que não deve haver sobrecarga nas etapas de decantação e filtração (PROENG, 2010). Além disso, o caldo deve ser encaminhado para tratamento com agentes químicos que visam a coagulação da matéria coloidal, correção do pH e a precipitação de algumas impurezas (ANDRADE; CASTRO 2006).

A produção de etanol utilizando cana-de-açúcar como matéria prima pode dar-se através da fermentação do caldo da cana de forma direta ou de misturas de caldo e melaço, este proveniente da produção do açúcar. Tal mistura é frequentemente utilizado no Brasil, visto que a maioria das usinas no país produzem açúcar e etanol na mesma unidade (BNDES; CGEE, 2008).

O mosto, antes de chegar à fermentação, deve ser aquecido a temperatura de até 105°C para a eliminação de alguns microrganismos contaminantes. O restante das impurezas é removido através de decantação para a obtenção de um caldo mais limpo e que não suje, demasiadamente, as colunas de destilação. Em seguida, o mosto deve passar por resfriamento para que sua temperatura esteja a aproximadamente 30°C para ser enviado às dornas de fermentação (ALCARDE, 2007).

Nas dornas são adicionados microrganismos (geralmente fungos unicelulares da espécie *Saccharomyces cerevisiae*), chamados de “levedo”, “pé-de-cuba” ou “fermento”. 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 observada a seguir (DUARTE, LOURENÇO; RIVEIRO, 2006):



O processo de fermentação denominado Melle-Boinot é o mais utilizado no Brasil. Baseia-se na recuperação de leveduras do vinho através da centrifugação, que serão tratadas para serem empregadas em um novo uso ou serem recicladas no processo, enquanto o vinho segue para as colunas de destilação. A destilação do vinho pode dar origem a vários

subprodutos, como a vinhaça, responsável por graves problemas ambientais, e o óleo fúsel. (ALCARDE, 2007).

O biocombustível resultante da destilação encontra-se na forma hidratada, uma mistura binária álcool-água. Segundo BNDES e CGEE (2008), este etanol alcança um teor de 96° GL (porcentagem em volume), que corresponde a 6% de água em peso devido à formação de uma mistura azeotrópica. O bioetanol hidratado pode ser utilizado como produto final, comercializado nos 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).

O etanol anidro possui pelo menos 99,6°GL, e é amplamente utilizado na indústria química como matéria prima para a fabricação dos ésteres e dos éteres, de solventes, tintas e vernizes, de cosméticos, de pulverizadores. Além disso, também é utilizado como aditivo em combustíveis, segundo a Portaria n° 143 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA, 2007), que afirma que toda gasolina vendida no Brasil deve conter 25% de etanol combustível anidro.

3.1.2. O etanol de milho

O milho, que assim como a cana-de-açúcar é uma planta da família das gramíneas, é originado do México e vem sendo cultivado em todos os continentes. O cultivo desta planta ocupa cerca de 147 milhões de hectares em todo o mundo e é considerado um componente alimentício de grande importância. A estrutura do milho, assim como sua composição estão presentes na Figura 3.4 (BNDES; CGEE, 2008).

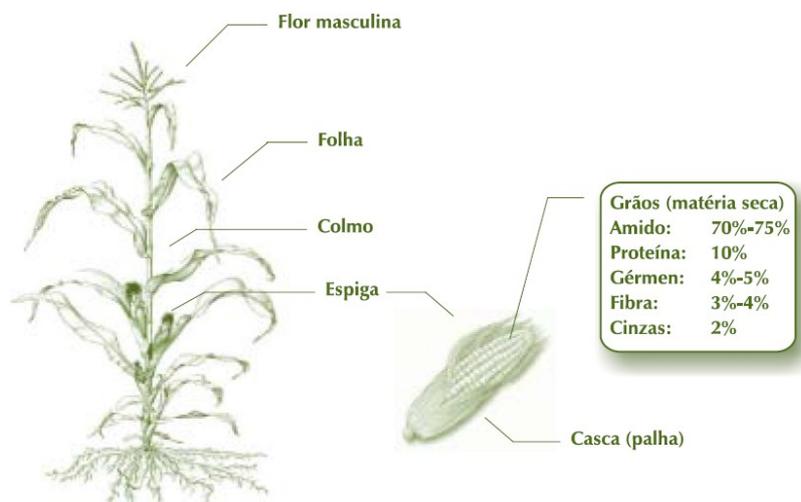


Figura 3.4. Estrutura do milho.
Fonte: BNDES e CGEE (2008)

O processo fotossintético do milho tem como produto final o amido (Figura 3.5), que constitui sua reserva de carbono. É este amido, que através da hidrólise, produzirá a sacarose que será fermentada para a produção de etanol (AMABIS; MARTHO, 2004).

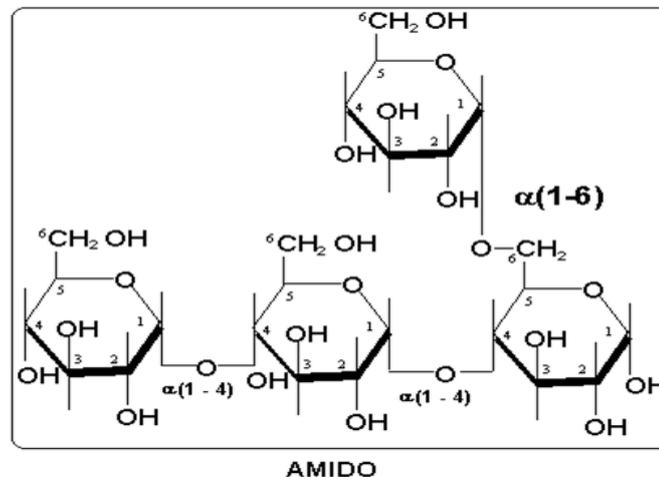


Figura 3.5. Estrutura do amido.
Fonte: Amabis e Martho (2004).

Os Estados Unidos (EUA) é responsável por mais de um terço da produção mundial, produzindo etanol a partir do milho (LEITE; LEAL, 2007). Em 2006, foram produzidos no país mais de 267 milhões de toneladas de grãos em pouco mais de 28 milhões de hectares. Desta produção, apenas 20% foi destinado à produção de etanol (USDA, 2008).

O processo de colheita do milho, realizado na época do outono nos Estados Unidos, é realizado por colheitadeiras mecânicas. Neste processo, a espiga é separada do colmo, de forma que os grãos são extraídos e a palha e sabugo são deixados no campo a fim de melhorar a fertilidade do solo.

