

REGIANE PEREIRA ROQUE

**BALANÇO DE ENERGIA E DE EMISSÕES DA PRODUÇÃO INTEGRADA DE
CACHAÇA DE QUALIDADE E BIOCOMBUSTÍVEL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2015

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

R786b
2015

Roque, Regiane Pereira, 1986-
Balanço de energia e de emissões da produção integrada de
cachaça de qualidade e biocombustível / Regiane Pereira Roque.
– Viçosa, MG, 2015.
viii, 69f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Marcio Arêdes Martins.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Agricultura e energia. 2. Recursos energéticos.
3. Biocombustíveis. 4. Cachaça. 5. Álcool como combustível.
6. Cana-de-açúcar. I. Universidade Federal de Viçosa.
Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de
Pós-graduação em Engenharia Agrícola. II. Título.

CDD 22. ed. 333.9539

REGIANE PEREIRA ROQUE

**BALANÇO DE ENERGIA E DE EMISSÕES DA PRODUÇÃO INTEGRADA DE
CACHAÇA DE QUALIDADE E BIOCOMBUSTÍVEL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 27 de julho de 2015.

Roberto Precci Lopes
(Coorientador)

Williams Pinto Marques Ferreira

Márcio Arêdes Martins
(Orientador)

Aos meus pais e aos meus irmãos, amores incondicionais.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

É impossível concluir uma jornada sozinha, por isso, agradeço ao professor Marcio Arêdes Martins pela oportunidade, ao professor Roberto Precci Lopes, por sua orientação acadêmica e por seu apoio e dedicação que foram fundamentais para a realização desse trabalho.

Agradeço ao professor Juarez de Souza e Silva e ao Ralf Gielow, por suas contribuições.

Agradeço aos meus pais por todo o apoio e incentivo a buscar sempre mais, por acreditarem e incentivar-me a todo instante, e aos meus irmãos por sua admiração e confiança.

À família Santana pela receptividade e por tornarem possível a realização deste trabalho.

Agradeço aos amigos que torceram por mim e me deram apoio nos momentos em que precisei.

À Capes pelo apoio financeiro para a realização da pesquisa.

Por fim, e mais importante agradeço a Deus, pelo dom da vida e por me dar forças e sabedoria nos momentos de dificuldade, permitindo que a jornada fosse cumprida.

BIOGRAFIA

REGIANE PEREIRA ROQUE, filha de Amadeu Roque e Rosa Maria Pereira Roque, nasceu em Itajubá, Estado de Minas Gerais, em 17 de março de 1986.

Em maio de 2006, iniciou o Curso de Engenharia Agrícola e Ambiental na Universidade Federal de Viçosa (UFV), graduando-se em novembro de 2012.

Em agosto de 2013, iniciou no programa de pós-graduação (Mestrado) em Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa, concentrando seus estudos na área de Energia na Agricultura, concluindo-o em julho de 2015.

SUMÁRIO

RESUMO	vii
ABSTRACT	viii
1. INTRODUÇÃO GERAL	1
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2 PRODUÇÃO DE ÁLCOOL NA FAZENDA	2
1.2.1 Etapas da produção de cachaça e de álcool combustível na fazenda	3
1.2.1.1 Preparo do solo e plantio da cana	3
1.2.1.2 Corte da cana	3
1.2.1.3 Moagem da cana-de-açúcar	4
1.2.1.4 Teor de açúcar	4
1.2.1.5 Pé-de-cuba.....	4
1.2.1.6 Fermentação.....	4
1.2.1.7 Destilação do vinho	5
1.2.2 Produção de cachaça e de álcool combustível a partir de pré-destilados.....	5
1.2.3 Rendimento em álcool	6
1.3 PRODUÇÃO DE CANA NO BRASIL	6
1.4 OBJETIVOS	7
1.4.1 Objetivo geral.....	7
1.4.2 Objetivos específicos.....	7
1.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	7
2. BALANÇO DE ENERGIA DA PRODUÇÃO INTEGRADA DE CACHAÇA DE QUALIDADE E BIOCOMBUSTÍVEL	9
2.1 INTRODUÇÃO.....	11
2.2 OBJETIVOS	12
2.2.1 Objetivo Geral	12
2.2.2 Objetivos Específico.....	12
2.3 MATERIAL E MÉTODOS.....	13
2.3.1 Inventário de materiais – Etapa Agrícola	14
2.3.2 Inventário de energia	19
2.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	24
2.4.1 Balanço de energia	24
2.4.1.1 Fase agrícola.....	24
2.4.1.2 Fase industrial.....	29
2.4.2 Alocação.....	32
2.4.3 Balanço energético da produção do caldo de cana e de bagaço.....	34
2.5 CONCLUSÕES	37
2.6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	37
3. BALANÇO DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA NA PRODUÇÃO INTEGRADA DE CACHAÇA DE QUALIDADE E BIOCOMBUSTÍVEL	40
3.1 INTRODUÇÃO.....	42

3.2 OBJETIVOS.....	43
3.2.1 Objetivo Geral.....	43
3.2.2 Objetivos Específicos.....	43
3.3 MATERIAL E MÉTODOS.....	43
3.3.1 Inventário de materiais – Fase Agrícola	44
3.3.2 Inventário de emissões	49
3.4 RESULTADO E DISCUSSÃO.....	54
3.4.1 Emissões de gases de efeito estufa	54
3.4.1.1 Fase agrícola	54
3.4.1.2 Fase industrial.....	62
3.4.2 Alocação.....	63
3.5. CONCLUSÕES	66
3.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	69

RESUMO

ROQUE, Regiane Pereira, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, Julho de 2015. **Balço de energia e de emissões da produção integrada de cachaça de qualidade e biocombustível.** Orientador: Marcio Arêdes Martins. Coorientadores: Roberto Precci Lopes, Juarez de Souza e Silva e Brian Lynn Steward.

A cachaça é uma bebida tipicamente brasileira e sua produção é uma atividade em expansão, com crescente apoio governamental. Muitos produtores de cachaça transformam os resíduos de produção, cabeça e cauda, em álcool combustível. Vários estudos mostraram que a produção de álcool combustível em pequena escala é economicamente viável e apresenta benefícios ambientais. Apesar destas vantagens, existem poucos estudos sobre os custos energéticos e as emissões de gases de efeito estufa na produção de álcool combustível em pequenas escalas em fazendas no Brasil. Com este trabalho objetivou-se o balanço de emissões e a análise energética do sistema de produção integrada, em fazendas, de cachaça de qualidade e álcool combustível de fazenda a partir de resíduos da produção de cachaça. A pesquisa de campo foi realizada em uma microdestilaria e lavouras pertencentes a um produtor localizado na Zona da Mata Mineira. O dispêndio de energia referente à etapa agrícola foi apresentado pelo consumo energético foi de 245,14 MJ TC⁻¹ (tonelada de cana), sendo que deste total 80% foram destinados para produção de cachaça e 20% para obtenção do álcool combustível de fazenda a partir dos subprodutos cabeça e cauda. O consumo de energia na fase industrial foi de 30,44 MJ TC⁻¹, sendo 24,35 MJ TC⁻¹ para a cachaça e 6,09 MJ TC⁻¹ para o álcool combustível de fazenda. A relação de *output/input* foi 4,61 e o indicador de renovabilidade 0,27, mostrando que o álcool combustível produzido na fazenda a partir de subprodutos da cachaça é um combustível renovável. O total das emissões na fase agrícola foi 1.798,46 kg CO₂ eq./ha ano. Os gases de efeito estufa emitidos na fase industrial foi de 457,25 kg CO₂ eq./ha ano, emissões estas devidas ao uso de energia elétrica e da queima do bagaço para geração de energia térmica. A fase agrícola foi responsável por 79,73% das emissões totais e a fase industrial por apenas 20,27%. As emissões diretas de N₂O, devido aplicação de fertilizantes nitrogenados e ao N contido nos resíduos da colheita, foi a categoria mais impactante na fase agrícola, seguida pelas emissões na produção de fertilizantes. Finalmente, o conhecimento dos impactos à qualidade do meio ambiente das atividades da produção da cachaça e do álcool combustível de fazenda poderá contribuir para a proposição de soluções mitigadoras que garantam a sustentabilidade destas atividades.

ABSTRACT

ROQUE, Regiane Pereira, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2015. **Energy balance and emissions from integrated production of quality cachaça and biofuel.** Advisor: Marcio Arêdes Martins. Co-Advisors: Roberto Precci Lopes, Juarez de Souza e Silva and Brian Lynn Steward.

Cachaça is a typical Brazilian drink and its production is an activity expanding with growing government support. Many cachaça producers transform the head and tail wastes produced into fuel ethanol. Several studies have shown that the biofuel ethanol production on a small scale is economically viable and provide environmental benefits. Despite these advantages, there are few studies on the energy costs and the emissions of greenhouse gases for the production of ethanol in small scale in farms in Brazil. The objectives of this study were the emissions balance and the energy analysis of the integrated farm production system of quality cachaça, and of fuel ethanol from the waste of the cachaça production. The field research was carried out in a micro distillery and crops belonging to a producer located in the Zona da Mata Mineira (Minas Gerais, Brazil). The energy consumption related to the agricultural stage was 206,76 MJ TC⁻¹ (TC = metric tons of sugar cane), and of this total 80% was due to the production of cachaça, and 20% for obtaining farm fuel ethanol from the head and tail by products. Energy consumption in the industrial phase was 30,44 MJ TC⁻¹, with 24,35 MJ TC⁻¹ for the production of cachaça, and 6,09 MJ TC⁻¹ to obtain the farm fuel ethanol. The output/input ratio was 4,61 and the renewability indicator was 0,27, thus showing that the fuel ethanol produced on the farm from the cachaça by-products is a renewable fuel. The total emissions in the agricultural phase was 1.798,46 kg CO₂ eq./ ha year. Greenhouse gases emissions from the industrial phase were 457,25 kg CO₂ eq./ ha year and they were due to the use of electric power and the burning of sugar cane bagasse for thermal energy generation. The agricultural phase accounted for 79,73% of the total emissions, and the industrial phase only 20,27%. Direct N₂O emissions due application of nitrogen fertilizer and the N contained in crop residues, was the most impressive category in the agricultural phase, followed by emissions in fertilizer. The knowledge of the impacts on the quality of the environment of the activities of the farm production of cachaça and fuel ethanol could contribute for the proposition of mitigation solutions that ensure the sustainability of these activities.

1 INTRODUÇÃO GERAL

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A industrialização aliada ao crescimento da população mundial tem aumentado a demanda por energia em todo o mundo, e conseqüentemente o aumento da emissão de gases de efeito estufa decorrente desta expansão. A principal fonte de energia utilizada é de origem fóssil, e de acordo com IEA (2012), esta forma de energia é responsável por aproximadamente 81% da demanda mundial de energia primária, destacando-se o uso de petróleo e carvão.

A soma de reservas de petróleo, passíveis de serem exploradas, totaliza 1,137 trilhões de barris, das quais 78% dessas reservas estão no subsolo dos países integrantes da OPEP – Organização dos Países Exportadores de Petróleo. Porém, essas reservas comportam suprir em média a demanda mundial por 40 anos, considerando o mesmo nível de consumo da atualidade (ARAKAKI, 2012).

No Brasil, segundo Brasil (2015), a matriz energética foi suprida em 2014 por aproximadamente 42,73% de fontes renováveis. No entanto, como demonstrado pela Figura 1, o uso de fontes não renováveis para suprimento de energia primária tem aumentado nos últimos anos.

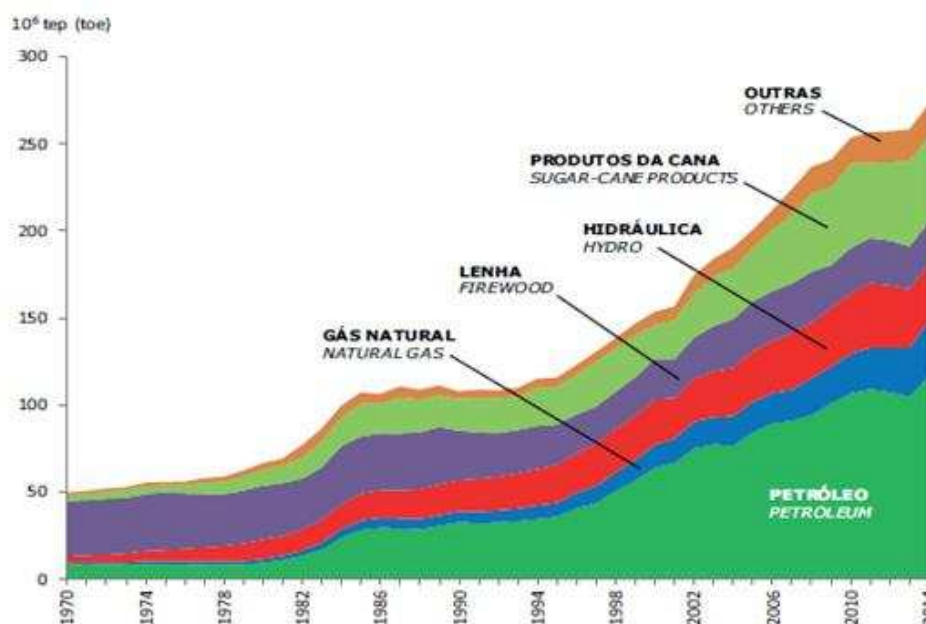


Figura 1: Produção de energia primária no Brasil no período de 1970-2014.

Fonte: (BRASIL, 2015).

Uma das maneiras de se determinar os impactos ocasionados no meio ambiente pela produção da cana de açúcar e posteriormente de produtos advindos é através do balanço de emissões de gases de efeito estufa e balanço de energia em todo o ciclo de vida. Este procedimento permite conhecer o elo da cadeia produtiva mais impactante em todo o processo.

A escolha da cachaça para este estudo deve-se ao fato de ser uma bebida de origem brasileira e produzida em todo território nacional. Segundo o Instituto Brasileiro de Cachaça (IBRAC, 2012), no Brasil existem mais de 40.000 produtores de cachaça e em média 4.000 marcas de cachaça. Estima-se que são produzidos anualmente 1,2 bilhões de litros, com geração de 600.000 empregos diretos e indiretos.

O uso dos subprodutos da cachaça, cabeça e cauda, como matéria prima para produção do biocombustível álcool de fazenda, segundo Bonato Filho (2013), é uma atividade lucrativa em sistemas de associação de produtores. Maroun e La Rovere (2014) confirmam em seus estudos que a produção de álcool combustível em sistemas de cooperativa é uma atividade economicamente viável quando integrada à produção de alimentos e ambientalmente favorável.

Diante do apresentado anteriormente, estudos voltados para a determinação do balanço de energia e de emissões ao longo da cadeia produtiva é de fundamental importância para minimizar os impactos oriundos dessa atividade.

1.2 PRODUÇÃO DE ÁLCOOL NA FAZENDA

O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, e também o maior produtor de etanol de açúcar a partir da cana. O Brasil apresenta algumas vantagens quando comparado a outros países para a produção de etanol. Um dos diferenciais é a disponibilidade de terras aráveis e condições climáticas favoráveis ao cultivo da cana-de-açúcar. De acordo com a CONAB (2014), a área plantada com cana-de-açúcar é de 8.811,43 milhões de hectares, sendo que aproximadamente metade da área da cana é destinada à produção de açúcar, evidenciando que o etanol não compete com a produção de alimentos.

Silva (2011) citou que pode-se considerar o álcool da cana como uma opção para geração de novos empregos em um país que apresenta um excedente de mão-de-obra. O etanol pode contribuir com a balança comercial com a redução na importação de combustíveis fósseis e exportação. Em relação ao aspecto ambiental, destacou que o álcool combustível

gera menor quantidade de resíduos tóxicos e contribui para uma emissão menor de gases que causam o efeito estufa, sendo o material gerado (CO₂) sequestrado pela fotossíntese quando a cana encontra-se em crescimento ou na formação de um novo canavial.

O álcool em nível de fazenda pode ser produzido a partir do caldo de cana fermentado ou usando como matéria prima os subprodutos, cabeça e cauda, da produção da cachaça. Segundo Bonato Filho (2013), a produção de álcool combustível de fazenda a partir da cabeça e da cauda é uma atividade viável economicamente, sendo uma forma de aproveitamento dos resíduos para geração de renda.

1.2.1 Etapas da produção de cachaça e de álcool combustível na fazenda

As etapas envolvidas na produção de cachaça e álcool de fazenda a partir dos resíduos cabeça e cauda compreendem o preparo do solo e plantio da cana, o corte da cana, a moagem da cana, a obtenção do teor de açúcar ideal, o pé de cuba, a fermentação e a destilação do vinho.

1.2.1.1 Preparo do solo e plantio da cana

As épocas que permitem o plantio da cana de açúcar são de outubro a novembro (cana de ano) e de janeiro a março (cana de ano e meio). Realizando o plantio na primeira época, obtém-se a cana de ano, e seu estágio de maturação ocorre após o período de brotação que se desenvolve até março/abril. Algumas das vantagens da cana de ano é uma melhor brotação das socas, pois o corte é realizado em épocas com condições de clima favorável e seu primeiro corte após o plantio, é feito com maior rapidez em relação à cana de ano e meio. No segundo caso, a época de brotação e desenvolvimento da cana de ano e meio, ocorre em meses favoráveis à cultura, propiciando geralmente uma maior produtividade, e permite melhor distribuição de mão de obra em outras atividades como a manutenção e a colheita, por serem realizadas em diferentes momentos (MAIA e CAMPELO, 2006).

