

3.

Avaliação da cadeia do etanol da cana-de-açúcar

3.1

Estrutura Atual do Setor Sucroalcooleiro Brasileiro

A cana-de-açúcar na safra 2008/2009 foi cultivada em 7.058.629 de hectares no Brasil (Mapa, 2010), em todas as regiões geográficas do país, tendo atingido em 2008/09 uma produção de aproximadamente 570 milhões de toneladas, um quarto da produção mundial (Unica, 2010). Cerca de 40% foi utilizada para a produção de açúcar (31,5 milhões de toneladas) e 60% para etanol (27,7 milhões de m³), em 367 unidades industriais (Mapa, 2010) na safra 2008-09 (Tabela 3).

No quadro 1 se apresenta o comportamento da produção do etanol e do açúcar ao longo dos últimos 20 anos, nota-se que a produção de etanol se incrementou a partir do ano 2002 até os dias atuais, devido principalmente ao lançamento dos veículos com motores *flex fuel* (veículos biocombustíveis) e ao elevado preço da gasolina no mercado brasileiro.

As duas regiões produtoras são o Norte-Nordeste (22%) e o Centro-Sul (78%). Na Tabela 3 encontram-se dados da safra de 2008-2009 que mostram a distribuição das usinas produtoras de açúcar e de etanol nos estados brasileiros.

Observa-se um incremento na produção de etanol de 5,3 bilhões de litros na safra 2008/2009 em comparação com a safra de 2007/2008, na qual a produção foi de 22,4 bilhões de litros de etanol (Mapa, 2010).

Os números das últimas safras apontam a tendência de aumento da produção de etanol, com maior concentração no estado de São Paulo na Região Centro-Sul, que se mantém responsável por 61% do total de etanol produzido no Brasil.

Quadro 1. Produção de Etanol e de Açúcar nos últimos 20 anos.

Fonte: elaboração própria a partir da UNICA (2010) e de MAPA (2010).

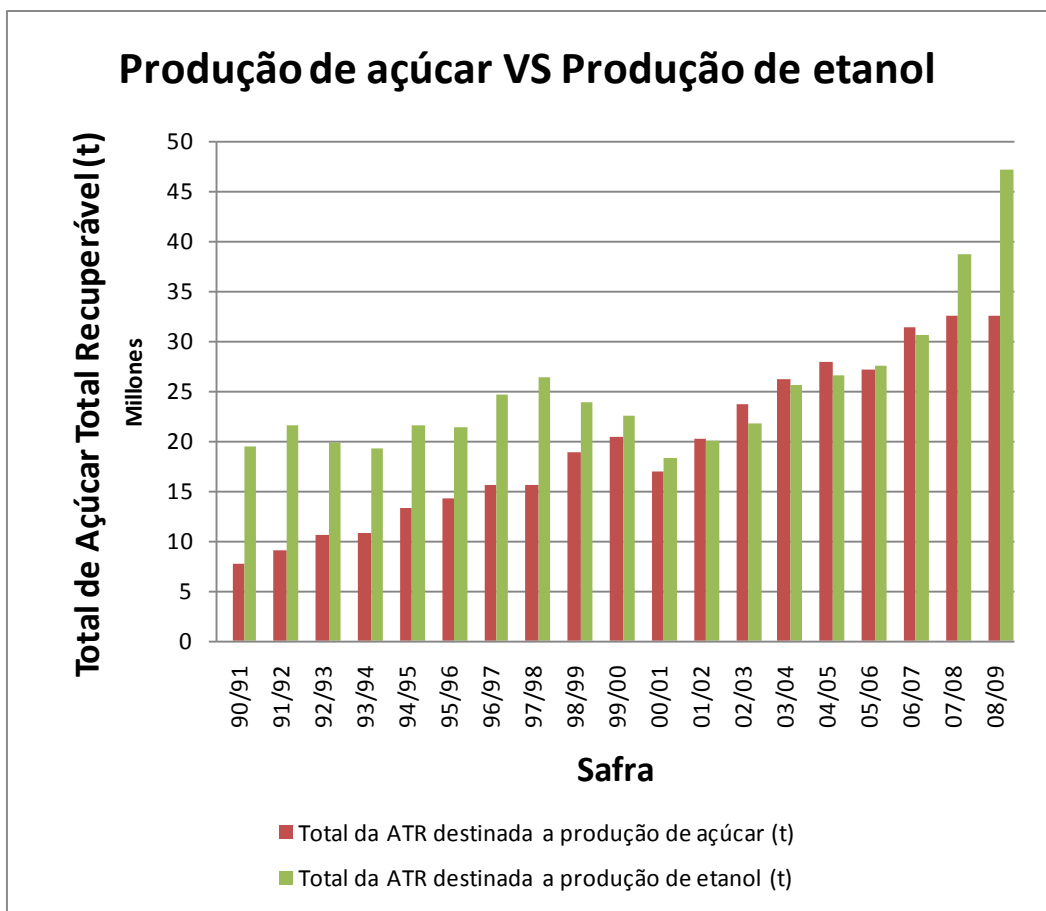


Tabela 3. Número de usinas e produção de Açúcar e Etanol na safra 2008-2009.

Fonte: elaboração própria a partir de MAPA (2010).

Estado/Região	Número de Usinas	Cana moída (ton.)	Total de açúcar total recuperável (ATR) ¹⁷	Total da produção de açúcar (ton.)	Total da produção de etanol (m ³)
São Paulo	161	352.277.735	50.246.528	20.195.366	16.904.039
Paraná	28	44.497.582	6.045.378	2.444.876	2.038.399
Minas Gerais	35	41.818.865	6.140.957	2.238.637	2.216.397
Mato Grosso do Sul	14	18.200.917	2.539.718	657.078	1.082.882
Goias	26	29.806.046	3.955.104	957.561	1.722.555
Mato Grosso	11	14.153.762	1.954.449	389.496	898.521
Rio de Janeiro	6	3.403.412	467.619	239.196	126.452
Espírito Santo	7	4.373.248	563.736	85.272	274.677
TOTAL DA REGIÃO CENTRO-SUL	288	508.531.567	71.913.491	27.207.482	25.263.922
Alagoas	24	27.309.295	3.765.645	2.200.862	845.363
Pernambuco	22	18.949.518	2.510.729	1.521.275	530.467
Paraíba	8	5.885.978	814.128	133.883	390.695
R. Grande do Norte	3	3.186.768	405.472	197.914	114.909
Bahia	3	2.541.816	331.015	81.177	141.484
Maranhão	5	2.280.160	332.103	15.335	181.559
Piauí	1	900.181	118.514	38.796	44.553
Sergipe	6	1.831.714	239.666	82.099	89.832
Ceará	3	122.355	15.675	-	9.241
Amazonas	1	312.000	28.497	14.320	7.963
Tocantins	2	285.000	38.806	-	22.400
Pará	1	626.685	91.809	13.726	44.908
TOTAL DA REGIÃO NORTE-NORDESTE	79	64.231.460	8.692.060	4.299.387	2.423.374
BRASIL	367	572.763.027	80.605.550	31.506.869	27.687.296

3.2

Ciclo de vida do Etanol da cana-de-açúcar

De forma geral, as etapas do ciclo de vida do etanol de cana-de-açúcar podem ser resumidas em: extração da matéria-prima, produção, reciclagem do bagaço da cana, distribuição e utilização. Para o álcool combustível advindo da

¹⁷ ATR representa a quantidade útil de sacarose no caldo da cana, é a matéria-prima básica do processo de fabricação dos produtos finais da cana como o açúcar e o etanol.

cana-de-açúcar, a extração da matéria-prima corresponde às atividades agrícolas do cultivo da cana-de-açúcar; a produção, a fase de transformação industrial nas usinas, desde a entrada da cana na usina até a produção do etanol, incluindo a geração de energia elétrica e o vapor; a reciclagem que é realizada por meio da fertirrigação da vinhaça; a distribuição, pelo transporte do etanol até os postos de distribuição para a venda e a utilização, pela combustão do etanol usado como combustível em veículos automotores.