Existem dois processos utilizados para a produção do etanol de milho, sendo um a partir de moagem via úmida e outro por moagem via seca. Apesar de a via úmida ser a mais comumente utilizada até os anos 1990, hoje a via seca está consolidada como o processo mais comum na produção de etanol de milho. Isto ocorreu porque o processo seco reduziu os custos finais do bioetanol, apesar de não produzir uma grande variedade de co-produtos como no caso da via úmida. Neste último caso, é realizada a separação das diferentes frações do grão de milho, favorecendo a recuperação de diversos produtos, entre eles proteínas, nutrientes, gás carbônico, amido e óleo.

No caso da via seca, o grão de milho moído é adicionado à água e enzimas para promover a hidrólise do amido em cadeias menores de açúcar. Neste caso, o único co-produto

do etanol é um suplemento protéico utilizado para alimentação animal (DDGS). Após esta etapa, as cadeias de açúcares formadas sofrem a ação da glico-amilase para serem sacarificadas, e a solução resultante segue para as dornas de fermentação, assim como ocorre na produção de etanol a partir da cana-de-açúcar (BNDES; CGEE, 2008).

O processo de liberação de açúcares desenvolve-se rapidamente no início, mas tende a reduzir sua velocidade em pouco tempo, de modo que são muito utilizadas a sacarificação e a fermentação simultaneamente para reduzir o tempo de residência nos reatores.

O produto da fermentação segue para as colunas de destilação do mesmo modo como ocorre com a cana-de-açúcar. Entretanto, a vinhaça, resíduo da destilação, segue para um conjunto de centrífugas onde é separada a vinhaça fina, que muitas vezes é recirculada no processo para o melhor aproveitamento dos açúcares. Após a destilação, o etanol passa pelo processo de desidratação, que é realizado mais comumente nos EUA por peneira molecular, enquanto no Brasil, para o etanol de cana, ainda é mais utilizada a adição de cicloexano (BNDES; CGEE, 2008).

3.1.3. O etanol de beterraba

A beterraba utilizada na produção de etanol é a beterraba açucareira ou também conhecida como beterraba branca. Ela é originária da Europa, onde ainda é uma das principais matérias-primas para a produção de biocombustível. No Brasil, foi introduzida em pesquisas no sul do país como uma opção às usinas de etanol para implementar a produção via beterraba no período entressafra da cana-de-açúcar (TOMASINI, 1983).

O processo de produção do etanol a partir da beterraba açucareira (*Beta vulgaris*) é o mesmo que o etanol de cana-de-açúcar, uma vez que a beterraba é uma matéria-prima sacarínea ou açucarada, portanto, o etanol é produzido a partir da sacarose (OLIVEIRA, SERRA; MAGALHÃES, 2012).

O que diferencia os dois processos são as etapas que antecedem a chegada da matéria-prima à usina: do plantio e preparo do solo até o transporte; o preparo da beterraba para que se obtenha o melão; e a quantidade de etanol produzida por hectare (BNDES; CGEE, 2008).

Ao chegar à usina, a beterraba açucareira passa por processo de limpeza e é fracionada em fatias finas. Essas fatias são lavadas em água quente em difusor para a extração do açúcar. A partir de então, o processamento se torna análogo ao da cana-de-açúcar, uma vez que esse líquido resultante contém em torno de 16% de sólidos solúveis. A torta fibrosa resultante do processo de produção é utilizada como alimento para animais.

3.2. Produtividade comparativa da cana-de-açúcar, beterraba e milho

A produtividade do etanol de cana-de-açúcar ganha destaque ao se comparar a quantidade de biocombustível obtida por unidade de área, que possui resultados bastante superiores às demais culturas utilizadas como substrato para a produção de biocombustíveis (LEITE; CORTEZ, 2004). Quando utilizada apenas para a produção de etanol, considerando a tecnologia brasileira, 1 tonelada de cana é capaz de produzir cerca de 90 litros deste biocombustível. E se utilizada apenas para a produção de açúcar, 1 tonelada de cana produz 100 kg deste produto, além de gerar aproximadamente 20 litros de bioetanol a partir do melaço.

Embora a produção do etanol de milho seja mais complexa do que quando comparada à cana-de-açúcar, esta última perde quanto ao rendimento de álcool. A partir de uma tonelada de milho é produzido cerca de 460 litros de bioetanol anidro e 380 kg de DDGS. Contudo, o etanol de cana-de-açúcar é mais produtivo, pois são geradas de 60 a 120 toneladas por hectare de cana plantada, enquanto que o milho produz entre 15 a 20 toneladas por hectare, dentre os quais 50% constituem sua matéria seca. Ou seja, apenas entre 7,5 e 10 toneladas por hectare de milho são utilizados para a fabricação do etanol (BNDES; CGEE, 2008).

No Brasil, o setor sucroalcooleiro completou 437 unidades produtoras até o ano de 2010, entre elas 168 são produtoras de álcool e 253 de álcool e açúcar (CAVALCANTE, 2010). A região sudeste ganha destaque na produção de cana-de-açúcar, como mostra a Tabela 3.1, onde só no ano 2000 atingiu 66% da produção total do país.

Tabela 3.1. Distribuição da produção de cana-de-açúcar no Brasil no ano de 2000.

Região	Produção (Mt cana)	%
Norte	0,8	0
Nordeste	57,4	17
Sudeste	222,4	66
Sul	27,5	8
Centro-Oeste	26,7	8
Brasil	334,8	100

Fonte: Macedo e Nogueira (2004).

A produtividade da cana-de-açúcar é bastante influenciada pelas condições climáticas e são necessárias grandes áreas plantadas (monocultura) e chuvas regulares. De acordo com

Oliveira (2010), a safra brasileira 2010/2011 teve área plantada de 9,59 milhões de hectares e produziu 79.769 kg/há de cana, menor que a obtida em 2009/2010, que produziu 81.585 kg/ha.

Cavalcante (2010) afirma em seu trabalho que o setor sucroenergético do país ainda pode ser ampliado, pois existem 383 milhões de hectares propícios para agricultura, dentre os quais 91 ainda podem ser expandidos.

A produtividade do bioetanol de cana-de-açúcar também está diretamente relacionada com a capacidade da planta industrial em converter os açúcares redutores totais nas diversas etapas do processamento. Tomando como base a região Centro-Sul do Brasil, a Tabela 3.2 mostra a eficiência global de conversão de açúcar considerando situações média e máxima.

Tabela 3.2. Eficiência de conversão de açúcares nas usinas do centro-sul do Brasil.