1.2.1.2 Corte da cana

O corte de cana é realizado após ser atingido o estágio de maturação ideal para moagem. A queima prévia da cana de açúcar aumenta rendimento do trabalhador, porém, com esta prática observa-se perda de açúcares e facilitação de contaminações microbiológicas. A cana deve ser colhida na quantidade suficiente para a moagem em um período de até 48 horas. Para

se evitar perdas de matéria-primas, recomenda-se que o corte seja feito rente ao solo. O transporte dos colmos cortados é realizado por caminhões ou carretas, tratores ou até mesmo por carroças (CARDOSO, 2006). Em média um homem colhe de 1 a 3 toneladas de cana não queimada por dia (dado obtido com produtor em estudo).

1.2.1.3 Moagem da cana-de-açúcar

A moagem consiste na extração do caldo de cana através de rolos de moendas. Geralmente, em fábricas artesanais, a alimentação dos ternos de rolos é feita manualmente (MAIA E CAMPELO, 2006). Em geral, a nível de fazenda, não é comum lavagem da cana, por não se realizar a queima antes da colheita.

1.2.1.4 Teor de açúcar

O brix ideal do caldo obtido para fermentação é entre 14° e 16°, sendo o ajuste do teor de açúcar realizado através da diluição com água limpa, inodora, incolor, sem germes patogênicos e dentro dos padrões de potabilidade. O caldo muito rico em açúcar, acima de 16%, está sujeito a uma fermentação com atraso ou incompleta (OLIVEIRA et al., 2005).

1.2.1.5 Pé-de-cuba

Os fermentos são utilizados para elaboração do “pé-de-cuba” que é o inóculo utilizado para acelerar o processo inicial da fermentação. Em grande parte das destilarias brasileiras é empregado como inóculo inicial o fermento desidratado, devido à possibilidade de compra da quantidade inicialmente necessária, evitando-se a operação de multiplicação e os riscos inerentes nesse processo (ALCARDE, 2015). Nas pequenas propriedades usa-se o fermento natural elaborado pelo próprio produtor ou o fermento prensado.

1.2.1.6 Fermentação

O açúcar da cana é transformado em álcool e gás carbônico (CO₂) através da fermentação do caldo. O gás CO₂ produzido é liberado e não traz prejuízo ao processo fermentativo (OLIVEIRA et al., 2005). O tempo de fermentação empregado na microdestilaria em estudo é de 36 horas.

1.2.1.7 Destilação do vinho

A destilação tem por finalidade separar os elementos de uma solução que apresentam temperaturas de ebulição diferentes. Quando puros, o álcool etílico apresenta uma temperatura de ebulição de 78,15 °C e a água quando presente nas mesmas condições apresenta temperatura de ebulição de 100 °C. Aquecendo a solução água-álcool, até uma temperatura adequada, ocorrerá à mudança de estado do álcool de líquido para vapor e, posteriormente após este vapor ser submetido a resfriamento o mesmo passa para o estado líquido. Na realização deste processo, tem-se por objetivo a recuperação do álcool dentro dos padrões de qualidades estabelecidos, em níveis que são compatíveis com os equipamentos utilizados e atendendo as metas de produção. Para que a operação ocorra de uma forma eficiente, é necessário que os equipamentos sejam controlados de forma que as temperaturas das diversas fases do processo, bem como as vazões de alimentação da água de refrigeração e dos trocadores de calor apresentem a temperatura ideal necessária em tais processos. O álcool é destilado em equipamentos especiais denominados coluna de retificação (SILVA, 2007).

1.2.2 Produção de cachaça e de álcool combustível a partir de pré-destilados

A produção de cachaça artesanal de qualidade é muito parecida com a produção de álcool combustível produzido a partir da fermentação do caldo de cana. As etapas se repetem o que permite aproveitar quase todos os equipamentos utilizados no preparo do fermento ou pé-de-cuba, na moagem da cana, na decantação e diluição do caldo, na fermentação e destilação do vinho. A diferença fundamental está no fato de que a destilação da cachaça é realizada em alambiques tradicionais, enquanto a produção de álcool é feita em colunas de destilação denominadas colunas de retificação. Sendo assim, o produtor de cachaça já domina grande parte do processo da produção de álcool combustível de fazenda, tornando-se necessário apenas a aquisição de uma coluna de retificação (BONATO FILHO, 2013).

A destilação do caldo de cana fermentado para a obtenção de cachaça é dividida em três frações: cabeça, coração e cauda. Não devem ser aproveitadas para a produção de cachaça a primeira e a última fração (cabeça e cauda) devido às mesmas serem ricas em substâncias indesejáveis, como por exemplo, aldeídos e fenóis, sendo prejudiciais à saúde do consumidor; portanto, são estes os resíduos que podem ser utilizados para a produção de álcool combustível (SORATTO et al., 2007). Com estas frações da produção pode-se produzir quantidades significativas de etanol para o atendimento das necessidades de energia do

produtor rural (uso automotivo, produção de energia mecânica, geração de energia elétrica, uso em fogões e para outros fins) (SILVA, 2011).

1.2.3 Rendimento em álcool

Pode-se considerar que em uma pequena unidade de destilação, para produzir álcool a partir da fermentação do caldo, são necessários, em média, 100 litros de mosto para produzir, em média, 10 litros de álcool combustível. É possível extrair de uma tonelada de cana com o uso de pequenos engenhos, 600 litros de caldo, concluindo-se que é possível obter 60 litros de álcool de uma tonelada de cana. Considerando que um hectare de cana pode, em média, fornecer 100 toneladas, conclui-se que é possível obter 6000 litros de álcool (SILVA, 2007).

Segundo Silva (2007), caso a produção de álcool seja realizada usando pré-destilados da cachaça, pode-se considerar que a quantidade de caldo obtida a partir de uma tonelada de cana é de 600 litros de caldo produzindo em torno de 11 litros de álcool. Sendo assim, de um hectare que tenha produção de 100 t de cana, pode-se produzir 1110 litros de álcool e mais 11.400 litros de cachaça.

1.3 PRODUÇÃO DE CANA NO BRASIL

Sendo o Brasil o maior produtor de cana de açúcar do mundo de acordo com a CONAB (2015), totalizando na safra de 2014/2015 a produção de 634,8 milhões de toneladas, aumenta a necessidade de gerenciamento dos problemas ocasionados por este rápido crescimento. Para isso, segundo Ramos e Silva (2012) é de fundamental importância o conhecimento de todos os processos agrícolas envolvidos na produção da cana de açúcar, assim como seu processamento industrial para obtenção de produtos, para minimização de impactos gerados nestas etapas.

O conhecimento dos impactos à qualidade do meio ambiente das atividades da produção da cachaça e do álcool combustível de fazenda poderá contribuir para a proposição de soluções mitigadoras que garantam a sustentabilidade destas atividades

Este trabalho foi realizado em uma microdestilaria localizada na Zona da Mata Mineira, situada a 219 km de Belo Horizonte e 52 km de Viçosa. O proprietário da microdestilaria é auto suficiente na produção da cana de açúcar, e suas lavouras ficam localizadas dentro de um raio médio de 13 quilômetros no entorno da unidade produtora.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo geral

Com este estudo pretende-se quantificar as entradas e saídas, determinar o balanço de emissões e de energia das etapas agrícolas e industriais na cultura da cana de açúcar e no seu processamento, para produção integrada de cachaça de qualidade e biocombustível álcool de fazenda, a partir de subprodutos da produção da cachaça.

1.4.2 Objetivos específicos

- i. Quantificar as entradas e saídas de materiais (insumos) das etapas: preparo do solo, plantio da cana de açúcar, tratos culturais, colheita e transporte da cana de açúcar até a microdestilaria, e na etapa industrial da produção da cachaça e do álcool combustível;
- ii. Determinar o balanço de emissões da produção integrada da cachaça de qualidade e álcool combustível; e
- iii. Determinar o balanço de energia da produção integrada da cachaça de qualidade e álcool combustível.

1.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALCARDE, A.R. Agência Embrapa de Informações Tecnológica. **Árvore de Conhecimento: Cana de Açúcar**. Disponível em: http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_105_22122006154841.html. Acesso em: 25 de maio de 2015.

ARAKAKI, S. R. M. V. **Estudo dos custos ambientais inerentes ao processo de expansão e consolidação do setor sucroenergético no Estado de Mato Grosso do Sul**. 175 p. Dissertação (Mestrado em Administração) - Curso de Pós-Graduação em Administração, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2012.

BONATO FILHO, G.G. **Produção de álcool combustível a partir de subprodutos da fabricação de cachaça para associação de produtores**. Viçosa, MG: UFV, 2013. 98 p. Dissertação (Mestrado Engenharia Agrícola)- Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanço Energético Nacional 2015**. Ano base 2014- Relatório Final. Rio de Janeiro: EPE, 2015.

CARDOSO, M. G. **Produção de aguardente de cana**. 2. Ed. Ed. UFLA.2006. 445 p.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira.** Cana de Açúcar, v.1. Safra 2014/2015. Segundo levantamento. Brasília: Conab, 2015.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira.** Cana de Açúcar, v.2. Safra 2015/2016. Primeiro levantamento. Brasília: Conab, 2015

IBRAC – Instituto Brasileiro da Cachaça. **Mercado Interno.** Brasília – DF. Disponível em http://www.ibrac.net/index.php?option=com_content&view=article&id=46&Itemid=47. Acesso em: 18 julho 2015.

IEA (International Energy Agency). **Energy Balances of non-OECD countries 2009 - 2010**, Paris, 2012.

MAIA, A.B.R.A.; CAMPELO,E.A.P. **Tecnologia da cachaça de alambique-** Belo horizonte: SEBRAE/MG; 129P, 2006.

MAROUN, M. R., La ROVERE, E. L. (2014). Ethanol and food production by family smallholding in rural Brazil: Economic and socio-environmental analysis of micro distilleries in the State of Rio Grande do Sul. **Biomass and Bioenergy** 63 (2014) 140 – 155.

OLIVEIRA C.R.; GARÍGLIO H.A.A.; RIBEIRO M.M., ALVARENGA M.S.P.; MAIA F.X. **Cachaça de alambique - Manual de boas práticas ambientais e de produção.** Convênio de cooperação técnica- SEAPA/SEMAD/AMPAQ/FEAM/IMA. 72 p. 2005.

RAMOS , R. P.; SILVA , H. O. F. Modelo matemático para determinação do custo e produção de energia na cultura da cana-de-açúcar. **Energ. Agric.**, Botucatu, vol. 27, n.1, janeiro-março, 2012, p.122-137

SILVA, J. S. **Produção de álcool na fazenda: equipamentos, sistemas de produção e usos.** Viçosa, MG. Ed. Aprenda Fácil. 2011, vol. 1, 390p.

SILVA, J.S. **Produção de álcool combustível na fazenda e em sistema cooperativo** Ed. Viçosa-MG, v. 1,168p, 2007.

SORATTO, A. N., VARVAKIS, G., HORII, J. A certificação agregando valor à cachaça do Brasil. **Ciência e Tecnologia de Alimentos.** 2007, v. 27, n. 4, p. 681-687.

2. BALANÇO DE ENERGIA DA PRODUÇÃO INTEGRADA DE CACHAÇA DE QUALIDADE E BIOCOMBUSTÍVEL

Resumo

Com este trabalho buscou-se analisar os aspectos energéticos da produção integrada de cachaça de qualidade e do álcool combustível em nível de fazenda. Diversos estudos mostraram que é economicamente viável a produção do álcool combustível de fazenda em pequena escala, porém, no Brasil, existem poucas pesquisas relacionadas ao balanço energético de sua produção em pequena escala. Obtiveram-se coeficientes técnicos de produção de cana de açúcar e de cachaça e álcool combustível de fazenda em uma pequena microdestilaria localizada na Zona da Mata Mineira, com capacidade de produção de 5.271,63 litros de cachaça e de 658,95 litros de álcool de fazenda por dia. A energia despendida na produção da cana de açúcar foi de 245,14 MJ TC⁻¹ (tonelada de cana), considerando todas as operações agrícolas, o transporte interno de insumos, transporte de mudas, da cana cortada da lavoura à microdestilaria e a produção de mudas. No processamento da cana de açúcar para obtenção da cachaça e do álcool combustível o gasto energético foi de 30,44 MJ TC⁻¹. A relação de *output/input* de energia foi de 4,61 (álcool combustível + bagaço excedente). As categorias que mais demandaram energia foram o uso de fertilizantes nitrogenados e o uso de óleo Diesel. O índice de renovabilidade do combustível foi de 0,27, mostrando que o álcool combustível produzido na fazenda é um combustível renovável.

Palavras-chave: álcool combustível de fazenda, aguardente, cana de açúcar, agroenergia, bioetanol.

Abstract

This study analyzes the energy aspects of the integrated production of quality cachaça and fuel ethanol at farm level. Several studies have shown that the production of farm fuel ethanol is economically on a small scale, but in Brazil there are few studies related to the energy balance of its production at this scale. Technical coefficients were obtained for sugar cane and cachaça production, and farm fuel ethanol in a small micro distillery located in the Zona da Mata Mineira (Minas Gerais, Brazil), with a production capacity of 5.271,63 liters of cachaça and 658,95 liters of farm fuel ethanol per day. The energy expended in the production of the sugar cane was 245,14 MJ TC⁻¹ (TC = metric tons of sugar cane), considering all agricultural operations, and the internal transport of raw materials, of sugar cane seedlings, of the cut sugar cane from the crop to the micro distillery, and the production of seedlings. In the processing of the sugar cane to obtain cachaça and fuel ethanol energy expenditure was 30,44 MJ TC⁻¹. The output / input energy ratio was 4,61 (fuel ethanol + surplus sugar cane bagasse). The categories that require more energy were the use of nitrogen fertilizers followed Diesel oil use. The index of biofuel renewability was 0,27, thus showing that the bioethanol produced on the farm micro distillery is a renewable fuel.

Keywords: farm fuel ethanol, cachaça, sugar cane, bioenergy, bioethanol.

2.1 INTRODUÇÃO

A cachaça, também denominada aguardente de cana ou pinga, é uma bebida alcoólica tipicamente brasileira descoberta pelos escravos dos engenhos de açúcar em meados do século XVI (PORTAL SÃO FRANCISCO, 2015). A atividade da produção de cachaça está expandindo em nosso território, e com maior apoio governamental. A aguardente é a segunda bebida alcoólica mais consumida, ficando atrás somente do consumo de cervejas e com o aumento da simpatia pela “caipirinha”, “drinque” mais conhecido, tem expectativas de ampliação do mercado externo.

A cachaça de qualidade é proveniente somente de uma das frações da destilação do mosto fermentado, sendo esta fração denominada coração. Alguns produtores aproveitam os subprodutos da destilação, cabeça e cauda, e os transformam em álcool combustível. Estes subprodutos correspondem a cerca de 15% do início e 10% do final do volume destilado (SILVA, 2007).

A produção de cana de açúcar, cachaça e álcool combustível de fazenda requer o uso de energia na forma direta e indireta. O uso de energia na forma direta se deve àquela despendida nas operações agrícolas de preparo do solo, nos tratos culturais, na irrigação, colheita e no transporte interno da produção. O uso de combustíveis fósseis e de energia elétrica são os principais insumos energéticos diretos. A energia indireta está relacionada com a energia envolvida na fabricação dos insumos agrícolas utilizados como fertilizantes e pesticidas e de bens duráveis como máquinas agrícolas, equipamentos e edificações.

A contabilização das energias diretas e indiretas nas fases agrícola e industrial da produção, processamento e industrialização da cana de açúcar é de suma importância para a realização do balanço energético da produção integrada de cachaça e álcool combustível de fazenda. O balanço de energia permite conhecer a relação *output/input* e qual elo da cadeia de produção é mais dispendiosa em energia, permitindo tomada de decisões para o uso racional de insumos.

Assim como qualquer produto de bionergia, o bioetanol demanda a utilização de insumos de origens fósseis para sua produção; logo, é necessária uma análise para verificar o rendimento da produção do biocombustível em relação à entrada de energia para que o mesmo seja produzido (TRIANA, 2011).

Os estudos referentes à produção de álcool combustível em pequena escala remetem aos trabalhos realizados por Nogueira (2008), Santos (2011), Silva (2012), Maroun (2013) e Bonato Filho (2013). Santos (2011) realizou estudos sobre a viabilidade energética e econômica da produção de etanol em microdestilaria. Segundo este autor o balanço de energia na produção de etanol obtido a partir do caldo de cana é favorável com uma razão *output/input* de 5,01, ou seja, um ganho energético de 4,01.

Silva (2012), ao estudar a produção de bioetanol no contexto da agricultura familiar a partir da experiência da Cooperbio, encontrou balanço desfavorável, devido à entrada de energia na forma de lenha em vez do uso de bagaço de cana, o qual era devolvido ao produtor.