A fase agrícola do processo canavieiro, admitindo que a área já tenha sido desmatada e que está sendo utilizada para a agricultura, inicia-se, de acordo com Santiago e Rossetto (2007c), pelas operações de limpeza do terreno, estudos da qualidade do solo, nivelamento, aração e gradagem do solo.

A preparação de solo segue a essas atividades que Santiago e Rosetto (2007c) definem como uma série de operações que têm por finalidade fornecer as melhores condições biológicas e físico-químicas ao solo para a germinação das sementes ou o brotamento dos tubérculos.

De acordo com Ometto (2005) o preparo periódico do solo ocorre para o plantio da cana-planta. Após o primeiro corte, ocorre o preparo para a cana-soca, o qual se repete, geralmente, por cinco cortes e finalmente, o ciclo se completa com a renovação do canavial, a qual ocorre pelo replantio. A renovação do canavial pode ser realizada pelo método mecânico ou pelo químico. Para o método mecânico, Santiago e Rosetto (2007b) enumeram as seguintes operações: aração e gradagem ou gradagem pesada, subsolagem, sulcamento e adubação.

Além da atividade de desarraigar a soqueira¹⁸ de modo mecânico, pode-se utilizar também o modo químico, em conjunto com as operações de preparo de solo mediante a aplicação do herbicida, como se observa na figura 5.

¹⁸ Conhece-se como soqueira da cana-de-açúcar, as raízes que sobraram dentro e fora da terra, após seu corte, aproximadamente a cinco centímetros do solo.



Figura 5. Operação de preparo do solo. Fonte: sacarose (2009)

De acordo com Santiago e Rosetto (2007b), a operação de plantio pode ser manual ou mecanizada, existem dois métodos para o plantio, o direto e o método convencional. No método de plantio direto, o sulco é feito por meio de um sulcador que atua sobre a palha restante, enquanto, no convencional, o terreno é preparado por operações de aração e gradagem, seguidas do sulcador no solo sem palha. O sulco é um canal de aproximadamente 25 a 30 cm de profundidade, no qual a muda de cana-de-açúcar é colocada. Quando o solo é muito compactado, utiliza-se a subsolagem para romper esse horizonte de impedimento e para facilitar a penetração e o desenvolvimento das raízes no solo.

O plantio é realizado, de modo manual, com a assistência de um caminhão que carrega a cana; os funcionários distribuem-na no sulco enquanto outros a picam em toletes, como mostra a figura 6. Este modo, associado ao preparo convencional de erradicação da soqueira, mecânico e químico, são os mais usuais na cultura canavieira.



Figura 6. Plantio manual. Fonte: Santiago e Rosetto (2007b) Foto: Efraim Albrecht Neto.

Após o plantio, segue a etapa de manejo da cultura que, segundo Santiago e Rosetto (2007a), são práticas agrícolas com as seguintes finalidades:

- Preservar ou restaurar as propriedades físicas e químicas do solo;
- Eliminar ou reduzir a concorrência das plantas invasoras;
- Conservar o sistema de controle de erosão;
- Controlar pragas ou doenças, eventualmente.

De acordo com Corbini (1987) citado em Ometto (2005), as operações de controle das ervas concorrentes podem ser:

- Preventivas: como levantamento das infestações para a identificação precoce de pequenos focos;
- Culturais: pela cobertura total do solo e por práticas de rotação com adubos verdes;
- Mecânico: podendo ser manual, com a utilização da enxada; animal, no qual os cultivadores são tracionados por animais e mecanizada por tratores;
- Cultivo químico: herbicidas, como mostra a figura 7.



Figura 7. Aplicação de herbicida com tratores. Fonte: Santiago e Rossetto (2007b).
Foto: Raffaella Rossetto.

Segundo Santiago e Rossetto (2007a), a etapa de manejo da cultura compreende a aplicação de agrotóxicos e, quando necessário, a adubação. De acordo com Ometto (2005) os principais agrotóxicos aplicados na lavoura da cana-de-açúcar são:

- Aldrin: é um organoclorado utilizado para combater nematóides e insetos;
- Ametrina: herbicida com nomes comerciais de Gesapax, Herbipax e Metrimex;
- Atrazina: herbicida para controlar gramíneas anuais e latifoliadas;
- Clorpirifuos: inseticida considerado tóxico;
- Diflubenzuron: inseticida de baixa toxicidade;
- Diuron: segundo Arevalo (1980), herbicida do grupo da uréia, de baixa toxicidade;
- Finitrotin: inseticida de baixa toxicidade;
- Hexazinone: herbicida conhecido comercialmente como Velar K;
- Paration metil: componente ativo de alguns pesticidas organofosforados.
- Glifosato: comercialmente conhecido como Roundup;
- Simazina: herbicida com nomes comerciais de Topeze e Simetrex SC;
- Tebuthiuron: constitui um herbicida de nome comercial Perflan e Combine;
- Telrithiuron;
- Velpark.

A adubação da cultura visa adicionar os nutrientes necessários em quantidades suficientes para garantir a máxima produtividade econômica.

Os minerais obtidos do solo em maior quantidade (gramas por quilo de matéria vegetal produzida) em qualquer cultura agrícola são chamados de macronutrientes como o Nitrogênio (N), Fósforo (P) e Potássio (K), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg) e Enxofre (S). Os nutrientes minerais exigidos em menores quantidades (miligramas ou microgramas por quilo de matéria vegetal produzida) são os micronutrientes: Boro (B), Cloro (Cl), Cobre (Cu), Ferro (Fe), entre outros.

Segundo Rosetto e Santiago (2007), o canavial bem nutrido em nitrogênio apresenta-se verde e exuberante, uma vez que este nutriente estimula a brotação, e o enraizamento. A adubação fosfatada para a cana-de-açúcar é amplamente reconhecida como uma prática eficaz para elevar a produtividade dos canaviais, principalmente nos solos brasileiros, que são, em geral, pobres em fósforo. O potássio estimula a vegetação e promove o armazenamento de açúcar; ajuda na fixação do nitrogênio; regula a utilização da água e aumenta a resistência à seca, geada e moléstias.

Após as aplicações de herbicidas e inseticidas, a próxima etapa do ciclo de vida do álcool, ainda nas operações agrícolas, é a fase da colheita, na qual se utiliza a prática da queima da palha da cana-de-açúcar, prévia ao corte, em 60% das áreas com cana no Estado de São Paulo, segundo Boddey et al. (2008).

Rosetto (2007) explica o processo da queima da palha da cana-de-açúcar, ilustrada na figura 8, em três fases:

- a) Ignição: fase de início do processo, na presença de oxigênio e a baixa temperatura. Esta fase é breve e apresenta, ainda, baixa concentração de poluentes;
- b) Combustão incompleta: atinge altas temperaturas e forma gases tóxicos, como CO, CO₂, NO_x (óxido de nitrogênio) e SO_x (óxido de enxofre), entre outros.
- c) Resfriamento: se caracteriza pela diminuição da temperatura e pela liberação de materiais particulados, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs) e outras substâncias orgânicas provenientes dessa combustão incompleta.



Figura 8. Queima da palha da cana-de-açúcar. Fonte: Rossetto (2007).

Foto: Jacqueline Camolese de Araújo.

A etapa da fabricação do álcool inicia-se com a entrada da cana-de-açúcar na usina, descarregada por caminhões, em esteiras que as conduzem às fases do processo industrial.

Segundo Alcarde (2007), logo no início do processo industrial, a cana é lavada com água, como mostra a figura 9, para a retirada do material unido ao colmo durante o corte e o transporte do campo à usina, surgindo o primeiro efluente: a água de lavagem de cana. Algumas usinas descartam esta operação, principalmente quando é utilizado o corte da cana crua, pois, como o colmo não exsuda, não retém tanta sujeira quanto o colmo que sofre exsudação¹⁹ com a queimada – que também perde sacarose.

¹⁹ Processo de saída de água que atravessa os poros e se deposita nas superfícies.



Figura 9. Lavagem da cana-de-açúcar. Fonte: Alcarde (2007).