Eficiência	Média (%)	Máxima (%)
Extração	96,2	97,5
Tratamento do caldo	99,2	99,8
Fermentação	91,1	93,0
Destilação	99,6	99,6

Fonte: Macedo e Nogueira (2004).

Outra vantagem da cana-de-açúcar com relação à produtividade, segundo artigo divulgado no site do CTBE (CAMPINAS,2011), está no tempo de fermentação, que nas usinas brasileiras é cerca de um quarto do que o utilizado por biomassa amilácea nos EUA. Além disso, o processo fermentativo brasileiro possibilita o reciclo e reaproveitamento das leveduras, fato que contribuiu para que as usinas do país pudessem ser consideradas “Biorrefinarias” pelo fato de aproveitar toda a biomassa em seu processo produtivo.

O processamento do milho por via úmida (descrito no item 4.1) gera, além do etanol, alguns coprodutos (Tabela 3.3). O DDGS é produzido a partir da vinhaça que não foi recirculada no processo de fermentação. Após ser concentrada em evaporadores, se transforma em um xarope com 50% de umidade, que é combinado com os sólidos retirados na centrífuga e secado até o produto final, com 10% de umidade (OLIVEIRA, 2010).

Em 2007, a produção americana de etanol a partir de milho totalizou 2,8 bilhões de litros. Porém, esta quantidade é insuficiente para consumo interno e o país necessitou importar 1,96 bilhões de litros do etanol brasileiro. Com a construção de novas usinas, os Estados Unidos vem se aproximando da autossuficiência (CAVALCANTE, 2010).

Tabela 3.3. Rendimentos da produção de etanol a partir de milho através de via úmida.

Produto	Rendimento
Óleo de milho	34 – 38 kg/t milho
Proteína 20%	306 kg/t milho
Proteína 60%	68 kg/t milho
CO ₂	308 kg/t milho
Etanol	440 l/t milho

Fonte: BNDES e CGEE (2008).

Com relação ao etanol proveniente da beterraba açucareira, a literatura aponta que seu rendimento médio é de 100 litros por tonelada de beterraba colhida (MACHADO; ABREU, 2006). A maior parte da beterraba é utilizada na produção do etanol; no entanto, o pouco que sobra é geralmente utilizado para alimento de gado ou como fertilizantes. O melaço de açúcar de beterraba também é utilizado como aditivo alimentar. Entretanto, ao contrário do melaço de cana-de-açúcar, não possui sabor agradável e não é utilizado para consumo humano.

Em média, 13 a 25 toneladas de beterraba podem ser cultivadas em 1 hectare de terras agrícolas não-irrigadas. No caso de terras irrigadas, o rendimento se aproxima ao obtido para a cana-de-açúcar, entre 50 e 100 toneladas de beterraba (BNDES; CGEE, 2008).

A beterraba contém aproximadamente 17% de sacarose em massa. No entanto, as modificações genéticas, irrigação e reprodução seletiva podem aumentar seu teor em até 21%. Em média, 97% da sacarose presente na beterraba pode ser recuperada para a fermentação (BOWEN; KENNEDY; MIRANDA, 2010).

A partir dos dados apresentados nesta seção é possível elaborar um comparativo que possibilita a análise da produtividade do etanol a partir das diferentes matérias-primas estudadas. A Tabela 3.4 traz o resumo das informações obtidas pela literatura.

Tabela 3.4. Resumo dos dados de produtividade para as diferentes matérias-primas.

Matéria-Prima	Tipo de biomassa	Produtividade	Rendimento médio do etanol
		média da biomassa (t/ha)	(l/t)
Cana-de-açúcar	Açucareira	60,00 – 120,00	90,00
Milho	Amilácea	7,50 – 10,00	460,00
Beterraba	Açucareira	50,00 – 100,00	100,00

Fonte: Elaborado com base em BNDES e CGEE (2008).

A produtividade média a partir de 1 hectare de matéria-prima, pode ser facilmente calculada através da multiplicação da produtividade média da matéria-prima pela produtividade média do etanol. Esta relação, presente na Tabela 3.5, permite identificar a biomassa que proporciona maior rendimento de biocombustível.

Tabela 3.5. Rendimento do etanol a partir de 1 hectare plantado.

Matéria-Prima	Rendimento (l/ha)
Cana-de-açúcar	5.400,00 - 10.800,00
Milho	3.450,00 - 4.600,00
Beterraba	5.000,00 - 10.000,00

Fonte: Elaborado com base em BNDES e CGEE (2008).

Apesar de seu rendimento ser semelhante à da cana-de-açúcar, a beterraba tem a necessidade de ser replantada anualmente por sementes, enquanto que a cana deve ser renovada apenas de 6 em 6 anos. Este fato faz com que o custo da produção de etanol via beterraba seja mais elevado (MONTEIRO, 2011).

Os resultados mostram que, apesar do rendimento do etanol (l/t) produzido a partir do milho seja cerca de 5 vezes maior do que o etanol de cana-de-açúcar, este último apresenta quase o dobro no rendimento por hectare cultivado. Desta forma, seriam necessários 2 hectares de milho para produzir a quantidade de etanol que 1 hectare de cana-de-açúcar produz. Já o etanol a partir da beterraba apresentou resultados semelhantes aos obtidos para a cana-de-açúcar e assim, mais vantajosa que o milho em termos de rendimento (desconsiderando a vertente econômica), alcançando uma média de 7500 l de etanol por hectare de beterraba cultivada.

3.3. O etanol de 2ª geração

A crescente demanda por biocombustíveis na atual conjuntura ambiental, social e tecnológica vem gerando preocupação em torno dos impactos gerados. Com o esgotamento da produtividade das rotas tradicionais torna-se necessário a ampliação da utilização de terras, o que pode causar a migração das culturas para coberturas florestais, resultando, também, no aumento do preço dos alimentos. Além disso, a busca pela sustentabilidade ligada ao aumento crescente da emissão de gases do efeito estufa vem motivando a busca por novas alternativas bioenergéticas. Neste contexto, surgiu um grande interesse em todo o mundo pela utilização

de resíduos celulósicos (como por exemplo, o bagaço da cana-de-açúcar e a palha do milho) para a produção de biocombustíveis, chamados de biocombustíveis de 2ª geração (NYKO *et al.*, 2010).

Parte considerável de um vegetal não é amido nem açúcar, mas sim fibras que não são digeridas pelos fermentos tradicionais, como é o caso da cana-de-açúcar, que apresenta 2/3 de sua massa na forma de fibra não fermentável. Desta forma, grande porcentagem da massa desse tipo de substrato é desperdiçada em termos de geração de etanol (LEITE; CORTEZ, 2013).