Os poucos estudos relacionados ao balanço energético da produção integrada de cachaça e bioetanol em pequena escala, aliado à importância destes produtos para o mercado interno (álcool de fazenda) e externo (cachaça de qualidade), motivaram a realização do presente estudo.

2.2 OBJETIVOS

2.2.1 Objetivo Geral

Este estudo teve como objetivo geral determinar os custos energéticos da produção integrada de cachaça de qualidade e álcool combustível de fazenda.

2.2.2 Objetivos Específicos

- i. Determinar o balanço de energia da produção de cana de açúcar (fase agrícola) em nível de fazenda;
- ii. Determinar o balanço de energia da fase industrial do processamento de cana de açúcar para produção integrada de cachaça e álcool combustível;
- iii. Determinar a relação *output/input* e o índice de renovabilidade da produção de álcool combustível de fazenda integrada à produção de cachaça de qualidade.

2.3 MATERIAL E MÉTODOS

Para a execução do presente estudo realizou-se o inventário dos insumos e equipamentos utilizados nas fases agrícola e industrial da produção integrada de cachaça e álcool combustível de fazenda, em uma propriedade produtora de cachaça de qualidade que utiliza os resíduos cabeça e cauda para produção de bioetanol para autoconsumo. A propriedade, localizada na Zona da Mata Mineira, situa-se a 219 km de Belo Horizonte e 52 km de Viçosa. Devido à necessidade de detalhamento dos dados exigidos para o presente estudo, partes deles foram obtidos a partir de literaturas, catálogos de fabricantes de equipamentos e consulta direta a produtores de cana de açúcar; porém, a maior parte das informações foram obtidas do caderno de anotações do controle de operações e contabilidade da unidade de produção, e de entrevistas com o proprietário e com o gerente de produção da unidade produtora integrada de cachaça e álcool combustível de fazenda, doravante denominada de microdestilaria.

A fronteira definida para determinação do balanço de energia, incluiu as fases agrícola e industrial do processamento da cana de açúcar, compreendendo, portanto, as etapas que vão desde o plantio à produção da cachaça e do biocombustível (Figura 1).

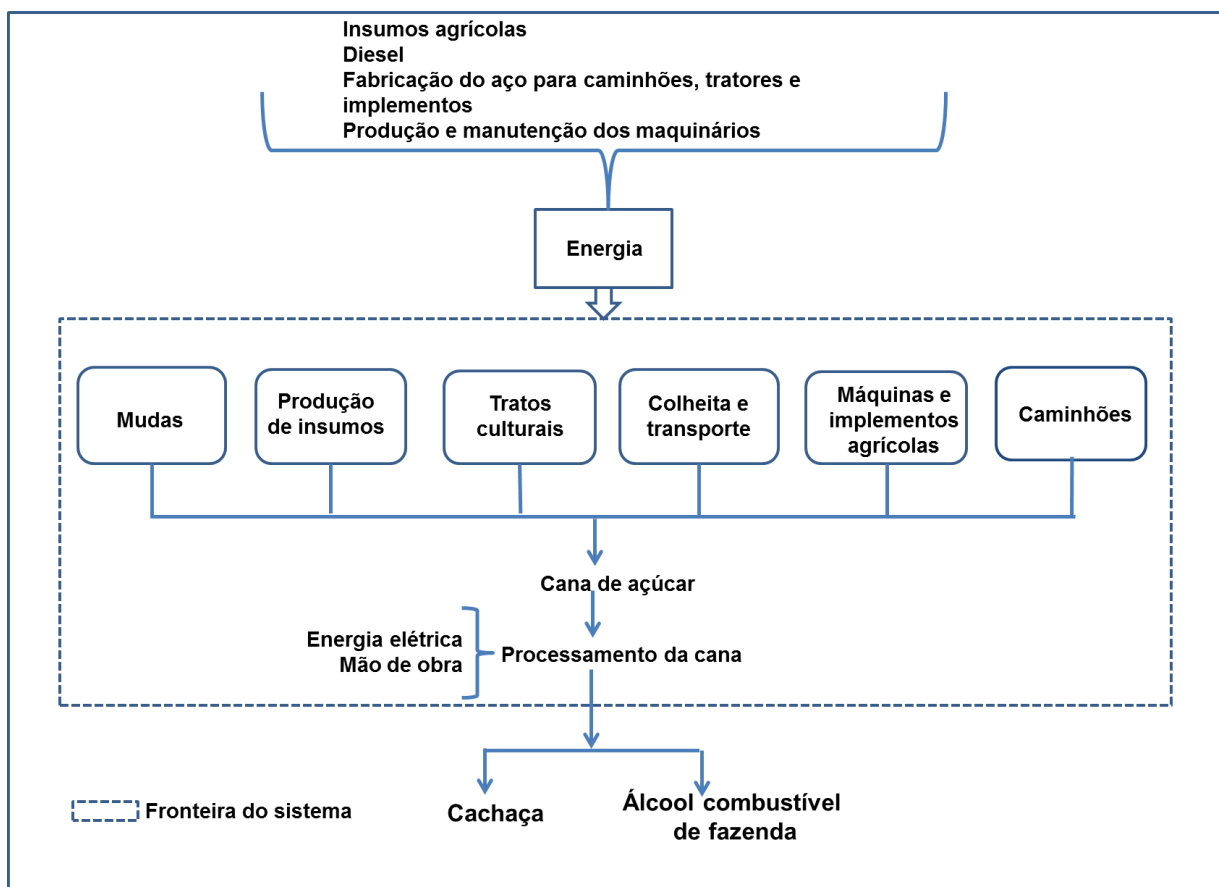


Figura 1- Etapas agrícolas e industriais consideradas no balanço energético.

Fonte: Adaptado de Souza (2010)

2.3.1 Inventário de materiais – Etapa Agrícola

Na unidade de produção onde foram obtidos os dados deste estudo, a produção do álcool combustível de fazenda é realizada de forma integrada à produção da cachaça a partir dos subprodutos da destilação do vinho. A capacidade diária de produção de cachaça na safra 2013/2014 foi obtida por meio de anotações do produtor chegando ao valor de 5.272 litros por dia, numa jornada média diária de 8 horas de trabalho. A unidade de destilação dos subprodutos da cachaça, cabeça e cauda, é do tipo batelada e na safra de 2013/2014 foram obtidos 56.670 litros de álcool de fazenda durante 86 dias de trabalho.

O volume de álcool de fazenda foi alcançado sabendo que, segundo o produtor, a cada 400 litros de destilados são obtidos 40 litros de cabeça e 40 litros de cauda, e desses 80 litros de cabeça e cauda resultam 40 litros de álcool combustível de fazenda. Sendo assim, a cada 400 litros de destilados obtiveram-se 320 litros de cachaça e 40 litros de álcool de fazenda, e como na produção em 2014 foram obtidos 453.360 litros de cachaça, têm-se 56.670 litros de álcool de fazenda.

A energia envolvida para geração de vapor, em todo o processo de produção da cachaça e do bioetanol, foi suprida por parte do bagaço gerado na extração do caldo sem a presença de outras biomassas no processo de combustão.

Os dados de produção de cachaça e do álcool combustível de fazenda, obtidos mediante informações conseguidas junto ao proprietário da microdestilaria, são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1- Dados de produção de cachaça e de álcool combustível de fazenda da microdestilaria para a safra 2013/2014

Parâmetros	Unidade	Quantidade
Produção de cachaça	L dia ⁻¹	5.271,63
Produção de álcool de fazenda	L dia ⁻¹	658,95
Produtividade media do canavial	t ha ⁻¹	73,60
Área de produção (não contínua)	ha ano ⁻¹	50
Rendimento de cachaça	L (ton cana) ⁻¹	123,19
Rendimento de álcool de fazenda de cabeça e cauda	L (ton cana) ⁻¹	15,39
Período de processamento industrial	dias	86
Tempo médio de destilação	horas dia ⁻¹	8
Produção anual de cachaça	L ano ⁻¹	453.360
Produção anual de álcool de fazenda	L ano ⁻¹	56.670

A produtividade alcançada pelo produtor na safra de 2013/2014 foi de 73,6 toneladas de cana de açúcar por hectare, ficando próxima da média nacional de 75 ton ha⁻¹ para a safra 2013/2014 segundo a CONAB (2014).

Toda cana de açúcar utilizada na microdestilaria provém de área e equipamentos próprios. Os equipamentos, implementos e veículos utilizados nas operações de campo foram inventariados para cada operação agrícola apresentada na Tabela 2. Por se tratar de produção em pequena escala um mesmo equipamento é utilizado em diferentes operações. Algumas operações de campo não utilizam maquinário específico como, por exemplo, na aplicação de adubo. Nas operações de campo e na agroindústria considerou-se a jornada de trabalho de oito horas por dia.

Tabela 2- Operações agrícolas e maquinários utilizados na produção de cana de açúcar.

Operação agrícola	Tipo de implemento, trator e caminhão
Cana planta	
Erradicação Mecânica da soqueira (aração)	Trator 105 CV, Arado 3 discos
Gradagem (2x)	Trator 105 CV, Grade Aradora 18 discos
Transporte interno de insumos	Caminhão com capacidade de 12 toneladas
Aplicação de corretivo do solo	Trator 105 CV, Espalhadeira com capacidade de 500 kg
Sulcação	Trator 105 CV, Sulcador de 2 linhas
Aplicação de adubo*	-
Corte de muda*	-
Transporte de mudas	Caminhão com capacidade de 12 toneladas
Descarregamento, distribuição e picação*	-
Cobrição*	-
Colheita sem queimada*	-
Carregamento da cana por carregadeira	Trator 88 CV, carregadeira
Cana soca	
Capina química*	-
Transporte de adubo	Caminhão com capacidade de 10 toneladas
Aplicação de adubo*	-

* Operação manual.

Recentemente o proprietário mudou o tipo de corretivo do solo deixando de aplicar calcário na dosagem de 2.000 kg ha⁻¹ para a utilização de agrosilício na dosagem de 1.500 kg ha⁻¹ na cana planta. Devido à ausência de informações sobre o consumo de energia na produção de agrosilício, no presente estudo foi considerada a aplicação de calcário, como em anos anteriores, devido à disponibilidade de fatores de intensidade energética para este corretivo.

Os dados fornecidos pelo produtor referentes ao tempo gasto nas operações de campo e o consumo de combustível são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Coeficientes técnicos de produção de cana de açúcar para produção de cachaça e bioetanol.

Operação agrícola	Trator Potência CV	Mão de obra		Consumo de Diesel	
		Homem horas hectare ⁻¹	Tratorista	Litros h ⁻¹	Litros ha ⁻¹
Cana Planta					
Aração ^[1]	105	—	2,16	13,07	28,23
Gradagem (2x) ^[1]	105	—	3,67	13,00	47,71
Aplicação de corretivo do solo ^[1]	105	0,50	0,50	13,32	6,66
Sulcação ^[1]	105	—	3,17	12,98	41,15
Aplicação de adubo, corte e carregamento de mudas, descarregamento, distribuição, picação e cobrição ^[1]	—	320,00	—	—	—
Colheita manual ^[1]	—	196,26	—	—	—
Subtotal	—	516,76	9,5	52,37	123,75
Cana Soca					
Capina química ^[2]	—	5,16	—	—	—
Aplicação de adubo ^[3]	—	2,28	—	—	—
Subtotal	—	7,44	—	—	—
Carregamento de cana cortada para caminhão (Carregadeira) ^[1]	88	—	2,45	10,00	24,53
Total	—	524,20	11,95	62,37	148,28

^[1] Dados obtidos da Microdestilaria. ^[2] Obtido de produtor de cana de açúcar da Zona da Mata Mineira.

^[3] Neves (1973).

O valor de consumo de combustível pela carregadeira Santal de 10 L hora⁻¹ foi obtido em Souza (2010), e o tempo médio de 20 minutos para o carregamento de um caminhão com capacidade média de 10 toneladas foi fornecido pelo produtor.

Na colheita manual considerou-se que um homem colhe 3 toneladas (ha dia)⁻¹. Na safra de 2014 foram colhidas 3.680 toneladas de cana de açúcar, cultivadas em glebas com área média de 5 hectares e distantes em média 13 quilômetros da microdestilaria. O transporte da cana da lavoura à microdestilaria foi realizada por três caminhões com capacidade média de transporte de 10 toneladas. A distância total percorrida pelos caminhões foi obtida pela soma do número de viagens das glebas até a usina, obtendo uma distância total de 9.970 km,

considerando ida e volta. Para o consumo de combustível considerou-se o consumo médio de 3,5 km L⁻¹ de óleo Diesel para o caminhão vazio, e de 2,5 km L⁻¹ para caminhão carregado (Souza, 2010).

Em relação ao consumo de combustível no transporte dos insumos utilizados pelo produtor, foram consideradas as distâncias percorridas da microdestilaria até a lavoura para transporte de corretivo do solo, adubo para cana soca e cana planta, e o consumo de combustível no transporte de mudas.

O transporte interno dos insumos é realizado da microdestilaria até as glebas onde são aplicados. Para este transporte utilizaram-se os mesmos valores de consumo citados anteriormente, porém, tomando-se o valor médio de consumo de 0,34 L km⁻¹ para o trajeto de ida e volta.

O consumo de combustível para o transporte de cana de açúcar e insumos foi obtido pela equação 1.

$$C. C. \left(\frac{\text{Litros}}{\text{hectare}} \right) = \frac{Q.t.(kg \text{ ha}^{-1})}{\text{Cap.c.}(kg)} \times \text{Dis. perc. (km)} \times C. m. \text{ comb. (L km}^{-1}) \quad (1)$$

em que:

C. C. - consumo de óleo diesel;

Q. t. - quantidade de insumo transportada;

Cap. c. - capacidade média do caminhão que realiza o transporte do insumo;

Dis. perc. - distância total de ida e volta percorrida da microdestilaria até a lavoura; e

C. m. comb. - consumo médio de óleo diesel por quilômetro percorrido.

Após o corte da cana de açúcar são realizados tratamentos culturais na cana soca como a capina química e a aplicação de adubo. A capina é realizada com uso de pulverizadores costais usando como herbicida o Velpar K.

Na Tabela 4 são apresentados as quantidades de fertilizantes, calcário, herbicida e óleo Diesel utilizados na cultura da cana de açúcar.

Tabela 4 – Quantidades de insumos aplicados na cultura da cana de açúcar

Entrada	Consumo de fertilizantes, kg ha ⁻¹		Consumo Total, kg ha ⁻¹ [1]	Consumo Médio [2], kg (ha ano) ⁻¹
	Cana Planta	Cana soca		
	600 kg	500 kg		
	00-25-15	20-00-20		
Nitrogênio N	-	100	500	83,33
Fosforo P ₂ O ₅	150	-	150	25,00
Potássio K ₂ O	90	100	590	98,33
		Calcário		
Calcário	2.000	-	2.000	333,33
		Herbicida		
Herbicida	-	1,17	5,85	0,98
		Óleo Diesel		
Óleo Diesel ^[3]	104,00	-	104,00	17,33

[1] Refere-se à soma das quantidades aplicada na cana planta mais cinco vezes a quantidade aplicada na cana soca ($500 = 0 + 5 \times 100$). [2] Média anual durante o ciclo de seis anos. [3] Obtido da Tabela 3 aqui expresso em kg (ha ano)⁻¹, não inclui o transporte de cana. Para converter litros hectare⁻¹ para kg hectare⁻¹ multiplica-se pela massa específica de óleo Diesel 0,84 kg L⁻¹ (Balanço energético nacional, 2014).

2.3.2 Inventário de energia

Para a realização dos cálculos das energias indiretas envolvidas na produção dos insumos agrícolas empregados na cultura da cana-de-açúcar, foram utilizados os fatores de intensidade de energia indicados em BIOGRACE (2008) e apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Fatores de intensidade de energia de insumos agrícolas aplicados no cultivo da cana de açúcar (BIOGRACE, 2008).

Parâmetro	Intensidade de energia	Unidade
Nitrogênio	48,99	MJ kg ⁻¹
Fosfato	15,23	MJ kg ⁻¹
Potássio	9,68	MJ kg ⁻¹
Calcário	1,97	MJ kg ⁻¹
Herbicidas	268,40	MJ kg ⁻¹

As mudas utilizadas no plantio da cana planta foram produzidas pelo próprio produtor. São utilizados em media 12 toneladas de cana por hectare. O transporte da muda da gleba onde foi produzida até o local de plantio, foi realizado por caminhão com capacidade de transporte de 12 toneladas.

O consumo de energia na produção de mudas foi calculado como uma fração do total de energia gasta nas etapas de produção da cana de açúcar, porém, proporcional à quantidade de mudas utilizadas, tal como em Souza (2010) e a equação 2.

$$E1 \left(\frac{\text{MJ}}{\text{ha.ano}} \right) = \frac{12 (\text{tc ha}^{-1})}{6 \text{ anos}} \times \frac{1}{Pc} \left(\frac{\text{ha ano}}{\text{tc}} \right) \times Ea1t1 \left(\frac{\text{MJ}}{\text{ha ano}} \right) \quad (2)$$

em que:

E1 - energia gasta na produção de mudas;

Pc - produtividade média da cana de açúcar; e

Ea1t1 - energia total utilizada no plantio (insumos agrícolas, tratos culturais, colheita e máquinas e implementos agrícolas).