Foto: Patrícia Cândida Lopes.

A eliminação dessa operação contribui para a redução de custos econômicos e ambientais, devido à não-utilização de água em excesso, já que, segundo Ometto (2005), essa etapa do processamento industrial se consome, em média, 3 a 7 m³ de água por tonelada de cana.

Após a lavagem, a matéria-prima do processo industrial, a cana-de-açúcar, é submetida a uma série de facas e desfibradores para aumentar a eficiência de extração do caldo nas moendas, as quais são movidas, principalmente, por turbinas a vapor, movidas pela queima do bagaço nas caldeiras; ou por motores elétricos ou hidráulicos.

O caldo produzido durante a moagem é composto, segundo Alcarde (2007), por uma solução contendo sacarose, açúcares redutores²⁰ e não-açúcares²¹. Este caldo passa por um tratamento, por aquecimento e decantação, subdividindo-se no processo de produção, em açúcar e em álcool, quando a usina gera os dois produtos. O lodo resultante da decantação é submetido à filtração a vácuo. O líquido da filtração retorna ao processo e o resíduo sólido, conhecido por torta de filtro, é destinado à fertilização nos campos de cultivo de cana-de-açúcar.

²⁰ Os açúcares redutores são compostos por frutose e glicose

²¹ Os não açúcares são compostos por substâncias orgânicas e não orgânicas. As orgânicas são os aminoácidos, proteínas, gordura e cera; os não orgânicos são compostos por sais minerais

O caldo obtido no processo de extração é mandado diretamente para a fabricação do etanol, o objeto de estudo neste trabalho não contempla a produção de açúcar. Não obstante, cabe diferenciar os dois tipos de destilarias de etanol:

- a) Destilarias anexas: ainda maioria no Brasil, produzem álcool também a partir do produto da fermentação do melaço, subproduto da produção de açúcar, o chamado mosto de melaço;
- b) Destilarias autônomas: fabrica somente etanol nas quais o etanol é obtido a partir da fermentação direta do caldo de cana.

O caldo, enriquecido com alguns nutrientes, é inoculado, de acordo com (Ometto, 2005), com leveduras (fungo) do gênero *Saccharomyces*. Tais microorganismos irão reverter a sacarose ($C_6H_{12}O_6$) e transformá-la em etanol (C_2H_5OH) e dióxido de carbono (CO_2). O produto da fermentação é um substrato açucarado, denominado vinho, que é centrifugado para a obtenção e a reutilização das leveduras, enquanto o líquido é enviado às colunas de destilação.

O vapor é gerado a partir da queima do bagaço nas caldeiras, como mostra a figura 10, e a energia elétrica, pela utilização de geradores a vapor, como mostrado na figura 11.



Figura 10. Caldeira de combustão do bagaço; fonte: Alcarde (2007)



Figura 11. Co-geração de energia elétrica. Fonte: Alcarde (2007).

Foto: Patrícia Cândida Lopes

A reutilização de subprodutos (reciclagem) no ciclo de vida do etanol é caracterizada pela fertirrigação da vinhaça e torta de filtro nos campos de cultivo. A vinhaça é resultante da produção do etanol, após a fermentação do mosto e a destilação do vinho. Segundo Rosseto e Santiago (2007), este é o maior poluidor dentre os efluentes, variando seu desprendimento, dependendo da concentração (teor) alcoólica obtida na fermentação, de 10 a 18 litros de vinhaça por litro de álcool produzido, com altas temperaturas na saída dos destiladores, as quais variam de 85°C a 90°C.

Quanto à composição, a vinhaça apresenta características específicas, tendo sido bem estudadas por vários autores, e as quais variam conforme alguns fatores, segundo Boddey et al. (2008), fatores tais como: natureza e composição da matéria-prima, do mosto, do vinho, do tipo de aparelho destilatório e da condução da destilação.

Contudo, a riqueza organo-mineral é alta em todos os tipos, tendo grande importância na aplicação em solos agrícolas. Portanto, sua utilização nas lavouras de cana-de-açúcar, em substituição parcial ou total à adubação organo-mineral, tem sido largamente ampliada. Rosseto e Santiago (2007) afirmam que a sua aplicação não pode ser excessiva, sob pena de comprometer o meio ambiente, com a salinização do solo e poluição dos aquíferos, e a própria rentabilidade agrícola e industrial.

O transporte da vinhaça pode ser feito por caminhões, canais ou bombas, realizando-se a aplicação, geralmente, por aspersão, como mostra a figura 12.



Figura 12. Fertirrigação de vinhaça por aspersão.

Fonte: Rossetto e Santiago (2007). Foto: Raffaella Rossetto.

Segue a armazenagem do etanol em tanques de concreto logo que distribuição é realizada por meio de caminhões a diesel. O uso do etanol hidratado ocorre pela sua combustão em veículos automotores. O ciclo fecha-se com a absorção, pela cana-de-açúcar, durante seu crescimento, do CO_2 emitido na combustão e demais fases do ciclo de vida do álcool.

A figura 13 apresenta todas as fases do ciclo de vida do etanol, desde as etapas de produção da cana-de-açúcar, até o transporte a usina, a produção industrial, a fertirrigação, a distribuição do produto e o consumo.



Figura 13. Ciclo de vida do etanol de cana-de-açúcar. Fonte: elaboração própria

3.3

Avaliação do ciclo de vida do Etanol da cana-de-açúcar

O presente estudo de ACV tem como objetivo a elaboração de um programa que avalie o ciclo de vida do etanol frente aos principais impactos ambientais de cada atividade da cadeia de produção; quantificando os insumos, calculando seu aporte energético e as emissões do ciclo. Com a finalidade de que possam ser comparados com as regulações ambientais, legais e de mercado que atuam como condicionantes para uma futura certificação ambiental do etanol.

A seguir, listam-se os elementos que compõem o escopo da ACV do etanol:

- **Função do sistema:** o objeto deste estudo de ACV é o etanol produzido a partir da cana-de-açúcar brasileira numa usina autônoma. A função do etanol é ser utilizado como combustível em veículos automotores para transporte.
- **Unidade e Fluxo de referência:** o fluxo de referência relacionado à unidade funcional e utilizado para obtenção dos dados do ICV é de 1 hectare cultivado com cana-de-açúcar por um período de 1 ano.
- **Sistema de produto:** as unidades de processo que compõem a cadeia de etanol são as seguintes etapas:

- Etapa 1: Plantio da cana
- Etapa 2: Manejo da Cultura
- Etapa 3: Colheita
- Etapa 4: Usina
- Etapa 5: Distribuição

O sistema de produto, mostrado na figura 14, inclui, além das 5 unidades de processo a ser avaliadas, os itens de entrada para cada uma dessas etapas.

- Fronteiras do sistema: as fronteiras são definidas pelas etapas que serão incluídas no estudo, as quais são mostradas na figura 14, incluindo o processamento e fabricação dos itens de entrada e o reuso e tratamento dos resíduos, dependendo da disponibilidade de dados e recursos.
- Requisito dos dados: este trabalho originou-se de uma proposta conjunta com a DIMCI/INMETRO para o desenvolvimento de uma metodologia para a certificação ambiental do etanol brasileiro. A pesquisa envolveu também a colaboração com um grupo de pesquisadores do Departamento de Agrobiologia da EMBRAPA, especialistas com alto grau de experiência e conhecimento comprovado dos setores avaliados, desta fonte, obteve-se a maioria das informações no decorrer de várias entrevistas durante a dissertação; Outros dados foram coletados mediante a revisão bibliográfica.