Com as tecnologias desenvolvidas nas últimas duas ou três décadas, a hidrólise, que permite a conversão destes materiais lignocelulósicos presentes na cana-de-açúcar em etanol, permitiria aumentar a produtividade deste combustível em até 200% (LEITE; CORTEZ, 2013).

Na busca por processos eficientes que visam à conversão da celulose e da hemicelulose presentes nos resíduos lignocelulósicos em hexoses e pentoses fermentáveis, diversas rotas ácidas e enzimáticas tem sido estudadas. Uma complicação que vem sendo encontrada são as condições de tratamento geralmente empregadas nos pré-tratamentos térmicos, que são responsáveis pela formação de compostos inibidores tanto da hidrólise enzimática quanto da fermentação. No Brasil, um dos processos desenvolvidos é o chamado DHR (Dedini Hidrólise Rápida), que é uma variante dos processos que utilizam solvente orgânico. Além disso, existem ainda processos mais eficientes, como explosão a vapor e hidrotérmico. (SANTOS; GOUVEIA, 2009).

Em 2004, foi constatado ser possível obter cerca de 100 litros de etanol por tonelada de bagaço de cana hidrolisado, e espera-se atingir, com o aperfeiçoamento da tecnologia e de novas rotas, uma produtividade 80% superior (MACEDO; NOGUEIRA, 2004).

De acordo com Xavier (2007), se a produção de etanol a partir do bagaço de cana-de-açúcar for viável, favorecimento das vantagens econômicas da produção de etanol. Por se tratar de um combustível de menor valor energético do que a gasolina, o preço do etanol só será vantajoso se o seu preço for inferior à 70% do preço da gasolina e se os centros de consumo se localizarem próximos aos locais de produção.

Um estudo realizado por Dias (2011) revelou melhorias na produção de etanol por 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 de 2ª geração só são relevantes com a utilização dos resíduos dos canaviais e com melhorias na tecnologia de

hidrólise. No entanto, mesmo com a tecnologia de hidrólise atual, o processo de primeira e segunda geração integrado diminui o custo total do biocombustível.

Com relação ao etanol produzido a partir da palha de milho, as limitações encontradas pela presença de lignina neste resíduo diminuem as vantagens do sistema de produção de 2ª geração e faz com que os agricultores optem pela sua utilização como adubo (BOWEN; KENNEDY; MIRANDA, 2010). Apesar disso, recentemente, diversos trabalhos vêm sendo realizados com o objetivo de aprimorar a produção de etanol a partir de material lignocelulósico do milho e sua viabilidade econômica. Como por exemplo, um estudo realizado por Aden (2008), demonstrou que o preço mínimo de venda do etanol de milho poderia diminuir de US \$ 2.52/gal para US \$ 2.43/gal através do emprego do etanol de 2ª geração.

3.4 A utilização de insumos agrícolas

Grande parte das unidades consumidoras de energia durante a fase agrícola da produção do etanol advém de fertilizantes e agrotóxicos, que não só apresentam a problemática financeira como também são responsáveis por um dilema ambiental. Para se ter um balanço energético mais positivo seria necessária a adição de maior quantidade de fertilizantes objetivando o aumento da produção. Entretanto, a questão ambiental necessita que sejam reaproveitados resíduos, principalmente orgânicos, para melhorar o aproveitamento de adubos e fertilizantes (OLIVEIRA, 2010).

De acordo com Oliveira (2010) a produção de cana-de-açúcar no Brasil requer uma baixa utilização de fertilizantes quando comparado com outros países, como por exemplo, a Austrália, que utiliza de 30 a 40% a mais destes produtos que o Brasil e cerca de 200 kg/ha de adubação nitrogenada.

A Tabela 3.6 traz um comparativo entre as quantidades de fertilizantes e agrotóxicos utilizados para as matérias-primas estudadas.

Como pode-se observar pelos dados retirados da literatura, a cana-de-açúcar necessita de uma quantidade total de fertilizantes menor do que as demais culturas, seguida do milho, com quantidade intermediária, e da beterraba, que utiliza a maior quantidade de insumos agrícolas, o que contribuiu para o aumento do custo de produção.

Tabela 3.6. Insumos utilizados para a produção das matérias-primas do etanol.

Produtos	Cana-de-açúcar	Milho	Beterraba
Fertilizantes nitrogenados (Kg/ha)	69,93	153,00	180,00
Fertilizantes fosfatados (Kg/ha)	22,41	65,00	180,00
Fertilizantes potássicos (Kg/ha)	88,2	77,00	150,00
Herbicidas (Kg/ha)	3,96	6,20	2,65
Inseticidas (Kg/ha)	0,27	2,80	1,49
Total (Kg/ha)	184,77	304,00	514,14

Fonte: Elaborada com base em BNDES e CGEE (2008), SEABRA et al. (2011) e Quirin et al. (2004).

4. Avaliação energética

4.1. Demanda energética e o sistema de cogeração

A produção de etanol via qualquer matéria-prima 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. Isto ocorre, pois para cada tonelada de cana são produzidos 140 kg de massa seca na forma de bagaço. Muitas vezes, como acontece no Brasil, há energia excedente que pode ser exportada para a rede pública, melhorando o rendimento da indústria e gerando valor econômico.

A Tabela 4.1 a seguir relaciona a demanda de energia para a produção de açúcar e os dois tipos de etanol (hidratado e anidro) a partir da cana-de-açúcar. É possível observar que a grande eliminação de água faz com que a demanda de energia seja alta, em especial a energia térmica (BNDES; CGEE, 2008). Cabe ressaltar que, no Brasil, praticamente toda a energia térmica também é produzida na própria usina com sistemas de cogeração com o bagaço (MACEDO; NOGUEIRA, 2004).

Tabela 4.1. 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 cana	470-500	370-410	500-580
Mecânica				
Acionamento dos sistemas de preparo e moagem da cana e motobombas.	kWh/t cana	16	16	16
Elétrica				
Motores elétricos diversos, iluminação e outras cargas.	kWh/t cana	12	12	12

t cana: tonelada de cana

Fonte: BNDES e CGEE (2008).

A autossuficiência em energia elétrica nas usinas brasileiras ocorreu no final dos anos 90, graças às mudanças na regulamentação do setor elétrico. De acordo com Macedo e Nogueira (2004), em 2003, 184 autoprodutores do setor sulcraolcooleiro foram registrados, somando sua capacidade instalada em 1582 MW, aproximadamente 10% da capacidade termelétrica brasileira.