Para os cálculos das energias indiretas devidas à produção dos maquinários e implementos agrícolas utilizados nas operações de campo, adotou-se a metodologia descrita em Bowers (1992), a qual considera os fatores de 86,77 MJ kg⁻¹ como a energia usada na produção das matérias primas adicionadas à requerida no processo de fabricação e 8,8 MJ kg⁻¹ para transporte e distribuição. Em relação à energia necessária para manutenção e reparos, utilizaram-se os fatores de reparo e manutenção para o tipo de maquinários e implementos empregados.

Foi adotada a metodologia utilizada em Santos (2011) para cálculo da energia embutida nos caminhões empregados no transporte de insumos. A massa de cada caminhão utilizado no transporte de insumo, cana de açúcar e mudas foi obtida por meio de pesagem dos mesmos na microdestilaria, sendo obtidas as seguintes taras: 5.770 kg, 7.760 kg e 9.160 kg. Segundo Souza (2010), 18 % da massa total de um caminhão corresponde a pneus e o restante é considerado como aço. Para o caso em questão, utilizou-se como energia incorporada no aço 62,79 MJ kg⁻¹ e a energia de fabricação de 14,62 MJ kg⁻¹. De posse desses valores e da massa de aço, obteve-se a energia incorporada no aço e a energia de fabricação.

A energia gasta com manutenção e reparo do maquinário foi obtida aplicando-se o fator de reparo e manutenção (R&M) sobre o total de energia despendida com fabricação e material de 60,7% e ainda em consideração levou-se, uma parcela de energia referente aos custos energéticos com mão de obra e manutenção pela aplicação do fator 0,202 referente a estes custos, como em Santos (2011).

A energia incorporada ao material adicionada à de fabricação deve ser ajustada para a vida útil do equipamento. Como em Santos (2011) adotou-se o coeficiente de vida útil de 0,82. A energia ajustada foi somada à de reparo e manutenção que, quando dividida pela vida útil e pela produtividade de cana de açúcar por hectare, fornece o custo energético devido ao uso dos caminhões.

Os custos energéticos de mão de obra foram estimados para a fase agrícola e industrial. Na fase agrícola foram contabilizados o trabalho do tratorista e dos trabalhadores braçais (horas homem), e na fase industrial o número de empregados envolvidos na produção da cachaça e do álcool combustível de fazenda. O número de funcionários envolvidos na fase industrial foi de 8 trabalhadores trabalhando 8 horas por dia durante 86 dias por ano. Considerou-se, como fator de energia utilizado nas atividades humanas envolvidas em todo processo, fase agrícola e industrial, $2,28 \text{ MJ h}^{-1}$ por trabalhador (FLUCK, 1992).

Na etapa de colheita e carregamento da cana de açúcar assumiu-se que um homem colhe em média três toneladas de cana crua por dia, em uma jornada de trabalho de 8 horas, segundo informações do produtor. O carregamento da cana para o caminhão foi realizado por uma carregadeira com tempo médio de 20 minutos para carregar um caminhão com capacidade média de 10 toneladas.

O consumo da energia elétrica na fase industrial foi estimado pelo produto da potência nominal de cada equipamento pelo seu tempo de uso, assumindo os motores adequados à carga.

Não foi considerada a energia incorporada nos bens de capital, assim como em Silva (2012), devido à dificuldade para quantificação da massa e do tipo de material dos equipamentos.

A cana de açúcar que chega à microdestilaria para industrialização é içada do caminhão por meio de uma garra presa a uma ponte rolante e conduzida até o jogo de facas onde é picada. A cana picada é conduzida por uma esteira até a moenda onde o caldo de cana extraído passa por uma primeira filtragem. Em seguida, o caldo é direcionado por meio de

canaletas para um tanque inox (decantador) que antes de ser misturado com água para atingir o brix de 14%, passa por uma filtragem. Após este procedimento o caldo é bombeado para as dornas de fermentação nas quais já se encontra o pé de cuba, permanecendo por um período médio de 36 horas. O bagaço que deixou a moenda é conduzido por esteiras para alimentação de duas caldeiras que fornecem vapor para uma máquina motriz a vapor que aciona a moenda e o picador e, para destilação do vinho e envasamento da cachaça. O bagaço excedente é conduzido por esteira para uma área coberta onde é depositado.

Terminado o tempo de fermentação o vinho é conduzido para um depósito em inox do qual é bombeado para os alambiques. Após a destilação a fração coração é bombeada para o setor de armazenagem e envelhecimento. A vinhaça, o restilo e a água de lavagem são bombeados para um tanque e posteriormente, para um tanque de armazenamento. Na Tabela 6, têm-se a descrição das potências nominais dos motores empregados nessas operações e seus respectivos tempos de uso por dia.

Tabela 6- Energia elétrica consumida na fase industrial

Operação	Potência nominal (Kw)	Tempo de uso (horas)
Içamento da cana	3,68	0,6
Movimento para centralizar fecho	0,736	0,36
Movimento do fecho pela ponte	1,472	0,6
Picagem dos colmos (jogo de facas)	36,8	8
Transporte da cana até a moenda	3,68	8
Transporte do bagaço até a esteira	2,208	8
Transporte do bagaço para alimentação da primeira caldeira	2,208	8
Transporte do bagaço para alimentação da segunda caldeira e o excedente para o depósito	2,208	8
Primeira filtragem	2,208	8
Segunda filtragem	0,736	8
Bombeamento de caldo para cocho de fermentação	1,472	8
Bombeamento entre cochos	1,472	8
Bombeamento do vinho fermentado para destilação	2,208	8
Bombeamento da cachaça para tonel	0,368	8
Bombeamento da vinhaça, restilo e água de lavagem para armazenamento	2,208	8
Ventilação da caldeira	7,36	8
Bombeamento de água para caldeira	4,42	3,49

O número de funcionários envolvidos em todo o processamento da cana de açúcar é de 8 trabalhadores, com jornada de trabalho de 8 horas por dia durante 86 dias de produção. A quantidade de bagaço e de caldo gerado na extração foi obtida por meio da pesagem de determinada quantidade de cana de açúcar. Este procedimento foi realizado três vezes para obtenção de um valor médio.

Para o cálculo da quantidade de vapor produzido assumiu-se o valor informado pelo fabricante de cada caldeira como sendo 2.000 kg de vapor por hora para cada caldeira, embora seja de conhecimento que as caldeiras não operaram a todo vapor. A quantidade de bagaço necessária para produção de 4.000 kg de vapor por hora como assumido, foi determinada conforme equação 3:

$$Q_b = \frac{Q_{\text{vapor}} \cdot (h_v - h_a)}{\eta_{\text{caldeira}} \cdot \text{PCI}_{\text{bagaço}}} \quad (3)$$

em que:

Q_b = quantidade de bagaço utilizado nas caldeiras, kg h^{-1} ;

Q_{vapor} = vazão mássica de vapor, kg h^{-1} ;

$h_v = 2.753 \text{ KJ kg}^{-1}$, assumindo vapor saturado com $x=1$ e $P= 552,585 \text{ KPa}$;

$h_a = 188,9 \text{ KJ kg}^{-1}$, assumindo temperatura da água na entrada da caldeira 45°C ;

η_{caldeira} = rendimento da caldeira, 66% (assumido com base no catálogo do fabricante); e

PCI = Poder calorífico inferior do bagaço com 50% b.u., $8.916,18 \text{ KJ kg}^{-1}$ (EPE, 2013).

Para o cálculo do consumo médio de energia no ciclo, considerou-se o número de vezes em que o insumo e/ou equipamento é utilizado neste ciclo, sendo que alguns são aplicados uma vez e outros cinco vezes.

A relação energética *output/input* foi obtida tomando-se a razão entre a energia contida no biocombustível e bagaço excedente (output), pelo total de energia despendida requerida para a produção integrada do álcool combustível de fazenda (input).

Para determinar o índice de renovabilidade do álcool combustível de fazenda aplicou-se o indicador Energy Renewability Efficiency (ErenEf) sugerido por Marçal e Freire (2006), equação 4. Conforme este índice, um biocombustível é considerado renovável ao apresentar indicador de renovabilidade entre 0 e 1. Valores inferiores a 0 indicam que o biocombustível analisado não é renovável, logo, não é recomendado para que substitua um combustível fóssil.

$$ERenEf = \frac{(FEC - E_{in,fossil,prim})}{FEC} \quad (4)$$

em que:

FEC – teor de energia no biocombustível, MJ kg⁻¹;

E_{in,fossil,prim} - total de insumos fósseis acumulados, em termos de energia primária, MJ kg⁻¹.

2.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.4.1 Balanço de energia

2.4.1.1 Fase agrícola

A taxas médias anuais de aplicações de fertilizantes, calcário e herbicida com as respectivas energias fósseis empregadas em sua produção são mostradas na Tabela 7.

Tabela 7- Taxa de consumo de energia fóssil empregada na produção de fertilizantes, calcário e herbicida na produção da cana de açúcar

Insumo	Quant. kg (ha ano) ⁻¹	Fator de energia ^[1] MJ kg ⁻¹	Energia MJ (ha ano) ⁻¹	Energia MJ TC ⁻¹	%
Nitrogênio	83,33	48,99	4.082,34	55,47	64,4
Fosforo	25	15,23	380,75	5,17	6,0
Potássio	98,33	9,68	951,83	12,93	15,0
Calcário	333,33	1,97	656,67	8,92	10,4
Herbicida	0,98	268,40	263,03	3,57	4,2
Total	-	-	6.334,62	86,1	100

^[1] BIOGRACE (2008)

A adubação nitrogenada foi responsável por mais de 50% da energia total indireta devido ao uso de fertilizantes sintéticos. Tal fato mostra a importância da substituição de fertilizantes nitrogenados sintéticos por outros menos intensivos em energia, como por exemplo a adubação orgânica.

Na Tabela 8 são apresentadas as quantidades de energia incorporadas nos equipamentos agrícolas utilizados no cultivo da cana de açúcar.

Tabela 8 – Inventário da demanda energética pelos equipamentos agrícolas utilizados no cultivo da cana de açúcar

Máquinas e implementos	Massa total (kg) ^[1]	Energia de fabricação (MJ)	Transporte (MJ)	Energia reparo+ manutenção (MJ)	Vida útil horas	Energia ajustada com a vida útil, MJ h ⁻¹	Horas por ha (h ha ⁻¹)	Energia (MJ ha ⁻¹)
Trator 105 cv	5.936	515.066	52.237	252.382	12.000	68,31	9,5	648,95
Arado 3 discos	470	40.782	4.136	39.558	1.400	60,34	2,16	130,33
Grade Aradora 18 discos	4.385	380.486	38.588	232.096	1.400	465,12	3,67	1.707
Espalhadeira com capacidade de 500 kg	295	25.597	2.596	14.078	1.400	30,19	0,50	15,09
Sulcador de 2 Linhas	295	25.597	2.596	14.078	1.400	30,19	3,17	95,70
Carregadeira	2.800	242.956	24.640	133.626	1.400	286,59	2,45	702,14
Trator 88 cv	4.675	405.649	41.140	198.768	12.000	53,79	2,45	131,79
Total								3.431

^[1] Obtido de catálogos de fabricantes para os modelos utilizados.

O valor obtido de 3.431 MJ ha⁻¹ apresentou-se elevado devido à área trabalhada ser pequena quando comparada a grandes usinas. O custo energético com máquinas e implementos agrícolas encontrado por Souza (2010) foi de 1.110 MJ ha⁻¹, porém, estes resultados são de difíceis comparações devido a diferentes metodologias aplicadas, assim como vidas úteis consideradas, fatores de intensidade de energia adotados e tamanho da área.

Na Tabela 9, são apresentados os custos energéticos dos caminhões empregados no transporte interno de insumos, mudas e transporte da cana de açúcar da lavoura à microdestilaria.

Tabela 9- Custo energético médio com caminhões

Caminhões	
Peso aço caminhões (kg)*	18.605
Energia do material (MJ ha ⁻¹)	23.364
Energia de fabricação (MJ ha ⁻¹)	5.440
Energia para reparo e manutenção (R&M)	3.532
Energia material + fabricação corrigido pela vida útil (MJ ha ⁻¹)	23.619
Energia total (MJ ha ⁻¹)	26.851
Vida útil (anos)	10
Custo energético (MJ TC ⁻¹)	36,48

* valor obtido a partir das taras dos 3 caminhões empregados.

Os custos energéticos para caminhões sem considerar a energia incorporada ao pneu, para uma densidade de utilização de 372,1 kg ha⁻¹ (três caminhões) foi de 36,48 MJ TC⁻¹.

Sabendo-se que a produtividade da cana de foi de 73,6 toneladas por hectare (Tabela 1), tem-se que o valor do custo energético para maquinários e implementos 46,61 MJ TC⁻¹. O valor requerido pelos caminhões utilizados no transporte de insumos, cana de açúcar e mudas foi de 36,48 MJ TC⁻¹. Sendo assim o valor energético contabilizando os maquinários e equipamentos agrícolas foi de 83 MJ TC⁻¹, ou seja, valor inferior ao encontrado por Santos (2011), que foi de 100,38 MJ TC⁻¹. Estes valores são de difícil comparação, devido a diferentes metodologias aplicadas para a realização dos cálculos como a vida útil adotada, assim como o fator de energia e área plantada com cana de açúcar.

O consumo de combustível no transporte de insumos e da cana de açúcar da lavoura à microdestilaria é mostrado na Tabela 10.

Tabela 10- Consumo de combustível

Operação	Consumo de Óleo Diesel	
	(Litros ha ⁻¹)	(Kg ha ⁻¹) ^[4]
Transporte interno do calcário	1,77 ^[1]	1,49
Transporte interno do adubo para cana soca	0,44 ^[1]	0,37
Transporte interno adubo para cana planta	0,53 ^[1]	0,45
Transporte cana pela carregadeira	24,53 ^[2]	20,60
Transporte de mudas	5,00 ^[3]	4,2
Transporte da cana cortada à Microdestilaria	65,06 ^[1]	54,65
Total	97,33	81,76

^[1] valores obtidos pela equação 1, utilizando dados da Tabela 4 e considerando distância média de 13 quilômetros da lavoura a microdestilaria. ^[2] Tabela 3. ^[3] Produtor. ^[4] Para converter litros/hectare para kg hectare⁻¹ multiplica pela massa especificado óleo Diesel de 0,84kg L⁻¹(Balanço energético nacional, 2014).

Embora atualmente no Brasil sejam adicionados 7% de biodiesel no diesel mineral, considerou-se o percentual de 5%, como em anos anteriores, por ser ainda recente. Para esse percentual para cada tonelada de diesel tem-se 11% de metanol. Os valores do consumo de energia relacionados ao uso de combustíveis fósseis nas operações agrícolas, assim como no transporte da cana à usina de produção são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11- Consumo médio anual de energia relacionado ao uso de combustível fóssil nas operações agrícolas da cultura da cana de açúcar e no transporte de cana e de insumos.

Categorias	Quantidade (L ha ⁻¹ ano ⁻¹) ^[1]	Fator de energia Diesel (MJ.L ⁻¹)	Porcentagem de metanol no Diesel	Fator de energia fabricação do metanol (MJ L ⁻¹) ^[2]	Energia total (MJ ha ⁻¹ ano ⁻¹)
Operações Agrícolas	20,63	47,78	11	26,1864	939,39
Carregadeira	20,44	47,78	11	26,1864	930,74
Transporte da cana cortada à microdestilaria	54,22	47,78	11	26,1864	2.468,91
Transporte do adubo para cana planta	0,08	47,78	11	26,1864	3,64
Transporte do adubo para cana soca	0,37	47,78	11	26,1864	16,85
Transporte do calcário e mudas	1,13	47,78	11	26,1864	51,45

^[1] Média no ciclo de 6 anos.

^[2] BIOGRACE (2008).

Diante do valor obtido em relação ao consumo médio de combustível pelo meio de transporte empregado pelo produtor para o transporte da cana de açúcar de 54,22 L (ha ano)⁻¹, valor abaixo do encontrado por Maroun (2013), que foi de 218,25 L (ha ano)⁻¹. Isto se deve ao fato de em Maroun (2013) utilizar-se como meio de transporte trator acoplado a caçambas com capacidade para apenas 2 a 2,5 toneladas de cana, em vez de caminhão como no presente estudo.

Na Tabela 12 é apresentado o total de energia em todas as operações de campo, incluindo transporte e mão de obra.