As considerações específicas, realizadas para cada atividade do ciclo de vida do etanol, estão descritas a seguir:

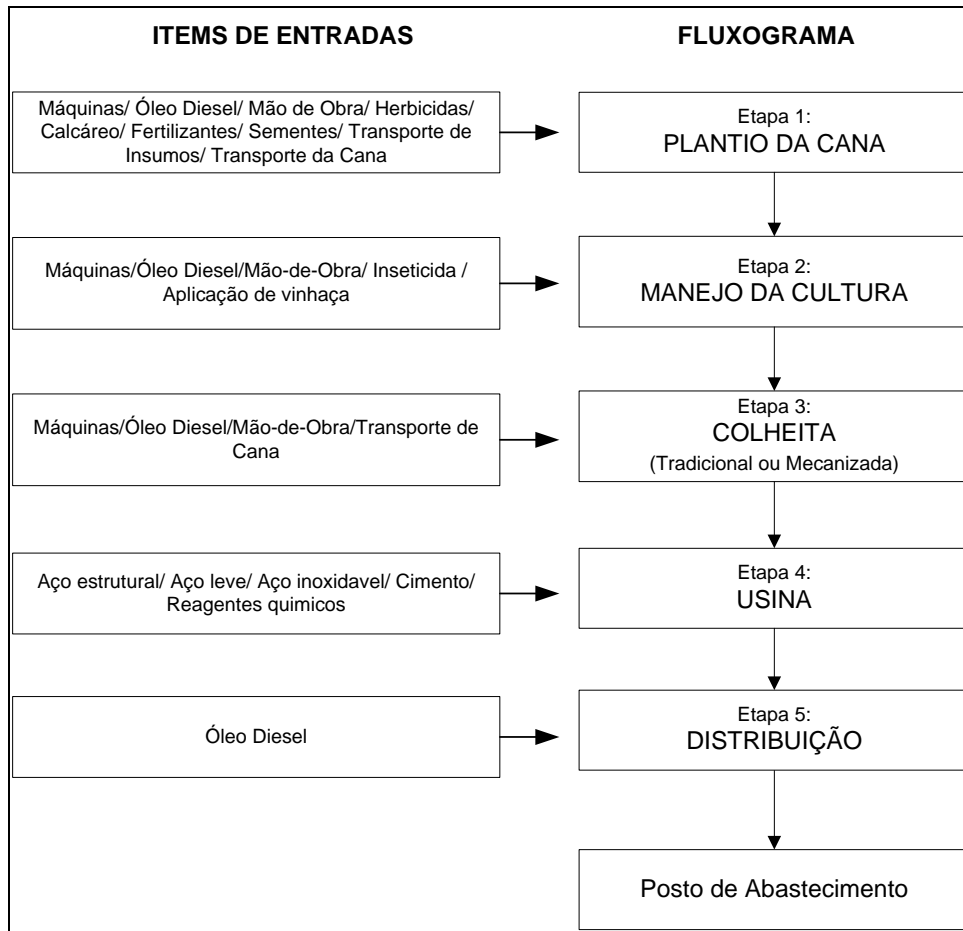


Figura 14. Sistema de produto do etanol. Fonte: elaboração própria.

3.4 Inventário do Ciclo de Vida do Etanol da cana-de-açúcar

Para complementar a análise de ciclo de vida, foi realizado um estudo do consumo de recursos naturais, demanda energética e das emissões associadas à cadeia produtiva, que corresponde à etapa de inventário da metodologia de ACV, o inventário é importante para o estudo dos impactos ambientais além de incluir também todos os processos necessários para apoiar a produção e transporte das matérias-primas utilizadas pela cadeia.

Todos os biocombustíveis requerem algum combustível fóssil na sua produção e distribuição. Começando com as operações agrícolas, entrada de óleo diesel para a lavoura, o transporte de sementes, colheita, processamento na usina e distribuição. Na continuação do texto será feita a análise de todos os itens de entrada de cada uma das etapas do ciclo de produção de etanol mostrados na figura 14.

Em busca de um melhor tratamento de dados e facilidade para sua análise, se desenvolveu uma planilha segundo as especificações publicadas no Manual de Boas Práticas e Manejo de Incertezas em Inventários Nacionais de GEE. IPCC (2006a), para elaborar um inventário detalhado.

O quadro 2 mostra o cálculo e apresentação da planilha que foi elaborada numa folha de cálculo do programa informático comercial MSExcel. As colunas do quadro 2 estão rotuladas para um melhor entendimento da A até a letra R, a planilha foi dividida em três partes contendo a seguinte informação:

- a) Primeira parte: Entradas, esta composta por três colunas:
 - Letra A: Mostra as entradas a serem avaliadas em cada uma das etapas.
 - Letra B: Indica a quantidade da cada uma das entradas.
 - Letra C: É a unidade no sistema internacional das quantidades utilizadas da cada uma das entradas por hectare por ano.
- b) Segunda parte: Energia, esta composta por duas colunas:
 - Letra D: Mostra o fator energético (em megaJoules) utilizado para cada entrada pela unidade básica das entradas.
 - Letra E: Indica a energia total (em megaJoules) produzida por cada item por hectare por ano.
- c) Terceira Parte: Emissões, os gases de efeito estufa estudados são dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e dióxido de nitrogênio (N₂O). O CH₄ e N₂O têm potencial de aquecimento global 23 e 296 vezes maior que o do CO₂, respectivamente. Assumindo um GWP²² de 100 anos, segundo o reporte do IPCC (2007), as emissões são agregadas na base da equivalência de Dióxido de Carbono (CO₂ eq.). Esta parte da planilha esta composta por onze colunas:
 - Letra F: Indica o combustível de maior representabilidade para cada um dos itens, sendo "C", carvão, "O", óleo cru e "P", petróleo.
 - Letra G: Indica quantos quilogramas de metano são emitidos por megaJoule utilizado.
 - Letra H: Indica as emissões de metano (em quilogramas por cada hectare cultivado por ano).
 - Letra I: mostra os quilogramas emitidos de metano pelas respectivas unidades básicas dos itens.

²² Global Warming Potential

- Letra J: Indica quantos quilogramas de oxido nitroso são emitidos por megaJoule utilizado.
- Letra K: Indica as emissões de oxido nitroso (em quilogramas) por cada hectare cultivado por ano.
- Letra L: Mostra os quilogramas emitidos de oxido nitroso pelas respectivas unidades básicas dos itens.
- Letra M: Indica quantos quilogramas de dióxido de carbono são emitidos por megaJoule utilizado.
- Letra N: Indica as emissões de dióxido de carbono (em quilogramas) por cada hectare cultivado por ano.
- Letra O: Mostra os quilogramas emitidos de dióxido de carbono pelas respectivas unidades básicas dos itens.
- Letra P: Mostra os quilogramas de CO₂ equivalentes emitidos em sua totalidade por cada item por hectare e por ano.
- Letra Q: Mostra o valor do GWP do CH₄.
- Letra R: Mostra o valor do GWP do N₂O.

Quadro 2. Cálculo e apresentação da planilha. Fonte: Elaboração Própria.

ENTRADAS			ENERGIA		EMISSIONES										
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
ITEM	Quant. Bas.	Unid. Bas./ha.ano	Fator Energ. (MJ/Unid. Bas.)	MJ/ha.ano	Font. Equiv.	Kg. CH4/MJ	Emissão de CH ₄ (Kg./ha.ano)	Fator de Emissão (Kg. CH ₄ /Unid. Bas.)	Kg. N ₂ O/MJ	Emissão de N ₂ O (Kg./ha.ano)	Fator de Emissão (Kg. N ₂ O/Unid. Bas.)	Kg. CO ₂ /MJ	Emissão de CO ₂ (Kg./ha.ano)	Fator de Emissão (Kg. CO ₂ /Unid. Bas.)	Kg. CO ₂ Eq./ha.ano
Etapa do Ciclo de Vida do Etanol															
Dado de entrada	Dado de entrada	Dado de entrada	Dado de entrada	B * D	Dado de Entrada	Dado de Entrada	E * G	H ÷ B	Dado de Entrada	E * J	K ÷ B	Dado de Entrada	E * M	N ÷ B	(H * Q) + (K * R) + P
p. ex. Óleo Diesel															
Etc...															
Subtotal				ΣE			ΣH			ΣK			ΣN		ΣP
Total															ΣP (todas as etapas)

Quadro 2 (Continuação). Cálculo e apresentação da planilha.