Para produção do etanol a partir do milho, embora se esperasse que a biomassa proveniente do sabugo e da palha fosse utilizada para garantir a sustentabilidade energética da usina, esta é utilizada, em sua grande maioria, para fertilização do solo. Isto ocorre porque a palha do milho, quando deixada na proporção mínima de 30% no solo, previne a erosão e ajuda a conter a umidade, de forma a melhorar a próxima colheita. Se a palha é retirada do solo este deve ser acrescido de fertilizantes, o que encarece a produção.

Como já mencionado anteriormente, o pouco resíduo proveniente da beterraba, assim como o milho, também é utilizado para a fertilização do solo.

O processo de produção de etanol a partir da beterraba açucareira requer a utilização anual de 28.940 GWh de energia elétrica, 94 milhões de m³ de água e 1265 milhões kg de vapor. Já para a produção do milho, são necessários uma longa lista de utilitários, entre eles gás natural e torre de resfriamento. Estima-se que por ano, a produção de milho demanda 29.400 GWh de energia elétrica, 59,3 milhões m³ de água e 11,8 milhões kg de gás (BOWEN; KENNEDY; MIRANDA, 2010).

4.2. Balanço energético

Os estudos de balanços energéticos tem como finalidade a busca por tecnologias que possibilitam poupar energia, principalmente as que possuem origem fóssil como combustíveis, fertilizantes, entre outros. Basicamente, é contabilizada a energia disponível e a energia consumida em certo sistema de produção. A partir do resultado desta relação, tem-se a viabilidade da obtenção de energia através de diversas metodologias empregadas. (CAMPOS; CAMPOS, 2004).

Independentemente da biomassa utilizada, a produção de etanol surgiu como uma alternativa à utilização de recursos fósseis, possibilitando a redução do uso destes insumos e consequentes emissões excessivas de gases de efeito estufa. Apesar disso, não existe tecnologia de produção que não envolva, direta ou indiretamente, o uso de recursos fósseis. Desta forma, o uso dos biocombustíveis apresenta benefícios relacionados apenas com a economia de energia de fontes não renováveis em comparação com o seu equivalente fóssil.

Segundo BNDES e CGEE (2008), para o etanol de cana-de-açúcar, a evolução das tecnologias agrícolas juntamente com a ampliação da demanda energética, produção de energia elétrica e o reaproveitamento de resíduos possibilitaram que a produção de bioetanol por tonelada de cana fosse acrescida a cada ano.

Para a realização dos balanços energéticos referentes às três matérias-primas estudadas neste trabalho, foram reunidas da literatura a quantidade de energia utilizada na fabricação do etanol tanto na fase agrícola quanto da fase industrial. Foi contabilizada, também, a energia advinda do produto final, o etanol, e dos coprodutos gerados. Por fim, foi realizada a relação da energia produzida pela consumida para possibilitar a comparação entre as biomassas. Esta relação, também chamada de ciclo de vida é um indicador da quantidade de energia final disponibilizada pelo combustível. Refere-se a quantas unidades de energia renovável são produzidas através de uma unidade de energia fóssil e é obtida através da Eq. 3 a seguir (EPLCA,2007).

$$\eta = \frac{E_{prod.}}{E_{cons.}}, \quad (3)$$

onde:

η : Ciclo de vida;

$E_{prod.}$: Energia produzida;

$E_{cons.}$: Energia consumida.

Os resultados a partir de valores médios para a produção de 1 litro de etanol podem ser observados na Tabela 4.2.

Cabe ressaltar que os dados apresentados foram retirados de diferentes estudos que consideraram diferentes fatores e em datas distintas, de forma que o resultado médio final pode conter alterações dependendo das condições adotadas. Para a cana-de-açúcar, foi considerada a média de amostras das usinas encontradas no Centro-Sul brasileiro no ano de 2006. Já para o milho, foram retirados dados amostrais da produção de etanol nos EUA também no ano de 2006. No caso da beterraba, foram retirados dados de um estudo em Portugal no ano de 2011.

Tabela 4.2. Balanços energéticos

	Cana-de-açúcar	Milho	Beterraba
Consumo na fase agrícola (MJ/l)	2,13	5,59	8,6
Consumo na fase industrial (MJ/l)	0,44	15,24	13,38
Consumo total (MJ/l)	2,57	20,83	21,98
Valor energético da produção de etanol (MJ/l)	21,40	21,20	23,94
Ciclo de vida para a produção de etanol (η)	8,3	1,0	1,1
Valor energético de coprodutos/bagaço (MJ/l)	2,87	4,13	2,1
Output total (MJ/l)	24,27	25,33	26,04
Ciclo de vida para a produção de etanol + coprodutos (η)	9,4	1,2	1,2

Fonte: Elaborado com base em BNDES e CGEE (2008) e Monteiro (2011).

É possível perceber que o consumo de energia da fase agrícola para a cana-de-açúcar foi a menor dentre as três matérias-primas estudadas. Isto se dá porque o cultivo desta biomassa demanda apenas um preparo de área para seis colheitas consecutivas.

O balanço energético também possibilita observar que o consumo de energia na fase industrial para a produção a partir de milho é maior que os demais, devido à necessidade de realizar a hidrólise do amido para a conversão de glicose, que necessita em média 4 MJ para cada litro de etanol produzido por esta matéria-prima. Além disso, o sistema de cogeração de

energia muito utilizado na produção a partir de cana-de-açúcar diminui o consumo de energia necessária para a produção de etanol a partir desta biomassa (SALLA; CABELLO, 2010).

É fácil perceber, a partir da Tabela 4.2, que a cana-de-açúcar produz o etanol com a melhor relação energética, pois para cada unidade de energia fóssil utilizada na sua produção, obtém-se 8,3 unidades de energia renovável. Desta forma, conta-se que a produção de 1 MJ de biocombustível a partir da cana-de-açúcar utiliza 0,120 MJ de energia fóssil. Já o milho e a beterraba possuem resultados modestos, mesmo considerando o valor energético de coprodutos. Para se produzir 1 MJ de etanol a partir da beterraba são necessários 0,9 MJ de energia fóssil. Já para o caso do milho, caso não seja contabilizado o teor energético dos coprodutos, para se produzir 1 MJ de energia é necessária, aproximadamente, a mesma quantidade de energia fóssil

A partir destes resultados e com os dados calculados da Tabela 3.5 foi elaborada a Tabela 4.3, onde constam os totais de energia para a produção do etanol, ou seja, o valor líquido de energia (VLE) com base em um hectare de matéria-prima. O VLE pode ser encontrado calculado utilizando a Eq. 4 a seguir (EPLCA,2007).

$$VLE = E_{prod.} - E_{cons.} \quad (4)$$

Tabela 4.3. Energia total (mínima e máxima) para a produção de etanol por hectare de matéria-prima.