Tabela 12 – Consumo de energia por categoria na fase agrícola da produção de cana de açúcar

Categoria	Consumo de energia, MJ (ha ano) ⁻¹	Consumo de energia, MJ (TC ano) ⁻¹	% Consumo de energia
Fertilizantes	5.414,92	73,57	30,01
Calcário	656,67	8,92	3,64
Herbicida	263,03	3,57	1,46
Máquinas e implementos agrícolas	3.431	46,62	19,02
Caminhões	2.685,1	36,48	14,88
Combustível nas operações agrícolas	929,39	12,63	5,15
Transporte de cana	2.468,91	33,54	13,68
Transporte interno de insumos	277,31	3,77	1,54
Transporte pela Carregadeira	930,74	12,65	5,16
Mão de obra ^[1]	508,82	6,91	2,82
Mudas	477,33	6,48	2,64
Total	18.043,22	245,14	100%

^[1] Inclui mão de obra da colheita manual.

Na fase agrícola o consumo de energia foi de 245,14 MJ TC⁻¹, sendo um valor próximo ao encontrado em Seabra (2008) para grandes usinas, que foi de 210,6 MJ TC⁻¹, e abaixo ao encontrado por Souza (2010), que obteve o valor de 335,43 MJ TC⁻¹. Os maiores consumos de energia foram devido ao uso de fertilizantes nitrogenados e ao uso de combustível no transporte decana até a lavoura.

2.4.1.2 Fase industrial

A energia elétrica consumida na fase industrial é apresentada na tabela 13, sendo calculada por meio da potência nominal e do tempo de uso de cada equipamento utilizado no processamento da cana de açúcar para produção da cachaça e do biocombustível.

Tabela 13- Consumo de energia elétrica

Operação	Potência nominal (Kw)	Tempo de uso (hora dia ⁻¹)	Dias de produção	Área Total (ha)	Energia consumida por hectare (kWh ha ⁻¹)
Içamento da cana	3,68	0,6	86	50	3,798
Movimento para centralizar fecho	0,736	0,36	86	50	0,456
Movimento do fecho pela ponte	1,472	0,6	86	50	1,519
Picagem dos colmos (jogo de facas)	36,8	8	86	50	506,4
Transporte da cana até a moenda	3,68	8	86	50	50,64
Transporte do bagaço até a esteira	2,208	8	86	50	30,38
Transporte do bagaço para alimentação da primeira caldeira	2,208	8	86	50	30,38
Transporte do bagaço para alimentação da segunda caldeira e o excedente para o depósito	2,208	8	86	50	30,38
Primeira filtragem	2,208	8	86	50	30,38
Segunda filtragem	0,736	8	86	50	10,13
Bombeamento de caldo para cocho de fermentação	1,472	8	86	50	20,25
Bombeamento entre cochos	1,472	8	86	50	20,25
Bombeamento do vinho fermentado para destilação	2,208	8	86	50	30,38
Bombeamento da cachaça para tonel	0,368	8	86	50	5,064
Bombeamento da vinhaça, restilo e água de lavagem para armazenamento	2,208	8	86	50	30,38
Ventilação da caldeira	7,36	8	86	50	101,3
Bombeamento de água para caldeira	4,42	3,49	86	50	26,53
Total	—	—	—	—	928,617

Os valores da Tabela 8 foram estimados, sendo assim, adotou para o balanço energético o consumo obtido nas contas de energia elétrica da microdestilaria para o período de produção. O consumo obtido nas faturas foi de 552,62 kWh ha⁻¹, correspondente a 7,51 kWh TC⁻¹. Como a usina em análise não gera energia elétrica, o valor obtido foi considerado como uma entrada no balanço de energia da cachaça e do álcool combustível de fazenda.

A média de bagaço produzido por tonelada de cana moída foi de 432 Kg e sabendo que na safra 2013/2014 foram moídas 3.680 toneladas de cana, têm-se a produção de 1.589,760

toneladas de bagaço. A energia térmica para destilação do vinho foi gerada exclusivamente pela queima do bagaço resultante da extração do caldo de cana de açúcar, obtendo-se segundo a equação 3 que 1.199,184 toneladas de bagaço são utilizadas nas fornalhas das caldeiras para geração do vapor. Na Tabela 14 esta apresentada a quantidade de biomassa e de energia empregadas.

Tabela 14 – Consumo de energia térmica na produção de álcool combustível de fazenda

Biomassa	Quantidade (Kg ano ⁻¹)	PCI (MJ kg ⁻¹) ^[1]	Energia (MJ ano ⁻¹)	Energia (MJ ha ⁻¹ ano ⁻¹)
Bagaço	1.200.000	8,9	10.680.000	213.600

^[1] EPE (2013).

Na Tabela 15 esta demonstrado o consumo energético na fase industrial relacionado à produção da cachaça e do álcool combustível de fazenda, incluindo mão de obra. Não foi considerada a energia do bagaço devido o mesmo ser um insumo gerado dentro do próprio sistema.

Tabela 15 – Consumo de energia na fase industrial da produção de cachaça e álcool combustível

Itens	Consumo de energia, MJ (ha ano) ⁻¹	Consumo de energia, MJ TC ⁻¹
Mão de obra	250,98	3,41
Energia elétrica	1.989,432	27,03
Total	2.240,412	30,44

Na fase industrial o maior consumo de energia foi despendido pela energia elétrica na produção da cachaça e do álcool combustível. Em estudos correlatos são observados que o maior consumo de energia na fase industrial advém do uso de biomassa, como apresentado em Silva (2012), que utiliza a lenha para produção de energia térmica. Uma alternativa apresentada para redução do consumo de energia é o uso da lenha apenas para início da combustão do bagaço como em Santos (2011).

No presente estudo, o consumo de energia na fase industrial foi de 30,44 MJ TC⁻¹, valor abaixo do encontrado em Santos (2011) que foi de 109,47 MJ TC⁻¹; porém em Santos (2011) a produtividade média da cana e a área colhida foram menores e foi considerada energia embutida em edificações e equipamentos e no estudo corrente não foram considerados a energia de bens de capital, assim como em Silva (2012).

Na Tabela 16 são apresentados os consumos de energia da fase agrícola e da fase industrial da produção da cachaça e do álcool combustível e suas respectivas participações percentuais.

Tabela 16 – Participação das fases agrícola e industrial no consumo total de energia na produção integrada de cachaça e de álcool combustível de fazenda

Categoria	Energia, (MJ ha ⁻¹ ano ⁻¹)	Porcentagem (%)
Fase agrícola	18.043,22	88,95
Fase industrial	2.240,41	11,05
Total	20.283,63	100

Em relação à energia demandada para produção integrada da cachaça e álcool combustível de fazenda, obteve-se que a fase agrícola é a que corresponde à maior demanda por energia, contabilizando 88,95 %.

2.4.2 Alocação

O consumo total de energia é destinado tanto para produção de cachaça assim como para produção de álcool combustível de fazenda. Para realizar a alocação na fase agrícola e industrial, e obter a porcentagem de energia destinada para produção da cachaça e do álcool combustível, consideraram-se as porcentagens das frações cabeça, coração e cauda, em relação ao volume de destilado. Diante dos valores obtidos de 40 litros de cabeça, 320 litros de coração e 40 litros de cauda obtidos a cada 400 litros de destilados, obtém-se a porcentagem de energia destinada à produção de cachaça que corresponde a 80%, e 20 % destinada à produção de álcool combustível de fazenda que é obtido da destilação dos subprodutos cabeça e cauda.

Na Tabela 17 têm-se os valores de energia despendida para a produção da cachaça e de álcool combustível de fazenda.

Tabela 17- Energia despendida para produção da cachaça e do álcool combustível

Consumo de energia	Produto	
	Cachaça	Álcool combustível de fazenda
Fase Agrícola (MJ ha ⁻¹ ano ⁻¹)	14.434,58	3.608,64
Fase Industrial (MJ ha ⁻¹ ano ⁻¹)	1.792,33	448,08
Total (MJ ha ⁻¹ ano ⁻¹)	16.226,91	4.056,72

Diante da energia total despendida para produção integrada de cachaça e álcool combustível de fazenda, conclui-se que a fase industrial para produção de álcool de fazenda, demandou 2,21% e 17,79% na fase agrícola. Na Tabela 18 são apresentados o consumo de energia por categorias da fase agrícola no consumo total de energia na produção da cachaça e do bioetanol.

Tabela 18- Consumo de energia por categorias da fase agrícola no consumo total de energia na produção da cachaça e do bioetanol

Categoria	Cachaça MJ TC ⁻¹	Bioetanol MJ TC ⁻¹
Fertilizantes	58,856	14,714
Máquinas e implementos agrícolas	37,296	9,324
Caminhões	29,184	7,296
Transporte de cana	26,832	6,708
Transporte pela Carregadeira	10,12	2,53
Combustível nas operações agrícolas	10,104	2,526
Calcário	7,136	1,784
Mão de obra	5,528	1,382
Mudas	5,184	1,296
Transporte interno de insumos	3,016	0,754
Herbicida	2,856	0,714
Subtotal	196,112	49,028
Total		245,140

Na Figura 2 é mostrada a participação percentual do consumo de energia na fase agrícola.

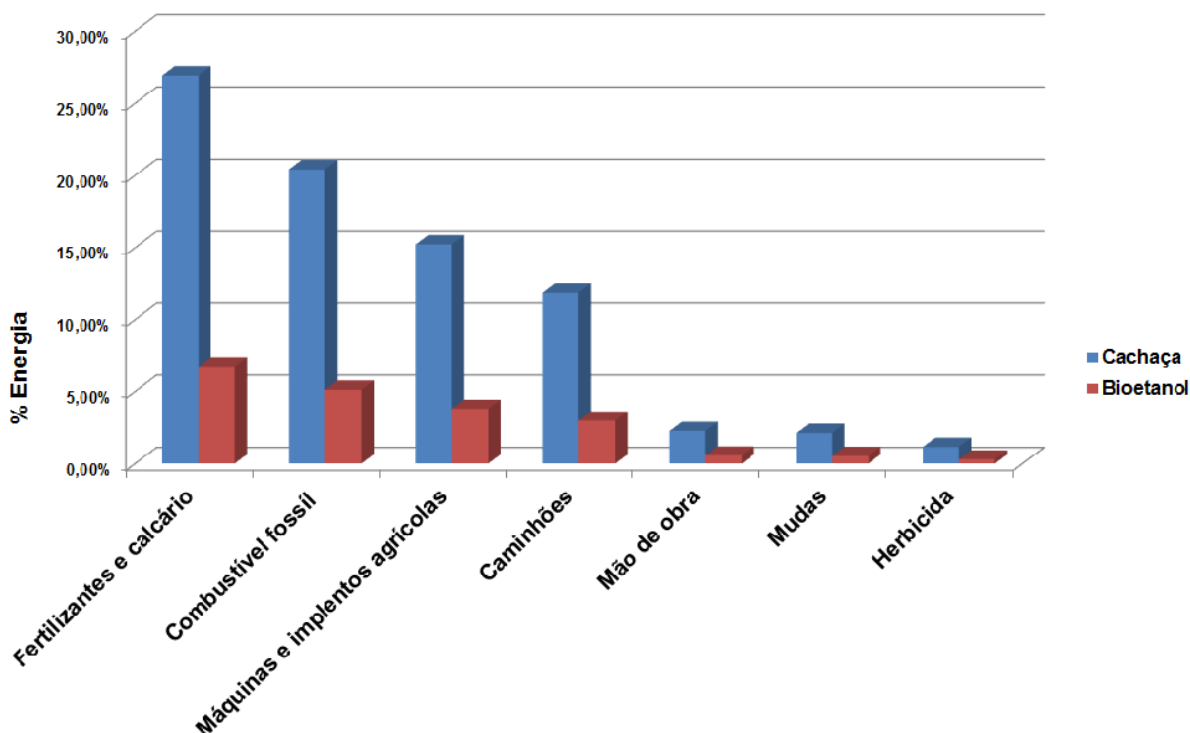


Figura 2 – Participação percentual das categorias da fase agrícola no consumo total de energia na produção de cana de açúcar para produção integrada de cachaça e bioetanol.

O valor encontrado por Santos (2011), para a fase agrícola foi de 277,20 MJ/TC na produção de álcool de fazenda, sendo 35% deste valor devido ao uso de fertilizantes. No estudo corrente, a categoria que mais demandou energia em relação à energia total despendida na produção integrada de cachaça e álcool combustível de fazenda, foi o uso de fertilizantes sintéticos, correspondendo a 24% para produção da cachaça e 6% para produção do bioetanol, seguido pelo uso de combustível fóssil na fase agrícola, incluindo o transporte da cana de açúcar da lavoura a microdestilaria.

2.4.3 Balanço energético da produção do caldo de cana e de bagaço.

Na Tabela 19 têm-se os valores de energia das entradas e saídas no processo de extração do caldo de cana para produção da cachaça e do álcool combustível de fazenda.

Tabela 19- Entradas e saídas na produção de caldo e de bagaço da cana de açúcar

Item	Entrada MJ TC ⁻¹	Saída MJ TC ⁻¹
Fase agrícola	245,14	—
Fase industrial	—	—
Bagaço ^[1]	—	3.845
Caldo ^[2]	—	1.643
Total	245,14	5.488
Balanco		+ 5.242,86

^[1] Produção de bagaço: 432 kg TC⁻¹ (Produtor). ^[2] Produção de caldo: 640 L TC⁻¹ (Produtor), PCI caldo: 2.595,32 kJ kg⁻¹ (EPE, 2014), massa específica caldo de cana 989 kg m⁻³ (Souza, 2012).

O valor positivo apresentado no balanço de extração do caldo de cana é devido ao grande volume de bagaço gerado por tonelada de cana moída. Também foi verificado por Silva (2012) o balanço positivo na extração do caldo de cana de 5.382 MJ TC⁻¹, porém com moenda móvel, acionada por trator.

A energia do excedente de bagaço gerado e seu conteúdo energético são apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 – Quantidade de bagaço excedente e sua energia contida

Categoria	Quantidade anual, kg	Pode calorífico inferior, MJ kg ⁻¹	Energia total MJ	Energia por tonelada de cana, MJ TC ⁻¹
Bagaço excedente	389.760	8,9 ^[1]	3.468.864	942,626

^[1] EPE (2014)

Na tabela 21 tem-se a relação de entradas e saídas de energia do sistema integrado de produção do álcool combustível de fazenda. Diante desses valores foi obtida a relação entre a energia contida no biocombustível e subprodutos gerados na produção, pela energia contida nas entradas do sistema.

Tabela 21 – Entradas e saídas de energia no sistema de produção de álcool combustível de fazenda e a relação saída/entrada

Categoria	Entrada, MJ TC ⁻¹	Saída MJ TC ⁻¹
Fase agrícola	245,14	-
Fase industrial	30,44	-
Álcool de fazenda	-	328,32 ^[1]
Bagaço excedente	-	942,63
Total	275,58	1.270,95

Relação *output/input*

4,61

[1] PCI 26,37 MJ kg⁻¹ do etanol e massa específica do etanol 0,809 kg L⁻¹; Santos (2011)
 TC – tonelada de cana.

A relação de *output/input* obtida demonstra que para cada unidade de energia que entrou no sistema são geradas 4,61 unidades de energia pelo sistema, energia essa contida no bagaço excedente e no biocombustível. Este bagaço excedente é empregado na usina para esterilização das garrafas para envasamento do produto. O ganho energético obtido em Santos (2011) foi de 4,01, ou seja, a análise *output/input* estimada foi de 5,01:1. Em grandes usinas, devido ao aproveitamento do bagaço para geração de energia elétrica, a relação de *output/input* fica em torno de 9 (Boddy et al, 2008).

Considerando que toda entrada de energia no sistema seja de origem fóssil e desconsiderando a energia elétrica consumida na produção da cachaça e do álcool combustível de fazenda, devido o fornecimento energético no Brasil ser proveniente em torno de 70% por hidrelétricas (EPE, 2014), o indicador de energia renovável obtido foi 0,27, indicando que o álcool combustível de fazenda obtido em sistema integrado de produção de cachaça é um biocombustível renovável.

2.5 CONCLUSÕES

Os custos energéticos para produção da cana de açúcar foram de 245,14 MJ TC⁻¹, considerando o transporte da cana de açúcar da lavoura à microdestilaria, e o transporte interno de insumos e mudas.

Em relação à fase industrial, o custo energético foi de 30,44 MJ TC⁻¹, obtendo um balanço positivo de energia em relação ao álcool combustível produzido e ao bagaço excedente.

Concluiu-se que o álcool combustível de fazenda é um combustível renovável, visto que o fator de renovabilidade foi de 0,27, ficando entre 0 e 1.

2.6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BIOGRACE (2008) - **Biofuel Greenhouse Gas Emissions in Europe**. Disponível em: <http://www.biograce.net/>. Acesso em 2015.

BONATO FILHO, G.G. **Produção de álcool combustível a partir de subprodutos da fabricação de cachaça para associação de produtores**. Viçosa, MG: UFV, 2013. 98 p. Dissertação (Mestrado Engenharia Agrícola)- Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa.

BODDY, R. M., SOARES, L. H. B., ALVES, B. J. R., URQUIAGA, S. **Bio-Ethanol Produccion in Brazil**. In: PIMENTEL, D (Ed.). *Biofuels, solar and wind as renewable energy systems*. New York, 2008. P321-356 (Chapter 13).

BOWERS, W. (1992). **Energy of human labor**. In. B. A. Stout (Ed.), *Energy in world agriculture*, (pp. 117-219). Agricultural Engineering Department, College Station, TX. USA.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Cana-de-Açúcar**. Quarto Levantamento, Brasília, p. 1-14, abr. 2014.