Q	R
GWP CH ₄	GWP N ₂ O
Dado de Entrada	Dado de Entrada

3.4.1

Energia fóssil empregada na produção de etanol

Na seção de apêndices e anexos ao final do documento está exposta a informação utilizada para a análise da produção do etanol dos seguintes itens de entrada ao sistema: energia na fabricação e manutenção do maquinário, o consumo de óleo diesel, mão-de-obra e transporte da cana.

Macedo et al. (2004) realizaram um levantamento de dados numa usina típica e conseguiram encontrar uma densidade média de utilização (Tabela 4) para todos os equipamentos usados na fase agrícola da produção de cana de açúcar.

Tabela 4. Utilização de equipamentos agrícolas. Fonte: Macedo et al. (2004)

Equipamento	Densidade média de utilização (kg/ha.ano)
Tratores	41,8
Implementos	12,4
Caminhões	82,4
Total	136,6

Para encontrar o consumo de óleo diesel nas atividades agrícolas da produção de etanol é necessário calcular uma média de consumo anual de combustível. Deve-se levar em conta que um ciclo completo de cana dura seis anos, donde se realiza uma reforma, quatro culturas e cinco cortes, sendo 40% pelo regime de colheita mecânica e os 60% restantes com colheita manual (Mapa, 2010).

O cálculo da média de consumo anual de combustível (Mca) está descrito a continuação: $Mca = Cp + 4 * Cc + 0,4 * (Ccm) + 0,6 * (Cct)$

Onde:

Mca : Média de consumo anual de combustível

Cp : Consumo de óleo diesel na etapa de plantio da cana

Cc : Consumo de óleo diesel na etapa de manejo da cultura

Ccm : Consumo de óleo diesel quando a colheita é mecanizada

Cct : Consumo de óleo diesel quando a colheita é manual

Tabela 5: Dados para o cálculo da média de consumo anual de combustível.

Fonte: elaboração própria baseado nos dados de Macedo et al. (2004).

Consumo de Óleo	Quantidade (l/ha.ano)	Fonte
Consumo de óleo diesel na etapa de plantio da cana. (<i>Cp</i>)	104,9	Anexo 2
Consumo de óleo diesel na etapa de manejo de cultura. (<i>Cc</i>)	8,6	Anexo 2
Consumo de óleo diesel quando a colheita é mecanizada. (<i>Ccm</i>)	74	Anexo 2
Consumo de óleo diesel quando a colheita é manual. (<i>Cct</i>)	12,7	Anexo 2

Substituindo os valores da tabela 5 na fórmula exposta no parágrafo anterior, resulta uma média de consumo anual de combustível de 29,4 l/ha.ano.

Na sequência se descreve a análise de cada uma das etapas de produção do etanol, quantificando o consumo de energia fóssil para cada atividade.

3.4.1.1

Etapa 1: Plantio da cana

Os equipamentos utilizados para o plantio manual são os tratores com sulcadores, maquinário para a gradagem e aplicadores de agrotóxicos. Na tabela 6 é mostrada uma lista dos equipamentos e implementos necessários para cada uma das operações agrícolas na etapa do plantio da cana.

Tabela 6. Equipamentos e implementos no plantio da cana.

Fonte: Macedo et al. (2004)

N	Operações agrícolas	Equipamentos	Pot. cv	Implementos	Consumo (l diesel/h)	Capacidade de trabalho (ha/h)	Consumo específico (l/ha)
Operações para preparo de solo e plantio							
1	Aplicação de calcário	MF 290	78	Carreta distribuidora de calcário	6	1,78	3,37
2	Eliminação mecânica de soqueira	Valmet 1580	143	Eliminador mecânico de soqueira	12,8	1,85	6,92
3	Eliminação química de soqueira	MF 275	69	Bomba de herbicida	4	2,5	1,6
4	Gradagem pesada I	CAT D-6	165	Grade pesada 18 D x 34"	27,6	1,98	13,94
5	Subsolagem	CAT D-6	165	Subsolador de 5 hastes	26	1,16	22,41
6	Gradagem pesada II	CAT D-6	165	Grade pesada 18 D x 34"	27,6	2,04	13,53
7	Gradagem pesada III	CAT D-6	165	Grade pesada 18 D x 34"	27,6	2,04	13,53
8	Gradagem de acabamento	Valmet 1780	165	Grade leve 48 D x 20"	15	1,6	9,38
9	Sulcação e adubação	MF 680	170	Sulcador adubador duplo	11,5	1,26	9,13
10	Distribuição de mudas	MF 275	69	Carreta para plantio	3,3	0,79	4,18
11	Fechamento do sulco e aplicação de inseticida	MF 275	69	Cobridor de cana de 2 linhas	4,8	2,52	1,9
12	Cultivo químico (aplicação de herbicidas)	MF 275	69	Bomba de Herbicida	4	3,3	1,21
13	Cultivo mecânico (cultivo quebra do meio)	MF 292	104	Cultivador para quebra do meio	5,5	1,44	3,82

Os equipamentos com seus respectivos implementos que são empregados nas operações agrícolas da etapa de plantio mostrados na tabela 6, correspondem a 29% do maquinário total utilizado no processo agrícola da produção de etanol, (O 71% restante é utilizado nas operações agrícolas das etapas de manejo da cultura e da colheita), o Anexo 2 mostra a lista completa dos equipamentos e implementos utilizados nas operações agrícolas da produção de etanol de cana-de-açúcar.

A quantidade básica considerada para a maquinaria empregada no plantio foi de 39,6 kg de maquinaria/ha.ano que ao ser multiplicada pelo fator energético de 8,52 MJ/kg, cujo cálculo é descrito no Apêndice 1, resulta um aporte de 337,5 MJ/ha.ao, (Tabela 7).

Tabela 7: Consumo de energia fóssil na etapa de plantio da cana.

Fonte: elaboração própria baseado nos dados de Boddey et al. (2008) e Macedo et al. (2004).

ENTRADAS			ENERGIA	
ITEM	Quant. Bas.	Unid. Bas./ha.ano	Fator Energ. MJ/Unid. Bas.	MJ/ha.ano
PLANTIO DA CANA				
Máquinas	39,6	kg	8,5	337,5
Óleo Diesel	0,0153	m ³	35.520	543,8
Mão-de-Obra	25,6	h	7,8	200,7
Herbicidas	3,2	kg	451,7	1.445,3
Calcário	367	kg	1,3	480,8
Nitrogênio	56,7	kg	54	3.061,8
Fósforo	16	kg	3,19	51,0
Potássio	83	kg	5,9	488,9
Sementes	2.000	kg		181,4
Transp. de Insumos	0,005	m ³	35.520	177,6
Subtotal				6.969,9

O consumo total de óleo na etapa de plantio (C_p) foi considerado como 104,9 l/hectare (Tabela 5) que representa o 52% do óleo diesel consumido em todo o processo, que ao ser multiplicado pelo valor da Mca , resulta na quantidade de 15,3 litros de óleo diesel consumidos num hectare por um ano nas tarefas realizadas pelo maquinário na etapa de plantio. O poder calorífico do óleo diesel empregado foi de 35,5 MJ/litro – este cálculo se encontra no Apêndice 1 - e finalmente se encontrou o consumo energético de 543,8 MJ/ha.ano. (Tabela 7).

Pimentel e Patzek (2007), estimaram que em todo o processo agrícola da produção da cana se empregam 128 homem-hora por hectare num ano. Na etapa de plantio o trabalho humano não representa um gasto maior devido a maioria das tarefas empregarem os equipamentos e implementos mecânicos, como mostra a tabela 7. Boddey et al. (2008), consideraram que na etapa de plantio se empregam 25,6 homem-hora por hectare num ano, correspondendo a 20% do total da mão-de-obra utilizada em todos os trabalhos agrícolas. com um fator energético correspondente de 7,84 MJ/hora cujo cálculo é descrito no Apêndice 2, o gasto energético correspondente à mão-de-obra foi contabilizado como 200,7 MJ/ha.ano.