	Cana-de-açúcar	Milho	Beterraba
Input total (MJ/ha)	13.878,00 – 27.756,00	71.863,50 – 93.748,00	109.900 – 219.800,00
Output total (MJ/ha)	115.560,00 – 231.120,00	73.140,00 – 97.520,00	119.700,00 – 239.400,00
Energia total (MJ/ha)	101.682,00 – 203.364,00	1.277,00 – 3.772,00	9.800,00 – 19.600,00

Fonte: Elaborado com base em BNDES e CGEE (2008) e Monteiro (2011).

Percebe-se que o biocombustível produzido a partir da cana-de-açúcar produz, em média, 152 GJ de energia por hectare plantado, contra 2,5 GJ do milho e 15 GJ da beterraba, constituindo mais um fator que elege a cana-de-açúcar a biomassa mais vantajosa.

Ressalva-se que apesar das vantagens apresentadas pela cana-de-açúcar, seu cultivo deve ser realizado em locais propícios, respeitando variáveis como clima, períodos de chuva, tipo de terra entre outros, como ocorre no Brasil. Em países da Europa e nos Estados Unidos,

estas condições não são atendidas para este tipo de cultura, necessitando a utilização de outro tipo de biomassa. Assim a matéria-prima destinada para a produção de etanol obedece às potencialidades da agricultura de cada local.

5. Avaliação ambiental: as emissões de carbono

O uso do bioetanol como combustível surgiu como uma alternativa à utilização de recursos fósseis e consequentes emissões excessivas de gases de efeito estufa. A sustentabilidade desta alternativa parte do princípio que todo o CO₂ liberado na queima de produtos da biomassa é reciclado através da fotossíntese, responsável pelo crescimento desta biomassa, como mostrado na Figura 5.1.

Segundo UFES (2007), em 1994 a utilização deste combustível a partir da cana-de-açúcar reduziu cerca de 10% as emissões de carbono considerando todo o setor energético. Sendo assim, com a tecnologia atual tem-se que, para cada 100 milhões de toneladas de cana utilizadas para o setor energético, poderiam ser poupadas 12,6 toneladas de CO₂ emitidos para a atmosfera. Considerando que 25% de etanol anidro é adicionado à gasolina, diminuindo a emissão de CO₂, a emissão líquida evitada, que é a diferença entre as emissões de CO₂ na produção e as evitadas, pode alcançar 1.900 kg CO₂ eq/m³ de etanol (BNDES; CGEE, 2008).

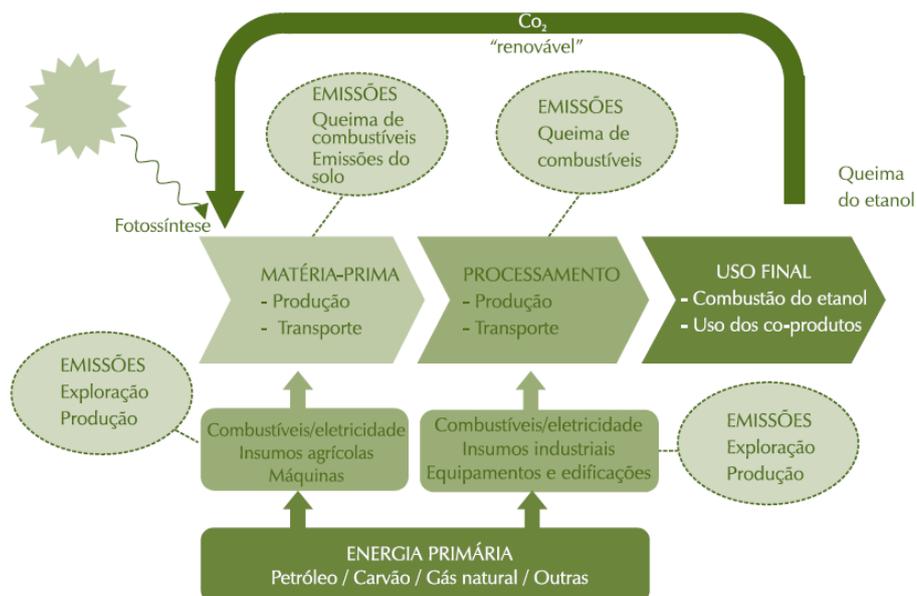


Figura 5.1. Diagrama do ciclo de vida do bioetanol.
Fonte: BNDES e CGEE (2008).

De acordo com o relação energética calculada para etanol de milho, constata-se que é a quantidade a mais de energia adquirida na forma de álcool quando comparada a que se

consome de energia fóssil para produzi-lo é mínima. Desta forma, é possível afirmar que a utilização deste combustível contribui de forma insignificante para o controle do efeito estufa. Apesar disso, uma vez que a queima de etanol polui muito menos que o fóssil, a redução da poluição em centros urbanos densos seria beneficiada com a substituição destes combustíveis.

A partir de dados da literatura, foi construída a Tabela 5.1, onde foram comparadas as emissões na produção do etanol a partir das matérias-primas estudadas. Também foram analisadas as emissões evitadas com a substituição da gasolina pelo biocombustível.

Tabela 5.1. Emissões de CO₂ para o etanol de diferentes matérias-primas.

Matéria-prima	Emissão total da produção do etanol (kg CO₂ eq/l)	Emissões do etanol* (kg CO₂ eq/MJ)	Emissões da gasolina* (kg CO₂ eq/MJ)	Emissões evitadas
Cana-de-açúcar	0,248			89%
Milho	1,696	0,081	0,094	-30% - 38%
Beterraba	0,407			35% - 56%

* Emissões por queima em motor.

Fonte: Elaborado com base em BNDES e CGEE (2008); Smeets, Junginger e Faaij (2005) e Cavalcante (2010).

Cabe ressaltar que os resultados apresentados foram resultados de diferentes estudos e em momentos distintos, podendo ocasionar em incertezas no resultado final.

De acordo com a Tabela 5.1, o etanol a partir do milho apresenta a maior emissão total de gás carbônico durante sua produção, chegando a aproximadamente 1,7 kg CO₂ por litro de biocombustível.