EPE - Empresa Brasileira de Energia. **Balanco Energético Nacional 2014: ano base 2013**. Rio de Janeiro: MME/EPE 2014.

FLUCK, R. C. (1992). **Chapter 3: Energy of human labor**. In *Energy in world agriculture*, 31-36. B. A. Stout, Agricultural Engineering Department, College Station, TX. USA.

MALÇAL, J., FREIRE, F. Renewability and life-cycle energy efficiency of bioethanol and bio-ethyl tertiary butyl ether (bioETBE): Assessing the implications of allocation. **Energy** 31 (2006) 3362 - 3380. DOI 10.1016/j.energy.2006.03.013.

MARCHESAN TATU. Manual de Instruções. Matão, 2013.

MAROUN, M. R. **A produção integrada de etanol e alimentos por camponeses como uma oportunidade para o desenvolvimento rural sustentável do Rio Grande do Sul**. Rio de Janeiro: UFRRJ/COPPE: 2013. 227p. Tese de doutorado.

NEVES, A. A., Estudo econômico e agrícola dos plantio manual e motomecanizado da cana de açúcar. **Anais da E.S.A."Luiz de Queiroz"**.vol. XXX:, p. 105- 127, 1973

NOGUEIRA, R. M. **Análise da Produção Sustentável de Álcool Combustível, Aguardente e Leite, a partir da Cana-de-Açúcar**. Viçosa. 84 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, 2008.

PORTAL SÃO FRANCISCO. **História da Cachaça**. Disponível em: <http://www.portalsaofrancisco.com.br/alfa/historia-da-cachaca/historia-da-cachaca.php>. Acesso 16 em junho de 2015.

SANTA IZABEL. **Manual técnico: Árado reversível Santa Izabel- ARSI**. São João da Boa Vista, 2015.

SANTA IZABEL. **Manual técnico: Distribuidora de calcário Santa Izabel**. São João da Boa Vista, 2015.

SANTA IZABEL. **Manual técnico: Sulcador Santa Izabel**. São João da Boa Vista, 2015.

SANTAL. **Manual Técnico: Linha Santal CMP - Carregadora de Açucar-de-açucar**. Ribeirão Preto, 2015.

SANTOS, R. E. R. dos. (2011). **Análise da viabilidade energética e econômica da produção de etanol em microdestilarias**. MS Thesis. Itajubá: Universidade Federal de Itajubá.

SEABRA, J. E. A. **Avaliação técnico econômica de opções para o aproveitamento integral da biomassa de cana no Brasil**. Campinas, SP. 2008, 274p. (Tese Doutorado).

SILVA, J.S. **Produção de álcool combustível na fazenda e em sistema cooperativo**. Juarez de Sousa e Silva, editor- Viçosa-MG, v. 1,168p, 2007.

SILVA, O. C. (2012). **Uma avaliação da produção de bioetanol no contexto da agricultura familiar a partir da experiência da Cooperbio**. D.Sc. Thesis. USP: São Paulo

SOUZA, S. P. de (2010). **Produção integrada de biocombustíveis: uma proposta para reduzir o uso de combustível fóssil no ciclo de vida do etanol de cana de açúcar**. MS Tese. São Carlos: Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos.

TRIANA, C.A.R., 2011. “Energetics of Brazilian ethanol: Comparison between assessment approaches”. **Energy Policy**; 39: 4605–13.

VALTRA. **Manual Técnico: Linha Média BM100**. Mogi das cruces, 2015.

VALTRA. **Manual técnico: Linha leve A850**. Mogi das cruces, 2015.

3. BALANÇO DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA NA PRODUÇÃO INTEGRADA DE CACHAÇA DE QUALIDADE E BIOCOMBUSTÍVEL

Resumo

Este estudo apresenta um balanço de emissões de gases de efeito estufa provenientes das etapas agrícolas e do processamento da cana de açúcar para produção integrada de cachaça de qualidade e de álcool combustível produzido em fazenda. O inventário foi obtido por meio de dados de literatura, catálogos de fabricantes de equipamentos e consulta a produtores de cana de açúcar, porém, a maior parte das informações foram obtidas do caderno de anotações do controle de operações e contabilidade da unidade de produção, mais a consulta ao proprietário e ao gerente de produção de uma unidade produtora integrada de cachaça e álcool combustível de fazenda, localizada na Zona da Mata Mineira. No computo dos gases de efeito estufa foram considerados as emissões diretas e indiretas provenientes das atividades agrícolas e industriais, devidas o uso de fertilizantes, pesticidas, calcário, combustível, maquinário agrícola, assim como de resíduos deixados no campo, uso de energia elétrica e queima de bagaço na fase industrial. As emissões da fase agrícola e industrial da produção integrada de cachaça e álcool combustível de fazenda foram respectivamente 1.798,46 Kg CO₂ eq./ha ano e 457,25 Kg CO₂ eq./ha ano. A emissão na fase agrícola foi a que mais contribuiu para emissões totais com 79,73% do total. A categoria mais impactante foi o uso de fertilizantes nitrogenados. As emissões diretas de N₂O, devido aplicação de fertilizantes nitrogenados e ao N contido nos resíduos da colheita, foi a categoria mais impactante na fase agrícola em relação às emissões totais da produção integrada da cachaça e álcool combustível de fazenda seguida pelas emissões na produção de fertilizantes.

Palavras-chave: agroenergia, cana de açúcar, bioetanol.

Abstract

This study presents a greenhouse gas emissions balance of the agricultural steps and the processing of the sugar cane for the farm integrated production of quality cachaça and fuel ethanol. The inventory was obtained through data in the literature, equipment manufacturers catalogs and interviews with sugar cane producers. However, most of the information was obtained from the control of operations notebook and the accounting data of a production unit, plus interviews with the owner and the production manager of a farm integrated production unit of cachaça and ethanol, located in the Zona da Mata Mineira (Minas Gerais, Brazil). For the computation of greenhouse gases emissions were considered the direct and indirect emissions from the agricultural and industrial activities, due to the use of fertilizers, pesticides, limestone, fuel, agricultural machinery, waste left in the field, and use of electricity and bagasse in the industrial phase. The emissions of the agricultural and industrial phases of the integrated production of cachaça and fuel ethanol were respectively 1.798,46 kg CO₂ eq./ha year and 457,25 kg CO₂ eq / ha year. The emissions in the agricultural phase were the ones that most affected the total emissions, accounting for 79,73%, in which the most impacting category was the use of nitrogen fertilizers. So, direct N₂O emissions due application of nitrogen fertilizer and the N contained in crop residues, was the most impressive category in the agricultural phase regarding cash-outs total emissions of integrated production of cachaça and alcohol farm fuel, followed by emissions in fertilizer production.

Keywords: bioenergy, sugarcane, cachaça, fuel ethanol, bioethanol.

3.1 INTRODUÇÃO

A cachaça ou aguardente é uma bebida tipicamente brasileira. Uma das características da cachaça de qualidade é ser derivada apenas de umas das frações da destilação do mosto fermentado (vinho). Na destilação do vinho são geradas três frações com diferentes teores alcoólicos, a primeira é denominada de cabeça, a segunda coração e a terceira cauda. Os subprodutos, cabeça e cauda, correspondem respectivamente a cerca de 15% do início e 10% do final do volume destilado (SILVA, 2007). Estes subprodutos ao serem destilados em uma coluna de retificação geram o álcool de fazenda.

As etapas agrícolas e de processamento da cana de açúcar para a produção da cachaça e do bioetanol, geram emissões de gases de efeitos prejudiciais ao meio ambiente. O balanço de emissões permite conhecer qual elo da cadeia de produção é o mais impactante, possibilitando tomada de decisão para o uso racional de insumos, ou mesmo a substituição de insumos por outros menos impactantes, e melhorias no processo de produção.

Os trabalhos desenvolvidos nacionalmente estão focados principalmente em cenário de destilarias do Estado de São Paulo. Porém, são desenvolvidos distintos cenários para produção de bioetanol em todo território nacional, diferenciando principalmente nas operações da etapa agrícola para produção da cana de açúcar (CLAROS GARCIA, 2011).

Os estudos referentes à produção de álcool combustível em pequena escala remetem aos trabalhos realizados por Santos (2011), Silva (2012), Maroun (2013), Nogueira (2008) e Bonato Filho (2013). Maroun (2013) comparou em seu estudo, as emissões de gases do efeito estufa da produção de etanol e alimentos em pequena escala com a produção de etanol em grandes usinas, encontrando o valor de 1/5 quando comparado à produção em grande escala.

Diante dos poucos estudos relacionados ao balanço de emissões da produção integrada de cachaça e de biocombustível em pequena escala, realizou-se este estudo com o objetivo de contribuir com informações sobre emissões de gases de efeito estufa gerados nesta atividade.

3.2 OBJETIVO

3.2.1 Geral

Objetivou-se com o presente estudo realizar o inventário de carbono (emissões de gases de efeito estufa) na produção integrada de cachaça de qualidade e álcool combustível de fazenda.

3.2.2 Específico

- i. Determinar as emissões de gases de efeito estufa (GEE) da produção de cana de açúcar (fase agrícola) em nível de fazenda;
- ii. Determinar as emissões de gases de efeito estufa na fase industrial da produção integrada de cachaça e álcool combustível;

3.3 MATERIAL E MÉTODOS

O levantamento de inventário, que consiste na determinação e quantificação dos insumos aplicados na cultura da cana de açúcar, equipamentos utilizados nas fases agrícola e industrial da produção integrada de cachaça e álcool combustível de fazenda, foi realizado em uma propriedade produtora de cachaça que utiliza os resíduos cabeça e cauda para produção de bioetanol para autoconsumo. A propriedade, localizada na Zona da Mata Mineira, situa-se a 219 km de Belo Horizonte e 52 km de Viçosa.

Os dados exigidos para o presente estudo foram obtidos de literatura, catálogos de fabricantes de equipamentos e consulta a produtores de cana de açúcar; porém, a maior parte das informações foram obtidas do caderno de anotações do controle de operações e contabilidade da unidade de produção, de consultas ao proprietário e ao gerente de produção da unidade produtora integrada de cachaça e álcool combustível de fazenda, doravante denominada de microdestilaria.

A delimitação do estudo para determinação do balanço de emissões abrange as fases agrícolas e industrial do processamento da cana de açúcar, compreendendo, portanto, as etapas que vão desde o plantio à produção da cachaça e do biocombustível.

Os gases que foram avaliados no presente estudo foram o CO₂, CH₄ e N₂O, pois eles são considerados, segundo IPCC (2006a), os mais importantes em sistemas ligados à agricultura. Claros Garcia (2011) alega que grande parte de estudos relacionados à produção de

biocombustíveis consideram apenas os gases citados. As emissões totais de gases foram expressas em CO₂ equivalente (kg CO₂eq.).

3.3.1 Inventário de materiais – Fase Agrícola

A produção de cachaça e álcool combustível de fazenda, na unidade em estudo, é realizada de forma integrada, ou seja, o biocombustível é produzido utilizando como matéria prima os subprodutos da produção da cachaça, cabeça e cauda. Durante a safra de 2013/ 2014, por meio de consulta as anotações do produtor, verificou-se que a unidade produziu 453.360 litros de cachaça no período de 86 dias, com jornada média diária de 8 horas de trabalho.

Segundo dados do produtor, de cada 400 litros de destilados foram obtidos 40 litros de cabeça e 40 litros de cauda, e ao destilar esses 80 litros de subprodutos, cabeça e cauda, foram obtidos 40 litros de álcool combustível de fazenda. Sabendo que a unidade de produção é do tipo batelada e que durante a safra de 2013/2014 foram obtidos 453.360 litros de cachaça, e que a cada 320 litros de cachaça são produzidos 40 litros de álcool; e assim, têm-se que foram produzidos 56.670 litros de álcool de fazenda durante 86 dias de trabalho.

Os dados referentes à produção de cachaça e álcool combustível de fazenda durante a safra de 2013/2014 estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1- Dados de produção de cachaça e de álcool combustível de fazenda da microdestilaria para a safra 2013/2014

Parâmetros	Unidade	Quantidade
Produção de cachaça	L dia ⁻¹	5.271,63
Produção de álcool de fazenda	L dia ⁻¹	658,95
Produtividade media do canavial	t ha ⁻¹	73,60
Área de produção (não contínua)	ha ano ⁻¹	50
Rendimento de cachaça	L (ton.cana) ⁻¹	123,19
Rendimento de álcool de fazenda de cabeça e cauda	L (ton.cana) ⁻¹	15,39
Período de processamento industrial	dias	86
Tempo médio de destilação	horas dia ⁻¹	8
Produção anual de cachaça	L ano ⁻¹	453.360
Produção anual de álcool de fazenda	L ano ⁻¹	56.670

A produtividade média de cana de açúcar obtida pelo produtor na safra de 2013/2014 foi de 73,6 toneladas de cana por hectare, média próxima à nacional de 75 toneladas por hectare (CONAB, 2014).

Toda cana de açúcar utilizada na produção de cachaça e de bioetanol é produzida pelo próprio produtor, o qual utiliza equipamentos próprios em mais de uma operação, por se tratar de produção de pequena escala. Muitas operações são realizadas manualmente, como a aplicação de adubo que é realizada a lanço, e para estas operações manuais foi considerada a jornada de oito horas de trabalho por dia. As operações realizadas no plantio da cana, o tipo de trator, implementos e caminhões empregados no transporte dos insumos são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2- Operações agrícolas e maquinários utilizados na produção de cana de açúcar

Operação agrícola	Tipo de implemento, trator e caminhão
Cana planta	
Erradicação Mecânica da soqueira (aração)	Trator 105 CV, Arado 3 discos
Gradagem (2x)	Trator 105 CV, Grade Aradora 18 discos
Transporte interno de insumos	Caminhão com capacidade de 12 toneladas
Aplicação de corretivo do solo	Trator 105 CV, Espalhadeira com capacidade de 500 kg
Sulcação	Trator 105 CV, Sulcador de 2 linhas
Aplicação de adubo*	-
Corte de muda*	-
Transporte de mudas	Caminhão com capacidade de 12 toneladas
Descarregamento, distribuição e picação*	-
Cobrição*	-
Colheita sem queimada*	-
Carregamento da cana por carregadeira	Trator 88 CV, carregadeira
Cana soca	
Capina química*	-
Transporte de adubo	Caminhão com capacidade de 10 toneladas
Aplicação de adubo*	-

* Operação manual.

As operações agrícolas realizadas no preparo do solo e posteriormente plantio da cana de açúcar, assim como o tempo gasto em cada operação e seu respectivo consumo de combustível, foram fornecidas pelo produtor e são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Coeficientes técnicos de produção de cana de açúcar para produção integrada de cachaça e bioetanol.

Operação agrícola	Trator Potência CV	Mão de obra		Consumo de Diesel	
		Homem horas hectare ⁻¹	Tratorista horas hectare ⁻¹	Litros h ⁻¹	Litros ha ⁻¹
Cana Planta					
Aração ^[1]	105	—	2,16	13,07	28,23
Gradagem (2x) ^[1]	105	—	3,67	13,00	47,71
Aplicação de corretivo do solo ^[1]	105	0,50	0,50	13,32	6,66
Sulcação ^[1]	105	—	3,17	12,98	41,15
Aplicação de adubo, corte e carregamento de mudas, descarregamento, distribuição, picação e cobrição ^[1]	—	320,00	—	—	—
Colheita manual ^[1]	—	196,26	—	—	—
Subtotal	—	516,76	9,5	52,37	123,75
Cana Soca					
Capina química ^[2]	—	5,16	—	—	—
Aplicação de adubo ^[3]	—	2,28	—	—	—
Subtotal	—	7,44	—	—	—
Carregamento de cana cortada para caminhão (Carregadeira) ^[1]	88	—	2,45	10,00	24,53
Total	—	524,20	11,95	62,37	148,28

^[1] Dados obtidos na Microdestilaria. ^[2] Obtido de produtor de cana de açúcar da Zona da Mata Mineira. ^[3] Neves (1973).

Foi adotado, segundo Souza (2010), o valor de consumo médio de combustível de 10 L hora⁻¹ pela carregadeira Santal, e o tempo médio de 20 minutos para o carregamento de um caminhão com capacidade média de 10 toneladas foram fornecidos pelo produtor. Na colheita manual considerou-se que um homem colhe 3 toneladas (ha dia)⁻¹.

Atualmente o produtor aplica o agrosilício como corretivo para o solo, mas em anos anteriores era aplicado o calcário. A dosagem de calcário aplicada correspondia a 2.000 kg ha⁻¹, porém a de agrosilício é de 1500 kg ha⁻¹ na cana planta. Com a ausência de informações relacionadas às emissões na produção de agrosilício, no presente estudo foi adotado o uso de

calcário, como em anos anteriores, devido o mesmo apresentar níveis de emissões já estabelecidos.