Segundo Menten et al. (2010), em 2009 foram comercializadas 725.000 Mg de produtos formulados (herbicidas, inseticidas, fungicidas, acaricidas e outros),

com 59% correspondendo a herbicidas (429.693 Mg.). Os autores também indicam que a quantidade de herbicidas destinada para a cultura de cana no ano 2009 foi de 8% (34.375,4 Mg). Boddey et al. (2008) indicam que os herbicidas são aplicados numa média de 3,2 kg/ ha.ano nas áreas de cultivo da cana. O herbicida Glifosato é citado como tendo um custo energético de 451,66 MJ/kg. Desta forma, a energia fóssil para herbicidas foi de 1.445,43 MJ/ha. (Tabela 7).

A aplicação de calcário é importante no plantio da cana porque aumenta a exploração da água e dos nutrientes do solo, auxiliando a planta na tolerância à seca. (Macedo, 1998) estima que em cada replantio da cana (a cada 6 anos) a média de 2 Mg/ha (367 kg/ha.ano) de calcário é aplicada com um custo energético de 1,31 MJ/kg, e se estima um custo de energia fóssil de 480,8 MJ/ha. (Tabela 7).

Boddey et al. (2008) estimaram que a aplicação de Nitrogênio fertilizante é de 56,7 kg N/ha.ano. Laegreid et al. (1999) consideraram o fator energético de 54 MJ/kg para Nitrogênio na produção de uréia, com um custo total de 3.061,8 MJ/ha.ano. Os mesmos autores apresentam os valores de 3,19 e 5,89 MJ/kg como fatores energéticos da aplicação de Fósforo e Potássio, respectivamente. Boddey et al. (2008) calcularam também a aplicação média anual de 16 e 83 kg/ha para Fósforo e Potássio, respectivamente, resultando um custo energético de 51 e 488,9 MJ/ha.ano para estes dois fertilizantes. (Tabela 7). A energia consumida pela aplicação das sementes foi calculada segundo a metodologia proposta por Pimentel e Patzek (2007) que outorgam o 2,6% de todos os inputs agrícolas como a energia consumida na aplicação das sementes, no presente estudo esse valor foi de 181,4 MJ/ha.ano.

Por último deve-se calcular o gasto energético empregado no transporte de insumos para o campo e para as usinas, partindo dos fornecedores, de onde se transportam os principais materiais, o calcário e os fertilizantes. A grande maioria das usinas está localizada na região Sudeste (Tabela 3), predominantemente em São Paulo. Os fertilizantes chegam das fábricas que estão localizadas perto da costa ou são importados. O principal porto do estado de São Paulo, Santos, está localizado a 410 km por rodovia da maior área de produção de cana de açúcar do estado, Ribeirão Preto. Na maioria dos casos, o transporte percorrerá uma distancia de 500 km.

Somando as quantidades básicas dos fertilizantes, calcário e herbicidas resulta a quantia de 469,4 kg, tendo em conta outros insumos (reagentes,

pesticidas e lubrificantes) assume-se a quantidade de 700 kg de insumos a serem transportados em caminhões de capacidade de 35 Mg, cujo consumo é de 2 km/litro percorrendo uma distância de 500 km, o que resulta numa entrada de óleo diesel de 5 litros, ou o consumo de 177,6 MJ/ha.ano.

3.4.1.2

Etapa 2: Manejo da Cultura

As operações agrícolas, os equipamentos e implementos empregados na etapa de manejo da cultura são descritos na tabela 8. A densidade média de utilização mostrada na tabela 4, também é necessária para o cálculo do maquinário empregado nesta etapa.

Tabela 8. Equipamentos e implementos no manejo da cultura.

Fonte: Macedo et al. (2004)

N	Operações agrícolas	Equipamentos	Pot. Cv	Implementos	Consumo (l diesel/h)	Capacidade de trabalho (ha/h)	Consumo específico (l/ha)
Operações para tratos culturais							
1	Aleiramento de palha	MF 275	69	Aleirador de palha	4	1,5	2,92
2	Cultivo triplice operação	Valmet 1580	143	Cultivador triplice operação	9,2	1,3	4,49
3	Cultivo químico (aplic. de inseticida)	MF 275	69	Bomba de herbicida	4	2,5	1,21

Na etapa de manejo da cultura são empregados os equipamentos e seus respectivos implementos mostrados na tabela 8 correspondendo a 7% de todo o maquinário empregado na etapa de produção agrícola do etanol exposto no Anexo 2. A quantidade básica do maquinário utilizado nesta etapa é 9,6 kg/ha.ano, que ao ser multiplicado pelo fator energético de 8,52 MJ/kg - cujo cálculo é descrito no Apêndice 1 - resulta num gasto de 81,47 MJ/ha.ano. (Tabela 9).

Tabela 9. Consumo de energia fóssil na etapa de manejo da cultura. Fonte: elaboração própria baseado nos dados de Boddey et al. (2008) e Macedo et al.(2004).

ENTRADAS			ENERGIA	
ITEM	Quant. Bas.	Unid. Bas./ha.ano	Fator Energ. MJ/Unid. Bas.	MJ/ha.ano
MANEJO DA CULTURA				
Máquinas	9,6	kg	8,5	81,5
Óleo Diesel	0,0012	m ³	35520	41,8
Mão-de-Obra	25,6	h	7,8	200,7
Inseticidas	0,2	kg	363,8	87,3
Aplicação de vinhaça	180	m ³		671,1
Subtotal				1082,4

Para poder encontrar o consumo de óleo diesel no manejo da cultura é necessário empregar o valor de 29,44 l/ha.ano correspondente à média de consumo anual (Mca). O consumo total de óleo na etapa de plantio (Cp) foi estimado em 8,62 l/hectare que equivalem a 4% do óleo diesel consumido em todo o processo e ao ser multiplicado pelo valor da Mca resulta a quantidade de 1,18 litros de óleo diesel consumido por hectare por ano nas tarefas realizadas pelo maquinário na etapa da cultura. O poder calorífico do óleo diesel empregado foi de 35,52 MJ/litro - o cálculo se encontra no Apêndice 1- e finalmente encontrou-se o consumo de 41,8 MJ/ha.ano. (Tabela 9).

Na etapa de manejo da cultura o item mão-de-obra não representa um gasto maior devido à maioria das tarefas empregarem equipamentos e implementos mecânicos, como mostra a tabela 8. Das 128 horas homem/ha.ano consideradas por Pimentel e Patzek (2007) para todo o processo agrícola, Boddey et al. (2008) estimaram que na etapa de manejo da cultura são empregados 20% destes (25,6 horas/ha.ano), que ao serem multiplicados pelo fator energético (7,84 MJ/h) - cujo cálculo é mostrado no Apêndice 2 - resultam num consumo energético de 200,7 MJ/ha.ano.

De acordo com SINDAG (2009), na etapa de manejo da cultura em toda a área plantada com a cana de açúcar foi usado 0,2 kg/ha.ano de inseticida. Segundo Pimentel (1980), o custo energético dos inseticidas utilizados na cana de açúcar é 363,83 MJ/kg, resultando num consumo energético de 87,3 MJ/ha.ano.

Soares et al. (2009) informaram que para cada litro de etanol produz-se de 10 a 12 litros de vinhaça. Segundo Resende et al. (2006), aproximadamente 80 m³ de vinhaça são aplicados por hectare, mas antes da aplicação ela é misturada à água que vem do lavado da cana na usina formando 180 m³/ha.ano de vinhaça diluída. Assume-se que para a aplicação da vinhaça se emprega uma bomba diesel de 125 HP com um rendimento de 2h/ha resultando num gasto energético de 671,13 MJ/ha.ano.

3.4.1.3

Etapa 3: Colheita

Segundo o relatório: “Perfil do setor de açúcar e do etanol no Brasil” publicado pelo MAPA (2010) o processo de substituição do corte manual pelas

máquinas está ocorrendo de forma rápida e já representa o 42,8% do total da área na safra 2008-09 na região Centro-Sul (Tabela 10). Nos estados da região Nordeste, onde a oferta de mão-de-obra é maior e encontram-se áreas com declives acentuados, essa transformação está apenas começando.