A cana-de açúcar é a matéria prima que proporciona a maior porcentagem de emissões evitadas, chegando a 89%, graças ao uso do bagaço e da eletricidade excedentes. Segundo Cavalcante (2010), 1 litro de etanol substitui 0,8 litro da gasolina. Desta forma, como a emissão total de gases do efeito estufa pela gasolina é de 2,74 kg CO₂ eq/l, as emissões evitadas no Brasil pelo uso de etanol são de aproximadamente 1,95 kg CO₂ eq/l. Esses valores são alcançados devido ao fato que, quando a gasolina é totalmente substituída por etanol, as emissões relacionadas ao uso do combustível fóssil são mitigadas, de forma a serem consideradas apenas as emissões oriundas do processo de produção do etanol.

5. Análise econômica

Para a realização mais detalhada entre diferentes tipos de matérias-primas para a produção do etanol é preciso levar em consideração os custos empregados na mesma.

Existe uma dificuldade real na avaliação de custos de produção em situações onde existem grandes subsídios de diferentes naturezas, como ocorre nos Estados Unidos e na Europa. Um exemplo a ser considerado são os subsídios de infraestrutura na produção de grãos de milho que produzem etanol nos Estados Unidos, que não são considerados mesmo nas melhores estimativas. Os créditos por subprodutos e coprodutos também representam uma dificuldade quanto ao levantamento de custos, pois os processos não são representados em larga escala.

De forma resumida, são três os pontos importantes a serem considerados ao analisar o custo do etanol: custo da biomassa, custo do processamento e a taxa de conversão da biomassa para os produtos (MACEDO;NOGUEIRA, 2004).

Os dados coletados para o levantamento de custos do bioetanol, de acordo com a Tabela 5.1, advêm de processos utilizados no Brasil, no caso da cana-de-açúcar, nos Estados Unidos, para o milho, e na Europa, para a beterraba. Os custos do etanol de milho foram divididos conforme o processo utilizado, pois existe uma diferença discrepante nos custos nas diferentes etapas do processamento. Cabe mencionar que os dados coletados da literatura estavam originalmente em dólares/l e foram convertidos para reais/l utilizando a taxa 2,175 (ano de 2006) para facilitar comparações.

Os custos do etanol proveniente da cana obtiveram valores totais reduzidos, cerca de 0,53 reais/litro, devido às baixas despesas para o cultivo da matéria-prima, onde, cabe ressaltar, só há necessidade de renovação da plantação a cada 6 colheitas. Já a beterraba foi a matéria-prima que obteve maior custo de produção, aproximadamente 1,66 reais/litro, ficando acima até mesmo dos dois processos de fabricação do milho, o que justifica a necessidade de subsídios para sua produção.

Tabela 5.1. Custos do etanol de diferentes matérias-primas em reais/litro.

	Cana-de-açúcar	Milho por via úmida	Milho por via seca	Beterraba
Custo da matéria-prima (R\$/l)	0,170	0,228	0,302	0,557
Custo do processo (R\$/l)	0,361	0,361	0,298	1,100
Custo total (R\$/l)	0,531	0,589	0,600	1,657

Fonte: USDA (2006) alterada.

Segundo pesquisa realizada em meio eletrônico, na cidade de São Paulo, atualmente (05/2014), a gasolina e o álcool custam, em média, R\$2,70 e R\$1,85, respectivamente. Considerando que o álcool tem sua quilometragem reduzida em 30% em comparação com a gasolina devido ao seu poder calorífico, se o consumo médio de um carro do tipo *flex* com gasolina é de 10 km/l, com o álcool, o mesmo veículo fará 7 km/l (MACEDO;NOGUEIRA,2007). De acordo com esses dados, o custo da gasolina é de R\$ 0,27/km enquanto que para o álcool é de R\$ 0,26/km, apenas R\$0,01 a menos. Supondo que uma pessoa percorra, por ano, 15.000 km, se utilizar álcool economizará R\$ 150,00. Em uma mesma comparação realizada em 2007 por Macedo e Nogueira (2007), a economia ocasionada pela utilização do etanol em São Paulo era de R\$600,00 ao ano, utilizando a mesma quilometragem, devido ao baixo preço do etanol em relação à gasolina na época. Esta diferença nos preços dos combustíveis tem contribuído para a crescente competição da gasolina com o etanol.

6. Conclusão

Os avanços nas pesquisas na área de biocombustíveis são de grande importância na atual conjuntura, em virtude de uma preocupação maior com o desenvolvimento de fontes energéticas renováveis e mais limpas, que permitiram avançar na superação da necessidade de combustíveis fósseis. Neste contexto, o etanol ganha espaço por se tratar de um excelente substituto para a gasolina, o principal combustível usado em automóveis no mundo.

Tendo em vista as diferentes matérias-primas estudadas para a produção do etanol, a cana-de-açúcar demonstrou ser a mais vantajosa. Segundo os resultados levantados no presente trabalho, além de possuir ciclo de vida que atinge até 9,4 se contabilizados os

coprodutos, o etanol de cana também se destaca quanto às emissões evitadas de gases do efeito estufa, com índices de até 89% em 2008.

Quanto ao milho e a beterraba, considerando a quantidade de energia fóssil necessária para a produção de etanol, obtiveram valores modestos de ciclo de vida, em média 1,2 considerando a energia obtida pelos coprodutos. Ainda assim, dentre estas duas matérias-primas a beterraba apresenta maiores vantagens, pois sua produtividade está entre 5.000,00 e 10.000,00 litros por hectare, enquanto a do milho está entre 3.450,00 e 4.600,00 litros por hectare. Ainda, as emissões evitadas pela utilização do etanol de milho são inferiores a todas as biomassas estudadas, chegando até mesmo a valores negativos.

Quanto ao custo, a produção do etanol via beterraba é quase 3 vezes mais cara que o etanol de milho e de cana-de-açúcar, cerca de 0,762 dólares o litro, contra 0,245 da cana, 0,271 de etanol de milho por via úmida e 0,276 por via seca.

Em comparações realizadas com a gasolina, concluiu-se que o etanol de cana de açúcar na cidade São Paulo é pouco mais vantajoso que o combustível de origem fóssil, cerca R\$ 0,26/km, enquanto que para a gasolina é R\$ 0,27/km.

Em geral, apesar das evidentes vantagens apresentadas pela cana-de-açúcar quanto à produção de etanol, os Estados Unidos é o país líder na produção de biocombustível através do milho, utilizando de benefícios como subsídios, bem como ocorre na Europa para a produção de beterraba de forma a possibilitar sua produção.

7. Referências Bibliográficas

ADEN, A. **Biochemical Production of Ethanol from Corn Stover**: 2007 State of Technology Model. Colorado: U.s. Department Of Energy, 2008. 15 p.

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

AMABIS, J. M; MARTHO, G. R. **Biologia**. Vol. 1. 2ª ed. Editora Moderna. São Paulo, 2004.