No ano de 2014 a quantidade de cana de açúcar colhida foi de 3.680 toneladas, as quais foram cultivadas em glebas com área média de 5 hectares. O transporte da cana foi realizado por três caminhões com capacidade média de 10 toneladas, percorrendo distância média de 13 quilômetros da lavoura à microdestilaria. A distância total percorrida pelos caminhões foi obtida pela soma do número de viagens das glebas até a usina, obtendo uma distância total de 9.970 km, considerando ida e volta. A usina possui dez glebas com distância média de 13 km. O consumo total de combustível foi obtido considerando, segundo Souza (2010), o consumo médio de 3,5 km L⁻¹ de óleo Diesel para o caminhão vazio e de 2,5 km L⁻¹ para o caminhão carregado.

O consumo de combustível no transporte dos insumos aplicados na lavoura pelo produtor foi calculado levando em conta as distâncias entre a microdestilaria até as glebas onde foram aplicados. Foram considerados os mesmos valores adotados anteriormente, porém, foi assumido o valor médio de 0,34 L km⁻¹ para o trajeto de ida e volta entre a micro destilária e a lavoura. Foram computados no transporte interno de insumos o corretivo do solo, adubos para cana planta e cana soca e o transporte de mudas.

O consumo de combustível para o transporte de cana de açúcar e insumos foi obtido com base na equação 1.

$$C. C. \left(\frac{\text{Litros}}{\text{hectare}} \right) = \frac{Q.t.(kg \text{ ha}^{-1})}{\text{Cap.c.}(kg)} \times \text{Dis. perc. (km)} \times C. m. \text{ comb. (L km}^{-1}) \quad (1)$$

em que:

C. C. - consumo de óleo diesel;

Q. t. - quantidade de insumo transportada;

Cap. c. - capacidade média do caminhão que realiza o transporte do insumo;

Dis. perc. - distância total de ida e volta percorrida da microdestilaria até a lavoura; e

C. m. comb. - consumo médio de óleo diesel por quilômetro percorrido.

Os tratos culturais realizados na cana soca consiste na capina química realizada por trabalhadores com pulverizadores costais, no qual aplica-se Velpar K. Tanto a aplicação de herbicidas, quanto a de adubos são operações realizadas manualmente.

As quantidades de fertilizantes, calcário, herbicida e óleo Diesel utilizados no processo de cultivo da cana de açúcar são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Quantidades de insumos aplicados na cultura da cana de açúcar

Entrada	Consumo de fertilizantes, kg ha ⁻¹		Consumo Total, (kg ha ⁻¹) ^[1]	Consumo médio, ^[2] kg (ha ano) ⁻¹
	Cana Planta	Cana soca		
	600 kg	500 kg		
	00-25-15	20-00-20		
Nitrogênio N	-	100	500	83,33
Fosforo P ₂ O ₅	150	-	150	25,00
Potássio K ₂ O	90	100	590	98,33
		Calcário		
Calcário	2.000	-	2.000	333,33
		Herbicida		
Herbicida	-	1,17	5,85	0,98
		Óleo Diesel		
Óleo Diesel ^[3]	104,00	-	104,00	17,33

^[1] Refere-se à soma das quantidades aplicada na cana planta mais cinco vezes a quantidade aplicada na cana soca (500 = 0 + 5 x 100). ^[2] Média anual durante o ciclo de seis anos. ^[3] Obtido da Tabela 3 aqui expresso em kg (ha ano)⁻¹, não inclui o transporte de cana. Para converter litros hectare⁻¹ para kg hectare⁻¹ multiplica-se pela massa específica do óleo Diesel de 0,84 kg L⁻¹ (EPE, 2014).

A energia térmica empregada no processamento da cana de açúcar, destilação do vinho e produção do álcool de fazenda, é suprida pela queima de parte do bagaço gerado na extração do caldo da cana de açúcar. As quantidades de bagaço e caldo foram obtidas por meio de pesagem de determinada quantidade de cana de açúcar, sendo este procedimento realizado três vezes para obtenção do valor médio. Para quantificar a quantidade de bagaço consumido, assumiu-se o valor informado pelo fabricante de cada caldeira (em número de duas) como sendo 2.000 kg de vapor por hora, embora normalmente as caldeiras não operarem a todo vapor.

A quantidade de bagaço necessária para produção de 4.000 kg de vapor por h, foi determinado conforme equação 2:

$$Q_b = \frac{Q_{\text{vapor}} \cdot (h_v - h_a)}{\eta_{\text{caldeira}} \cdot \text{PCI}_{\text{bagaço}}} \quad (2)$$

em que:

\dot{Q}_b = quantidade de bagaço utilizado nas caldeiras, kg h^{-1} ;

Q_{vapor} = vazão mássica de vapor, kg h^{-1} ;

$h_v = 2.753 \text{ KJ kg}^{-1}$, assumindo vapor saturado com $x=1$ e $P= 552,585 \text{ KPa}$;

$h_a = 188,9 \text{ KJ kg}^{-1}$, assumindo temperatura da água na entrada da caldeira 45°C ;

η_{caldeira} = rendimento da caldeira, 66% (assumido com base no catálogo do fabricante); e

PCI = Poder calorífico inferior do bagaço com 50% b.u., $8.916,18 \text{ KJ kg}^{-1}$ (EPE, 2013)

3.3.2 Inventário de emissões

A metodologia adotada para determinação das emissões de gases de efeito estufa foi obtida de IPCC (2006a e 2006b) e IPCC (2007) para GWP-100 (*Global Warming Potential*) e BIOGRACE (2008), dentre outras literaturas citadas nas tabelas a serem apresentadas.

Em relação às fases do ciclo de vida da cachaça e álcool combustível de fazenda, algumas não tiveram suas emissões computadas, como o transporte de insumos do local onde são adquiridos até a microdestilaria, assim como o envasamento e distribuição aos consumidores.

As emissões consideradas e analisadas em relação à fase agrícola competem à produção de insumos aplicados pelo produtor no cultivo da cana de açúcar, à combustão do óleo diesel pelo maquinário empregado no campo, no transporte da cana e de insumos da microdestilaria às glebas; às emissões diretas de N_2O resultantes da aplicação de uso de fertilizantes sintéticos nitrogenados e da palhada que fica depositada sobre o solo após a colheita da cana de açúcar. Foram computadas as emissões indiretas de N_2O decorrentes da deposição atmosférica do N volatilizado do solo e do N lixiviado; e as emissões na produção de mudas. Também foram contabilizadas as emissões geradas na fabricação de implementos agrícolas, tratores e caminhões.

Na fase industrial não foram contabilizadas as emissões de bens de capital, emissões geradas na fermentação do mosto, como em Claros Garcia (2011). As emissões devidas ao uso de energia elétrica, foram calculadas de acordo com o fator de emissão divulgado pelo MCT (2014), assumindo a média dos últimos cinco anos, resultando no fator de emissão $0,07544 \text{ kg.CO}_2\text{eq/kWh}$.

As emissões de gases de efeito estufa foram calculadas para um ciclo de produção da cana de açúcar de seis anos e a média expressa em de kg CO₂ eq/ha ano para comparações com estudos correlatos.

O corte da cana de açúcar é realizado manualmente sem queima prévia para não alterar a qualidade da cachaça. Na colheita são retiradas as pontas e as palhas, sendo as palhas deixadas na lavoura e as pontas usadas pelo produtor para alimentação do gado. A quantidade de palha e de pontas foi determinada em campo. Foram realizadas três repetições em uma área de 2 m², visto que as fileiras são plantadas com larguras de 2 m. Foram cortadas a cana inteira (colmos, palhas e pontas) de locais diferentes de uma mesma área. Após o corte da cana inteira foi realizada a pesagem da mesma e depois retiradas às palhas para se obter a massa dos colmos e pontas. Em seguida foram retiradas as pontas, realizando uma nova pesagem.

O peso do colmo, palhas e pontas contabilizam o peso total da cana cortada e pela diferença dos pesos obtidos, obteve-se de 68,11 kg de palhas e 148,65 kg de pontas por tonelada de cana de açúcar.

Os resíduos da colheita deixados no solo, palhada, são responsáveis pela emissão direta de N₂O, e o fator de emissão assumido de CO₂ foi de 0,0234 kg CO₂eq/kg para palhada seca. Esse valor foi obtido, considerando que o fator de transformação de N em N₂O é de 44/28 e para a transformação de N₂O em CO₂ equivalente é de 298, e que a porcentagem de nitrogênio na palha é de 0,5% de N (Macedo et al., 2008).

As aplicações de fertilizantes nitrogenados resultam em emissões diretas de N₂O pelo solo, e essas emissões foram calculadas de acordo com os fatores do IPCC (2006b). Segundo o IPCC (2006b), a cada 1% de nitrogênio aplicado na cultura, torna-se disponível para formação de N₂O, resultando um fator de emissão de 4,6829 kg CO₂eq/kg N aplicado. Assumiu-se que a área de plantio da cana de açúcar é pobre em matéria orgânica, como a maioria dos solos brasileiros, não sendo, portanto, contabilizadas as emissões de N₂O pelo solo devido à presença de matéria orgânica. As estimativas das emissões diretas foram calculadas conforme equação 3, dada por IPCC (2006b):

$$N_2O_{\text{direto-N}} = (FSN + FCR) * EF_1 \quad (3)$$

em que:

$N_2O_{\text{direto-N}}$ = emissões direta anual N₂O-N do manejo do solo, kg N₂O-N ano⁻¹;

FSN = quantidade de N no fertilizante sintético aplicado no solo, kg N ano⁻¹;

EF_1 = fator de emissão de N_2O devido aplicação de N, $kg N_2O-N (kg N)^{-1}$;

FCR= quantidade de N nos resíduos da lavoura (aqui considerado apenas sobre o solo).

onde:

$EF_1 = 0,01$

Para conversão do N_2O-N para emissão de N_2O , usou-se a equação (4):

$$N_2O = (N_2O-N) 44/28 \quad (4)$$

Para transformação do N_2O em CO_2 equivalente, multiplicou-se o valor obtido pela equação 4 pelo fator 298 (IPCC, 2007).

O fator de emissões do solo devido à aplicação de calcário dolomítico, foi determinado segundo IPCC (2006 b), resultando no fator de 0,4767 $kg CO_2eq/kg$.

A metodologia para o cálculo das emissões indiretas de N_2O decorrentes da deposição atmosférica do N volatilizado do solo e do N lixiviado, foram obtidas de IPCC (2006b) tal como em Carvalho (2012). A quantidade de N presente no fertilizante sintético foi levada em conta no cômputo da emissão do nitrogênio volatilizado e para o cálculo da emissão do nitrogênio lixiviado foram consideradas as quantidades de N presente nos resíduos da colheita e do N contido nos fertilizantes. Os fatores de emissão utilizados para o cálculo das quantidades de N que se volatilizam na forma de NH_3 e NO_x e do N lixiviado foram os indicados no IPCC (2006b), assim como os fatores de emissão da deposição de N volatilizado e da lixiviação.

As emissões devidas à produção de mudas foram calculadas utilizando uma fração das emissões totais da produção de cana de açúcar em lavouras. As áreas de cultivo da cana de açúcar apresentam-se em média 12,5 vezes maiores do que as áreas de viveiro. Sendo assim, no cômputo de emissões de GEE devido à produção de mudas, foi considerada, de acordo com Claros Garcia (2011) a fração de 1/12,5, em relação às emissões totais obtidas na fase agrícola da produção da cana de açúcar, não considerando as emissões do transporte da cana.

Por meio de catálogos de fabricantes foram obtidas as massas dos implementos e do trator utilizado no preparo do solo. No cálculo das emissões devido à aquisição do maquinário agrícola, considerou-se a vida útil e a densidade de máquina por hectare. De acordo com Boddy et al., (2008), a massa em aço para implementos corresponde a 100%, e para tratores 82%, e que 30% das emissões totais na fabricação do aço devem ser computadas nas emissões

devido à manutenção e reparos. Não foram computadas as emissões devidas aos componentes não metálicos como pneus, borrachas e plásticos incorporados nos maquinários.

Nas emissões referentes à fabricação dos caminhões, só foi considerada as emissões correspondentes a produção de aço.

Foi adotada a metodologia utilizada em Souza (2010) para cálculo das emissões pelos caminhões empregados no transporte de insumos e cana de açúcar. A massa de cada caminhão utilizado no transporte de insumo, cana de açúcar e mudas foi obtida por meio de pesagem dos mesmos na microdestilaria, sendo obtidas as seguintes taras: 5.770 kg, 7.760 kg e 9.160 kg e segundo Souza (2010), 18% da massa total de um caminhão corresponde a pneus e o restante é considerado como aço.

Conforme relatado em Macedo et al (2008), o fator de emissão brasileiro de aço é de $1,25 \text{ tCO}_2 (\text{t de aço})^{-1}$. As emissões contabilizadas condizem com a energia de fabricação do aço, ou seja, não são consideradas as emissões na etapa de fabricação dos implementos, caminhões e tratores.

O consumo da energia elétrica na fase industrial foi estimado pelo produto entre a potência nominal de cada equipamento pelo seu tempo de funcionamento, como indicados na Tabela 5.

Tabela 5- Consumo de energia elétrica

Operação	Potência nominal (Kw)	Tempo de uso (hora/dia)	Dias de produção	Área Total (ha)	Energia consumida por hectare (KW.h/ha)
Içamento da cana	3,68	0,6	86	50	3,798
Movimento para centralizar fecho	0,736	0,36	86	50	0,456
Movimento do fecho pela ponte	1,472	0,6	86	50	1,519
Picagem dos colmos (jogo de facas)	36,8	8	86	50	506,4
Transporte da cana até a moenda	3,68	8	86	50	50,64
Transporte do bagaço até a esteira	2,208	8	86	50	30,38
Transporte do bagaço para alimentação da primeira caldeira	2,208	8	86	50	30,38
Transporte do bagaço para alimentação da segunda caldeira e o excedente para o depósito	2,208	8	86	50	30,38
Primeira filtragem	2,208	8	86	50	30,38
Segunda filtragem	0,736	8	86	50	10,13
Bombeamento de caldo para cocho de fermentação	1,472	8	86	50	20,25
Bombeamento entre cochos	1,472	8	86	50	20,25
Bombeamento do vinho fermentado para destilação	2,208	8	86	50	30,38
Bombeamento da cachaça para tonel	0,368	8	86	50	5,064
Bombeamento da vinhaça, restilo e água de lavagem para armazenamento	2,208	8	86	50	30,38
Ventilação da caldeira	7,36	8	86	50	101,3
Bombeamento de água para caldeira	4,42	3,49	86	50	26,53
Total	—	—	—	—	928,617

Os valores da Tabela 5 foram estimados, sendo assim, adotou para o balanço de emissões o consumo de energia elétrica obtido nas contas de energia elétrica da microdestilaria para o período de produção. O consumo obtido nas faturas foi de 552,62 kWh ha⁻¹, correspondente a 7,51 kWh TC⁻¹.

A emissão de gases pela combustão e produção do óleo diesel utilizados no maquinário agrícola, de acordo Carvalho (2012), correspondem a 3,498 kg CO₂ kg⁻¹ e 0,320 kgCO₂ kg⁻¹, respectivamente. Embora atualmente no Brasil sejam adicionados 7% de biodiesel no diesel mineral, considerou-se o percentual de 5%, como em anos anteriores. Para esse percentual ser alcançado, para cada tonelada de diesel tem-se 11% de metanol, sendo então considerada a

combustão desse metanol. Carvalho (2012), relata o fator de emissão do metanol como sendo de 1,375 t CO₂ t⁻¹.

Os fatores de emissões relacionados ao uso de insumos agrícolas, foram obtidos BIOGRACE (2008) e Macedo et al (2008) como apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Fatores de emissão de insumos agrícola empregados na cultura de cana de açúcar

Paramêtros	Fator de emissão, gases de efeito estufa, kg CO ₂ eq. kg ⁻¹
N-fertilizante	3,970 ^[2]
P ₂ O ₅ - fertilizante	1,011 ^[1]
K ₂ O- fertilizante	0,576 ^[1]
Herbicida	25 ^[2]
Calcário	0,129 ^[1]

^[1] BIOGRACE (2008) e ^[2] Macedo et al (2008) .

Como a área de produção foi ocupada em anos anteriores por culturas agrícolas, não são consideradas as emissões de gases de efeito estufa devido à mudança de uso do solo.

Para o cálculo das emissões médias de gases de efeito estufa no ciclo, considerou-se o número de vezes em que o insumo e/ou equipamento é utilizado no ciclo, sendo que alguns são aplicados uma vez e outros cinco vezes.

3.4 RESULTADO E DISCUSSÃO

3.4.1 Emissões de gases de efeito estufa

3.4.1.1 Fase agrícola

Na Tabela 7, são apresentados os consumos de óleo diesel no transporte interno dos insumos aplicados na cultura da cana de açúcar e no transporte da cana de açúcar da lavoura à microdestilaria.