Tabela 10. Participação da colheita mecânica e manual no total da área colhida na safra 2008-09. Fonte: elaboração própria baseado em dados de MAPA (2010).

Região	Sistema de colheita por área			
	Participação da colheita manual	Área de colheita manual	Participação da colheita mecânica	Área estimada da colheita mecânica
	%	hectares	%	hectares
Centro-Sul	57,2	3.423.050	42,8	2564.050
Norte-Nordeste	94,7	1.014.660	5,3	57.011
Brasil	62,9	4.437.710	37,1	2.621.061

Considerando que aproximadamente 90% da produção do etanol provém do Centro-Sul, a seguinte situação foi assumida para o Brasil: 60% da área total é colhida manualmente e a colheita mecânica é feita nos 40% restantes.

Os equipamentos e implementos necessários para a colheita são mostrados na tabela 11.

O valor da densidade média de utilização de equipamentos e implementos mostrada na tabela 4 também é essencial para o cálculo do maquinário empregado nesta etapa, contemplando que dos equipamentos mostrados na Tabela 11, o equipamento Case A-7700 é utilizado quando a colheita é mecanizada e o equipamento MF 290 RA é empregado na colheita manual.

Na etapa da colheita são utilizados 87,4 kg/ha.ano de maquinário, que ao serem multiplicados pelo fator energético resultam num custo energético de 744,85 MJ/ha.ano. (Tabela 12).

Tabela 11. Equipamentos e Implementos empregados na colheita.

Fonte: Macedo et al. (2004)

Equipamentos	Pot. Cv	Implementos	Consumo (l diesel/h)	Capacidade de trabalho (t/h)	Consumo específico (l/ha)
Operações para a colheita da cana					
Case A-7700	330	Colhedora de cana combinada	40,4	45	74
MF 290 RA	78	Carregadora de cana	7,1	46	12,7
Valtra BH 180	180	Reboque de julieta/transbordo	9	35	21,2

Tabela 12. Consumo de energia fóssil na etapa da colheita. Fonte: elaboração própria baseado em dados de Boddey et al. (2008) e Macedo et al. (2004).

ENTRADAS			ENERGIA	
ITEM	Quant. Bas.	Unid. Bas./ha.ano	Fator Energ. MJ/Unid. Bas.	MJ/ha.ano
COLHEITA				
Máquinas	87,4	kg	8,5	744,9
Óleo Diesel	0,0127	m ³	35.520	449,7
Mão-de-Obra	53,5	h	7,8	419,3
Transporte da Cana	0,0486	m ³	35.520	1.725,6
Subtotal				3.339,4

Para encontrar o consumo de óleo diesel na colheita é necessário empregar o valor de 29,44 l/ha.ano correspondente à média de consumo anual (Mca). O consumo total de óleo na etapa da colheita corresponde à soma do consumo específico dos equipamentos empregados na colheita mecanizada (Ccm), estimado em 74 l/ha.ano e o consumo específico do equipamento empregado na colheita manual (Cct), estimado em 12,7 l/ha.ano, levando em conta que a área colhida manualmente é de 60%.

O consumo do óleo diesel na colheita é o 43% do óleo diesel consumido em todo o processo que ao ser multiplicado pelo valor da Mca resulta a quantidade de 12,7 litros de óleo diesel consumidos por hectare por ano nas tarefas realizadas pelo maquinário na etapa da colheita. O poder calorífico do óleo diesel empregado foi de 35,52 MJ/litro, como demonstrado no Apêndice 1, e finalmente se encontrou o consumo de 449,65 MJ/ha.ano. (Tabela 12).

O quesito mão-de-obra na colheita representa o trabalho de cortar a cana depois de ser queimada. Boddey et al. (2008) afirmaram que a tarefa básica de um homem ao cortar a cana é de 6000 kg/dia, então assume-se que um dia de trabalho equivale a 8 homem-hora. Segundo o IBGE (2010a), a produtividade da cana para a safra 2009-2010 foi de 80,23 Mg/ha. Deve-se levar em conta que o corte da cana só é aplicado na colheita manual (60% da colheita). Finalmente, destes números

resultam 53,5 horas homem/ha.ano, que ao ser multiplicados pelo fator energético (7,84 MJ/h) - cujo cálculo é mostrado no Apêndice 2 - resulta num consumo energético de 419,3 MJ/ha.ano.

O custo da energia fóssil do transporte da cana do campo até a usina depende da distância média percorrida no trajeto dos caminhões até a usina, da capacidade de transporte e do consumo de óleo diesel por km. No relatório “Perfil do setor de açúcar e do etanol no Brasil” de MAPA (2010), se estima que a distância média percorrida pela cana do ponto de corte até a usina, é aproximadamente 23,4 quilômetros, o caminhão mais utilizado é o do tipo “Romeo e Julieta”. Este tipo de caminhão pode transportar entre 26 e 30 Mg de cana segundo Macedo et al. (2004) e consome 1,6 km/litro de óleo diesel estando carregado e 3km/litro estando descarregado.

Para o presente estudo se empregou a média de 28 Mg/caminhão, o rendimento de um hectare de cana segundo a publicação “Confronto das safras 2009-2010” de IBGE (2010a) foi de 80,23 Mg/ha para a safra 2009-2010, logo um hectare de cana precisa de 2,865 cargas, sendo a distância de ida e volta de 46,8 km com uma média de consumo de 2,3 km/litro, o consumo total de óleo diesel será de 58,3 litros. Lembremos que a cada 6 anos tem-se 5 cortes, logo o consumo anual de diesel por hectare será de 45,67 litros , levando em conta o poder calorífico do óleo diesel de 35,52 MJ/litro (Cálculo no Apêndice 1) o consumo médio de energia fóssil para o transporte de cana será de 1.725,6 MJ/ha.ano.

3.4.1.4 Etapa 4: Usina

Uma grande quantidade de energia é utilizada no processamento do etanol na usina, para bombeamento de água, moagem da cana, fermentação e a destilação de etanol. Pimentel e Patzek (2007) estimaram que são necessários 2,55 Gcal por 1000 l de etanol anidro (16,9 GJ/ha.ano) devido à produção de vapor para o aquecimento direto e geradores elétricos. No entanto todas as usinas brasileiras se valem de seu bagaço para gerar esta energia. A queima do bagaço (co-geração de energia) gera vapor, que alimenta caldeiras de alta pressão, e assim a usina se abastece de energia. Macedo et al. (2004), estima que na maioria de usinas exista

um excedente de energia derivada do bagaço de entre 8 e 15% que pode ser exportada para a rede, ou o excedente de bagaço é transportado a fábricas próximas para a geração de energia. Deste modo o uso do bagaço em todas as usinas significa que não é necessário o uso de energia fóssil para alimentar a usina.

Pensar que manter a usina funcionando não consome energia adicional é certo, porém, ainda assim temos um custo energético fundamental, o custo da construção da usina. Boddey et al. (2008) segue o mesmo procedimento (Anexo 3) desenvolvido por Pimentel e Patzek (2007) para calcular a quantidade de energia contida para construir, manter e renovar uma usina que corresponda hoje a média Brasileira.

Macedo et al. (2004) estimaram que a construção de uma usina tem 50 anos de vida útil e um custo de manutenção do 4% por ano. O reporte de Hendriks (2004) indica um valor de 6,2 MJ de energia requerida para produzir 1 kg de cimento. Considera-se que a massa total do cimento utilizado para a construção de uma usina é de 1600 kg (Boddey et al., 2008). Calculando a energia investida na construção e manutenção do prédio da usina ($1,6 + (0,04 \times 50 \times 1,6)$) e acrescentando a energia consumida *in-situ*, temos um gasto de 71,1 MJ/ha.ano.

Para calcular o gasto energético do aço investido na usina, considera-se que a terceira parte da massa total do aço esta disposta como equipamentos e o restante conforma a estrutura da usina. A mesma metodologia exposta no parágrafo anterior foi usada para calcular o gasto energético do aço leve e do aço inoxidável (Ver Anexo 3). Consideram-se 28 kg/ha.ano de aço leve estrutural, resultando num custo energético de 839,7 MJ/ha.ano, 25,1 kg/ha.ano de aço leve para os distintos equipamentos, acrescentando 753 MJ/ha.ano. Para o aço inoxidável, 4,0 kg/ha.ano resultando num custo energético de 286,1 MJ/ha.ano (Tabela 13).