ANDRADE, S.A.C.; CASTRO. S.B. Engenharia e tecnologia açucareira. Departamento de Engenharia Química CTG – UFPE. 2006, Pernambuco.

ASSEMBLEIA LEGISLATIVA DO ESTADO DE GOIÁS (Org.). **A importância do etanol para a economia brasileira**. 2009. Disponível em: <<http://al-go.jusbrasil.com.br/noticias/1159554/a-importancia-do-etanol-para-a-economia-brasileira>>. Acesso em: 01 dez. 2013.

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

DC, 2007. Disponível em: <<http://www.cei.org/pdf/5774.pdf>>. Acesso em: 06 dez. 2013.

BOWEN, E.; KENNEDY, S.C.;MIRANDA, K. **Ethanol from Sugar Beets: A Process and Economic Analysis**. 2010. 143 f. TCC (Graduação) - Curso de Bachelor Of Science, Worcester Polytechnic Institute, Hjgytt, 2010.

CAMPINAS. José Carlos Gubisich. Presidente da Eth Bioenergia. **Análise:Etanol de cana tem várias vantagens**. 2011. Disponível em: <<http://www.bioetanol.org.br/noticias/>>. Acesso em: 02 maio 2014

CAMPOS, Alexandre Torres; CAMPOS, Aloísio Torres de. **Balances energéticos agropecuários: uma importante ferramenta como indicativo de sustentabilidade de agrossistemas**. Revista Ciência Rural, V 34 N° 6, 2004.

CAVALCANTE, Alan dos Reis. **O SISTEMA DE PRODUÇÃO DO ETANOL: SUSTENTABILIDADE E PERSPECTIVAS..** 2010. 65 f. TCC (Graduação) - Curso de Técnico em Produção Industrial, Faculdade de Tecnologia de Taquaritinga, Taquaritinga, 2010.

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.

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.

EPLCA, European Platform on Life Cycle Assessment. **Carbon Footprint, What it is and how to measure it**. European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability, Italy, 2007.

KOHLHEPP, G. **Análise da situação da produção de etanol e biodiesel no Brasil**. Estudos Avançados 24 (68), 2010.

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, R. C. C.; LEAL, M. R. L. V.. **O Biocombustível no Brasil**. CEBRAP, 2007.

MACEDO, I. C.; NOGUEIRA, L. A. H.. Avaliação da Expansão da Produção de Etanol no Brasil. **Cgee: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos**, Brasília, jan. 2004.

MACHADO, C. M. M.; ABREU, F. R. e. Produção de álcool combustível a partir de carboidratos. **Revista de Política Agrícola**, v. 3, n. 15, p.64-78, Jul./Ago./Set. 2006.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. Portaria Mapa nº 143, de 27 de janeiro de 2007. **Mistura Carburante (etanol Anidro - Gasolina)**.

MONTEIRO, A. F. da S. **Avaliação das potencialidades de produção de bioetanol em Portugal**. 2011. 118 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2011.

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, E. C. **Balço energético na produção de álcool da cana-de-açúcar: Comparativo com a produção norte americana de etanol por meio da utilização de milho**. 2010. 56 f. TCC (Graduação) - Curso de Física Com Ênfase em Física Ambiental, Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, Dourados, 2010.

OLIVEIRA, L. M.; SERRA, J. C. V.; MAGALHÃES, K. B. Estudo comparativo das diferentes tecnologias utilizadas para produção de etanol. **Geoambiente On-line: Revista Eletrônica do Curso de Geografia**, Jataí, v. 19, p.1-23, jul./dez. 2012.

PAYNE, J. H. Operações unitárias na produção de açúcar de cana. São Paulo: Nobel S.A., 1989.

PETROBRAS. **ETANOL**. Disponível em:

<<http://www.br.com.br/wps/portal/portalconteudo/produtos/automotivos/etanol>>. Acesso em: 26 nov. 2013.

Produção industrial de etanol a partir da cana-de-açúcar. **UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO - UFES**, São Mateus, 2007.

PROENG – Projetos de Desenvolvimentos de Equipamentos S/C Ltda. Apostila de tratamento de caldo primário. Curso de Engenharia de Produção Agroindustrial, FATEC, 2010.

QUIRIN, M. et al. CO2 Mitigation Through Biofuels in the Transport Sector. Status and Perspectives. **Main Report**. IFEU, Institute for Energy and Environmental Research Heidelberg, Germany, 2004.

<http://www.biodiesel.org/resources/reportsdatabase/reports/gen/20040801gen-351.pdf>,

Acesso em: març. 2014.

SALLA, D. A.; CABELLO, C. ANÁLISE ENERGÉTICA DE SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE ETANOL DE MANDIOCA, CANA-DE-AÇÚCAR E MILHO1. **Revista Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 25, n. 2, p.32-53, 2010.

SANTOS, R.C dos. Produção de etanol anidro: aspectos técnico-operacionais e econômicos para exportação. Curso de Tecnologia em Biocombustíveis, Faculdade de Tecnologia de Araçatuba, 2010.

SANTOS, J. R. A.; GOUVEIA, E. R. Produção de bioetanol de bagaço de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 1, n. 11, p.27-33, nov. 2009.

SEABRA, J. E. A. et al. Life cycle assessment of Brazilian sugarcane products: GHG emissions and energy use. **Biofpf**, v. 10, n. 1002, p.519-532, fev. 2011.

SEBRAE. **O que é etanol?** Disponível em: <<http://www.sebrae.com.br/setor/agroenergia/o-setor/etanol/o-que-e>>. Acesso em: 01 dez. 2013.

SMEETS, E.; JUNGINGER, M.; FAAIJ, A. **Supportive study for the OECD on Alternative Developments in Biofuel Production Across the World**. Copernicus Institute for Sustainable Development, Department of Science, Technology & Society – Utrecht University, The Netherlands, December, 2005.

TOMASINI, R. G. A.. **O cultivo de beterraba para produção de álcool ou forragem na região sul do Brasil**. Passo Fundo: EMBRAPA-CNPT, 1983. 20 p.

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. 2013.

USDA – UNITED STATE DEPARTMENT OF AGRICULTURE. *Data and Statistics*. United State Department of Agriculture, 2008. Disponível em: <<http://www.usda.gov>> Acesso em: 06 dez. 2013.

The economic feasibility of ethanol production from sugar in the united states, 2006. Disponível em: <http://www.fsa.usda.gov>. Acesso em: 07/05/2014.

XAVIER, M. **The Brazilian sugarcane ethanol experience**: issue analysis 3, Washington, 2007.