Tabela 13. Consumo de energia fóssil na etapa de produção de etanol na usina.

Fonte: elaboração própria baseado em dados de Boddey et al. (2008).

ENTRADAS			ENERGIA	
ITEM	Quant. Bas.	Unid. Bas./ ha.ano	Fator Energ. MJ/Unid. Bas.	MJ/ha.ano
USINA				
Aço leve estrutural	28	kg	30	839, 7
Aço leve em equipamentos	25,1	kg	30	753
Aço inoxidável	4	kg	71,7	286, 1
Cimento	11,5	kg	6,2	71, 1
Retificação ate 99.5%				225, 3
Reagentes químicos usados na usina				487, 6
Subtotal				2.662, 8

A energia necessária para a retificação de etanol hidratado é considerada 225,3 MJ/ha.ano e a energia consumida proveniente dos insumos da usina foi de 487,6 MJ/ha.ano (Boddey et al., 2008).

3.4.1.5

Etapa 5: Distribuição

Segundo o estudo feito por Carvalho (2010) para atender as distribuidoras do país, tem-se que percorrer aproximadamente $2,17 \times 10^8$ quilômetros. Dividindo-se este valor pelo consumo médio de diesel considerado no estudo (2,5 km/l), temos o consumo anual de aproximadamente $8,7 \times 10^7$ litros de diesel. Multiplicando este valor pelo poder calorífico do diesel – 35,52 MJ por litro – chegamos a um valor energético anual de $4,15 \times 10^9$ MJ.

Tal grandeza, quando dividida pela área de 8.836.504 hectares assumida para o plantio na safra 2009-2010 segundo o relatório “Confronto das safras 2009-2010” publicado pelo IBGE (2010a), nos mostra que ao distribuir o etanol brasileiro, consome-se 349,3 MJ por hectare por ano.

Tabela 14. Consumo de energia fóssil na distribuição do etanol.

Fonte: elaboração própria baseado em dados de Carvalho (2010).

ENTRADAS			ENERGIA	
ITEM	Quant. Bas.	Unid. Bas./ ha.ano	Fator Energ. MJ/Unid. Bas.	MJ/ha.ano
DISTRIBUIÇÃO				
Óleo diesel	0,0098	m ³	35.520	349,3
Subtotal				349,3

3.4.2

Quantificação das emissões de GEE

Para a produção de etanol, combustíveis fósseis são usados diretamente e indiretamente na construção da maquinaria, dos equipamentos, materiais químicos e processos biológicos que são usados na produção de cana de açúcar. O uso destes combustíveis fósseis gera a emissão dos GEE. As quantidades básicas de todos os itens de entrada expostos anteriormente e a energia consumida por esses itens são usadas para estimar a emissão dos GEE utilizando fatores de emissão para cada um dos GEE considerados (CO₂, CH₄ e N₂O) (Apêndice 7).

As emissões de GEE para os *inputs* de mão-de-obra, herbicidas, inseticidas e sementes que se originam de diferentes fontes é segundo Boddey et al. (2008) são melhor representados pelo óleo cru como sua fonte de energia primária necessária para sua fabricação, processamento ou desenvolvimento. Segundo o relatório “*Guidelines For National Greenhouse Gas Inventories*” publicado pelo IPCC (2006a), 1 GJ de óleo cru emite 73,3 kg de CO₂, 0,003 kg de CH₄ e 0,0006 kg de N₂O.

As estimativas para maquinaria foram baseadas na quantidade de aço contido em sua composição. A energia que será assumida provém das indústrias de aço que empregam carvão como fonte de energia primária; 1 GJ é equivalente a 94,6 kg de CO₂, 0,001 kg CH₄ e 0,0015 kg de N₂O (Ipcc, 2006a).

Óleo diesel é a fonte de energia para o transporte de insumos e cana, para as máquinas agrícolas e para irrigação; cada GJ empregado emite 74,1 kg de CO₂, 0,003 kg de CH₄ e 0,0006 kg de N₂O (Ipcc, 2006a).

Utilizou-se a informação do relatório do IPCC (2006a) das emissões segundo a fonte de energia primária que é mais representativa para cada um dos itens expostos nos parágrafos anteriores e as quantidades básicas para encontrar os fatores de emissão para cada item, facilitando os futuros cálculos das emissões.

Os fertilizantes e o calcário completam os componentes na produção da cana-de-açúcar. Na falta de informação relacionada ao tipo de calcário usado nas áreas de cana-de-açúcar, as emissões de CO₂ originadas da adição de calcário foram estimadas pela quantidade de calcário aplicado ao plantio, multiplicada pelo fator de emissão de 0,75 kg de CO₂/kg de calcário, proposto pelo IPCC (2006a). Para a emissão dos fertilizantes, uréia, superfosfato triplo (P₂O₅) e Cloreto de potássio (KCl) são considerados os melhores representantes da adubação NPK usadas nas áreas de plantação de cana-de-açúcar. A contribuição para cada fonte foi estimada por Kongshaug (1998), o autor assume que pela produção de 1 kg de uréia, 1 kg de superfosfato triplo e 1 kg de cloreto de potássio representam 0,61, 0,17 e 0,34 kg de CO₂ emitidos para a atmosfera respectivamente.

Durante o manejo da cultura ocorrem também emissões do N₂O proveniente do Nitrogênio adicionado à torta de filtro e dos fertilizantes. De acordo com Soares et al. (2009) e o relatório do IPCC (2006a), 1% do Nitrogênio aplicado é emitido como N₂O resultando em 167,83 kg de CO₂ eq/ha.ano, e 0,2% do Carbono proveniente da aplicação da vinhaça é emitido como CH₄, resultando em 171,34 kg CO₂ eq/ha.ano.

Na colheita foram levadas em conta as emissões de CH₄ e do N₂O da queima da cana depositada, usou-se um fator de emissão de 2,7 kg de CH₄/Mg de cana depositada e para a emissão de N₂O, Boddey et al. (2008) considerou um fator de emissão de 0,007 kg de N₂O/Mg de cana depositada. Isto resulta numa emissão de 22,05 kg de CH₄/ha.ano e de 0,5717 kg de N₂O/ha.ano. A área colhida após a queima foi considerada como sendo 60% de toda a área colhida. Para os 40% restantes nas áreas sem queima é considerado um fator de emissão de 0,4714 kg N₂O/ha.ano emitindo 55,81 kg de CO₂ eq./ha.ano devido à mineralização dos resíduos.

As emissões resultantes do transporte da cana do campo até a usina somaram 15,284 kg de CO₂ equivalente por hectare por ano.

Para as emissões dos materiais para a construção da usina, foram usados os fatores de emissão do relatório do IPCC usados por Boddey et al. (2008), 0,507 kg de CO₂/kg, 1,6 kg de CO₂ eq/kg e 1,06 kg de CO₂ eq/kg para cimento, aço inoxidável e aço leve, respectivamente, emitindo 5,8; 6,4 e 56,27 kg de CO₂ eq/kg, respectivamente.

Com a finalidade de explicar o impacto da produção de etanol brasileiro de cana de açúcar. A análise foi dividida nas principais etapas de produção. (Apêndice 7: Planilha). As emissões de CO₂ são predominantes no plantio devido ao uso da energia dos combustíveis fósseis nos implementos, no maquinário e no transporte dos implementos. Durante o manejo da cultura a emissão do N₂O e de CH₄, derivada da aplicação da vinhaça é a maior e representa o 46% das emissões expressas em CO₂ equivalentes. Na colheita a principal emissão provém dos gases CH₄ e N₂O e numa porção mínima pela decomposição de N nas áreas não queimadas. A emissão derivada da infraestrutura das usinas na produção de etanol alcança aproximadamente 3% das emissões calculadas para o ciclo completo.