Tabela 7- Consumo de combustível no transporte dos insumos e de cana de açúcar da lavoura a microdestilaria

Operação	Consumo de Óleo Diesel	
	(Litros ha ⁻¹)	(kg ha ⁻¹) ^[3]
Transporte interno do calcário	1,77 ^[1]	1,49
Transporte interno do adubo para cana soca	0,44 ^[1]	0,37
Transporte interno adubo para cana planta	0,53 ^[1]	0,45
Transporte de mudas	5,00 ^[2]	4,2
Transporte da cana cortada à Microdestilaria	65,06 ^[1]	54,65
Carregamento da cana cortada para o caminhão	24,53 ^[3]	20,60
Total	97,33	81,76

^[1] valores obtidos pela equação 1, utilizando dados da Tabela 4 e considerando distância média de 13 quilômetros da lavoura a microdestilaria. ^[2] Produtor. ^[3] Para converter litros hectare⁻¹ para kg hectare⁻¹ multiplica-se pela massa específica de 0,84 kg L⁻¹ (Balanço energético nacional, 2014). ^[3] Tabela 3.

Na Tabela 8 podem ser observadas as emissões de gases de efeito estufa relacionados à produção de insumos aplicados na cultura da cana de açúcar pelo produtor.

Tabela 8 – Emissões decorrentes da produção de insumos utilizados no cultivo da cana de açúcar

Entradas	Emissão GEE kg CO2eq/ha		Emissão total de GEE kg CO2eq/ha	Emissão média anual kg CO2eq/ha.ano
	Planta	Soca		
Fertilizantes				
Nitrogênio (N)	-	397	1.985	330,83
Fosforo (P ₂ O ₅)	151,65	-	151,65	25,27
Potássio (K ₂ O)	51,84	57,6	339,84	56,64
Subtotal			2.476,49	412,74
Calcário				
Calcário dolomítico	258	-	258	43
Subtotal			258	43
Herbicida				
Herbicida	-	29,25	146,25	24,38
Subtotal	-	-	146,25	24,38
Combustível				
Óleo Diesel (exceto carregamento e transporte da cana de açúcar, e de insumos)	33,28	-	33,28	5,55
Subtotal			33,28	5,55
Total			2.914,02	485,67

Os gases de efeito estufa emitidos para a atmosfera devido à produção de fertilizantes N-P-K, foram 412,74 kg CO₂ eq./ha ano, valor superior ao encontrado por Claros Garcia (2011), que foi de 198,80 CO₂ eq./ha ano. Isso se deve ao fato de que nas usinas analisadas por Claros Garcia (2011) em seu estudo, não foram aplicados fertilizantes nitrogenados na cana planta. Todavia, temos que Souza (2010) relata um valor superior para grandes usinas no Estado de São Paulo, com emissões de 522,60 kg CO₂ eq./ha ano.

Na Tabela 9, são apresentadas as emissões devidas à produção de óleo Diesel utilizado no transporte da cana de açúcar da lavoura à microdestilaria, do transporte interno dos insumos e transporte de mudas.

Tabela 9 – Emissões devido à produção do óleo Diesel consumido no transporte de cana pela carregadeira, transporte da cana, transporte interno de insumos e transporte de mudas

Categoria	Quantidade (kg ha ⁻¹)	Emissões kg CO ₂ eq/ha	Emissões kg CO ₂ eq/ha ano*
Tranporte de cana pela carregadeira	20,60	6,59	5,49
Transporte de cana	54,65	17,45	14,54
Transporte interno do adubo para cana planta	0,45	0,14	0,024
Transporte interno do adubo para cana soca	0,37	0,12	0,100
Transporte de mudas	4,2	1,34	0,224
Transporte de calcário	1,49	0,48	0,079
Total	-	26,12	20,457

*Para ciclo de 6 anos.

As emissões de gases de efeito estufa referentes à combustão (queima) de óleo Diesel nas máquinas agrícolas empregadas, transporte interno de insumos, transporte de calcário, transporte de mudas e no transporte da cana de açúcar são apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10 – Emissões de gases de efeito estufa devido consumo de óleo diesel nas operações agrícolas e no transporte de cana

Categoria	Total de óleo diesel no ciclo, kg ha ⁻¹	Emissões kg CO ₂ ha ⁻¹	Emissões kg CO ₂ / ha ano
Operações cana planta	104	345,60	57,60
Tranporte de cana pela carregadeira	20,60	68,61	57,17
Transporte interno do adubo para cana soca	0,37	1,23	1,03
Transporte interno do adubo para cana planta	0,45	1,50	0,25
Transporte de calcário	1,49	4,96	0,83
Transporte de cana	54,65	182,02	151,68
Transporte mudas	4,2	13,99	2,33
Total	–	617,91	270,89

Nas operações agrícolas realizadas para o plantio da cana de açúcar, o consumo de combustível foi em média de 17,33 kg (ha ano)⁻¹ correspondendo a 20,63 L (ha ano)⁻¹. Esse valor foi abaixo daquele encontrado por Boddy et al (2008), que foi de 22,3 L/ha.ano nas operações agrícolas para grandes usinas de cana de açúcar. O consumo de óleo diesel na cana planta foi de 104,00 L ha⁻¹ e na cana soca não foram computados o consumo de óleo diesel, devido à adubação e aplicação de herbicida serem manuais. Esse valor ficou próximo do encontrado por Macedo et al. (2004) que foi de 102,6 L ha⁻¹ para o plantio e 9,1 L ha⁻¹ para os tratamentos culturais da cana soca; entretanto, são valores para grandes usinas de álcool.

Claros Garcia (2011) obteve em média 69,77 kgCO₂eq/ha.ano de emissões totais referentes ao consumo de óleo diesel nas operações agrícolas realizadas na cana planta e na cana soca, valor abaixo ao encontrado no presente estudo, que foi de 57,60 kgCO₂eq/ha.ano.

Na Tabela 11 são apresentadas as emissões resultantes devidas à aplicação de calcário.

Tabela 11 – Emissões de CO₂ do solo devido aplicação de calcário

Categoria	Quantidade (kg ha ⁻¹)	Emissões (kg CO ₂ eq./ha)	Emissões (kg CO ₂ eq./ha.ano)
Aplicação de calcário dolomítico	2000	953,4	158,9

Devido às emissões de CO₂ geradas na fabricação de calcário, esse valor deve ser adicionado ao valor encontrado nas suas emissões quando esse produto é aplicado ao solo, obtendo assim um valor de 201,9 kg CO₂ eq./ha.ano. Esse valor ficou próximo do encontrado por Claros Garcia (2011), que foi de 188,25 kg CO₂ eq./ha.ano, sendo que a taxa de aplicação de calcário relatada por este autor de 1.520 kg ha⁻¹.

São apresentadas na Tabela 12, as emissões diretas de N₂O resultantes da aplicação de fertilizantes nitrogenados sintéticos no solo e, da deposição da palha deixadas no solo.

Tabela 12- Emissões diretas de N₂O do solo resultantes da aplicação de fertilizantes sintéticos nitrogenados e devido à deposição da palha no solo

Categoria	Unidade	Quant. no ciclo	Emissões (kg CO ₂ eq./ha)	Emissões (kg CO ₂ eq./ha.ano)
Aplicação de fertilizante nitrogenado	kg N ha ⁻¹	500	2.341,45	390,24
Deposição da palha sobre o solo	kg ha ⁻¹	25.064,48	586,509	97,75
Total	-	-	2.927,96	487,99

A média de aplicação de N sintético na cultura, no presente estudo, foi de 83,33 kg (ha ano)⁻¹ e as emissões decorrentes dessa aplicação foram de 390,24 CO₂ eq./ha ano, valor próximo ao obtido em Claros Garcia (2011), que foi de 331,52 kg CO₂ eq./há ano; contudo, Claros Garcia (2011) considerou como fator de emissão que cada kg de N contribui com 20 g de N₂O. As emissões totais diretas devidas à aplicação de fertilizantes sintéticos são 390,24 kg CO₂ eq./ha ano (Tabela 12), acrescidas das emissões devidas à produção de fertilizantes nitrogenados (Tabela 8), totalizando 721,07 kg CO₂ eq./ha ano.

Na Tabela 13 são apresentadas as emissões indiretas de N₂O do manejo das lavouras, provenientes da volatilização e lixiviação do nitrogênio aplicado na forma de fertilizantes e do contido nos resíduos da colheita que retornam ao solo.

Tabela 13 – Estimativas das emissões indiretas provenientes da deposição da palha e aplicação de fertilizante nitrogenado na cultura da cana de açúcar

Categoria	Unid.	Quantidade total no ciclo	Emissões kg CO ₂ eq./ha	Emissões kg CO ₂ eq./ha ano
N – Volatizado	kg ha ⁻¹	500	234,15	39,05
N – lixiviado	kg ha ⁻¹	625,35	658,87	109,81
Total de emissões	-	-	893,02	148,86

As emissões indiretas de N₂O foram de 148,86 kg CO₂ eq./ha ano devido ao cultivo da cana de açúcar, porém em muitos estudos estas emissões não são consideradas.

As emissões relacionadas à produção do aço empregadas nas construções de implementos agrícolas e maquinários utilizados no cultivo de cana de açúcar são demonstradas na Tabela 14.

Tabela 14- Emissões devido o uso de material metalúrgico na construção de maquinários agrícolas e implementos utilizados na cultura de cana de açúcar

Máquinas e implementos	Massa total (kg) ^[1]	Massa em aço (kg)	Vida útil (horas)	Coeficientes			Emissões parciais CO ₂ eq/ha	Manutenção CO ₂ eq/ha	Emissões totais CO ₂ eq/ha
				kg hora	hora/ha	kg/ha			
Trator 105 cv	5.936	4.867,52	12.000	0,41	9,5	3,90	4,88	1,44	6,32
Trator 88 cv	4.675	3.833,5	12.000	0,32	2,45	0,78	0,98	0,29	1,27
Arado 3 discos	470	470	1.400	0,34	2,16	0,73	0,91	0,27	1,18
Grade Aradora 18 discos	4.385	4385	1.400	3,13	3,67	11,49	14,36	4,31	18,67
Espalhadeira com capacidade de 500 kg	295	295	1.400	0,21	0,50	0,11	0,14	0,042	0,18
Sulcador de 2 Linhas	295	295	1.400	0,21	3,17	0,67	0,84	0,25	1,09
Carregadeira	2800	2800	1.400	2	2,45	4,9	6,12	1,86	7,98
Total	-	-	-	-	-	22,58	-	-	36,69

^[1] Obtido de catálogos de fabricantes para os modelos utilizados.

As emissões relacionadas à produção do aço empregadas nas construções dos caminhões utilizados no transporte de cana de açúcar e insumos são demonstradas na Tabela 15.

Tabela 15- Emissões devido o uso de material metalúrgico na construção de caminhões utilizados no transporte de cana de açúcar e insumos agrícolas

Equipamento	Densidade média de utilização (kg ha ⁻¹)	Emissões parciais (CO ₂ eq./ha)	Manutenção (CO ₂ eq./ha) ^[1]	Total por ano kg CO ₂ eq./ha.ano
Caminhões	372,12	465,15	93,03	55,82

^[1] Custo de manutenção 20% (Boddey et al, 2008);

^[2] Tempo de vida útil de 10 anos (Santos, 2010).

Na Tabela 16 estão sintetizadas as emissões estimadas na fase agrícola da produção da cana de açúcar.

Tabela 16– Emissões totais estimadas na fase agrícola no ciclo da cana de açúcar

Categoria	Emissões Kg CO ₂ eq/ha.ano
Fertilizantes	412,74
Herbicidas	24,38
Produção e combustão do óleo Diesel utilizado no transporte interno de adubo	1,40
Produção e combustão do óleo Diesel utilizado no transporte da cana	166,22
Produção e combustão do óleo Diesel utilizado pelas máquinas agrícolas	63,12
Produção e combustão do óleo Diesel utilizado no transporte do calcário	0,91
Produção e combustão do óleo Diesel utilizado no transporte das mudas	2,55
Produção e combustão do óleo Diesel utilizado pela carregadeira	62,66
Produção calcário dolomítico	43,00
Aplicação de calcário dolomítico no solo	158,9
Emissões diretas de N ₂ O no solo devido aplicação de fertilizantes sintético nitrogenado e manejo da lavoura	487,99
Emissões indiretas de N ₂ O provenientes da deposição da palha e aplicação de fertilizante nitrogenado	148,86
Máquinas agrícolas	36,69
Caminhões	55,82
Mudas	133,24
Total das emissões	1.798,46

3.4.1.2 Fase industrial

Na fase industrial foram consideradas as emissões da queima do bagaço para geração de energia térmica e as emissões para geração de energia.

A quantidade de bagaço para geração de 4.000 kg de vapor por hora foi determinada conforme equação 2, sendo obtidas 1.743 kg de bagaço hora⁻¹. Considerando o número de dias de produção e horas de produção diária tem-se que na safra de 2014 foram queimados 1.200.000 kg de bagaço.

As emissões de CO₂ na queima do bagaço para geração de energia térmica não foram consideradas, devido serem absorvidas pela cultura no processo de fotossíntese. Porém, consideraram-se as emissões de metano e óxido nitroso para compôto das emissões de CO₂ eq. O GWP adotado para o metano foi de 298 e de 25 para o óxido nitroso, de acordo com o IPCC (2007) e os defaults conforme IPCC (2006a). As emissões resultantes pela queima de bagaço, aplicando estes fatores, e considerando a quantidade de bagaço queimado durante a produção e o poder calorífico inferior do bagaço, foi de 415,56 kg CO₂ eq./ha ano).

As emissões resultantes ocasionadas pelo uso da energia elétrica no processamento da cana de açúcar é apresentada na Tabela 17.

Tabela 17- Emissões devido o uso de energia elétrica

Categoria	Quantidade	Fator de Emissão	Emissão (kg CO ₂ eq./ha ano)
Produção de energia elétrica	552,62 kWh ha ⁻¹	0,07544 Kg CO ₂ eq/kWh *	41,69

*MCT (2014)

As emissões na fase industrial foram de 457,25 kg CO₂ eq./ha ano, valor superior ao encontrado por Claros Garcia (2011), que foi de 42,32 kg CO₂ eq/ha.ano; entretanto, as emissões na fase industrial encontradas por Claros Garcia (2011) são devidas à utilização de compostos químicos na produção do etanol. Maroun (2013) descreve e analisa as emissões na produção de álcool combustível de fazenda em sistema de cooperativa, encontrando na fase industrial o valor de 145,84 kg CO₂ eq./ha ano, no qual 58 % das emissões da fase industrial estão relacionadas à queima da lenha, biomassa não utilizada pelo produtor em análise.

Na Tabela 18 são apresentadas as emissões de gases da fase agrícola e da fase industrial da produção da cachaça e do álcool combustível e suas respectivas participações percentuais.

Tabela 18 – Participação das fases agrícola e industrial na emissão total de gases de efeito estufa na produção integrada de cachaça e de álcool combustível de fazenda

Categoria	Emissões, (kg CO ₂ eq/ha.ano)	Porcentagem (%)
Fase agrícola	1.798,46	79,73
Fase industrial	457,25	20,27
Total	2.255,71	100

3.4.2 Alocação

As emissões de gases de efeito estufa são ocasionadas tanto pela produção de cachaça, como pela produção de álcool combustível de fazenda. Para realizar a alocação na fase agrícola e industrial, e obter a porcentagem de emissões destinada para produção da cachaça e do álcool combustível, consideraram-se as porcentagens das frações cabeça, coração e cauda, em relação ao volume de destilado. Diante dos valores obtidos de 40 litros de cabeça, 320 litros de coração e 40 litros de cauda obtidos a cada 400 litros de destilados, obtém-se a porcentagem de emissão de gases de efeito estufa devido a produção de cachaça que corresponde a 80%, e 20% destinada à produção de álcool combustível de fazenda, que é obtido da destilação dos subprodutos cabeça e cauda.

Na Tabela 18 têm-se os valores das emissões para a produção da cachaça e de álcool combustível de fazenda.

Tabela 18- Emissões de gases de efeito estufa por categoria da fase agrícola originadas da produção integrada da cachaça e do álcool combustível

Categoria	Bioetanol kg CO ₂ eq/ha ano	Cachaça kg CO ₂ eq/ha ano
Fertilizantes	82,548	330,192
Herbicidas	4,876	19,504
Produção e combustão do óleo Diesel utilizado no transporte interno de insumos	0,280	1,120
Produção e combustão do óleo Diesel utilizado no transporte da cana	33,244	132,976
Produção e combustão do óleo Diesel utilizado pelas maquinas agrícolas	12,624	50,496
Produção e combustão do óleo Diesel utilizado no transporte do calcário	0,182	0,728
Produção e combustão do óleo Diesel utilizado no transporte das mudas	0,510	2,040
Produção e combustão do óleo Diesel utilizado pela carregadeira	12,532	50,128
Produção calcário dolomítico	8,600	34,400
Aplicação de calcário dolomítico	31,780	127,120
Emissões diretas de N ₂ O no solo devido aplicação de fertilizantes sintético nitrogenado e manejo da lavoura	97,598	390,392
Emissões indiretas de N ₂ O provenientes da deposição da palha e aplicação de	29,772	119,088
Máquinas agrícolas	7,338	29,352
Caminhões	11,164	44,656
Mudas	26,644	106,576
Subtotal	359,692	1.438,768
Total das emissões		1.798,46

Na Figura 1 são apresentadas as emissões na fase agrícola para produção de cachaça e álcool combustível.

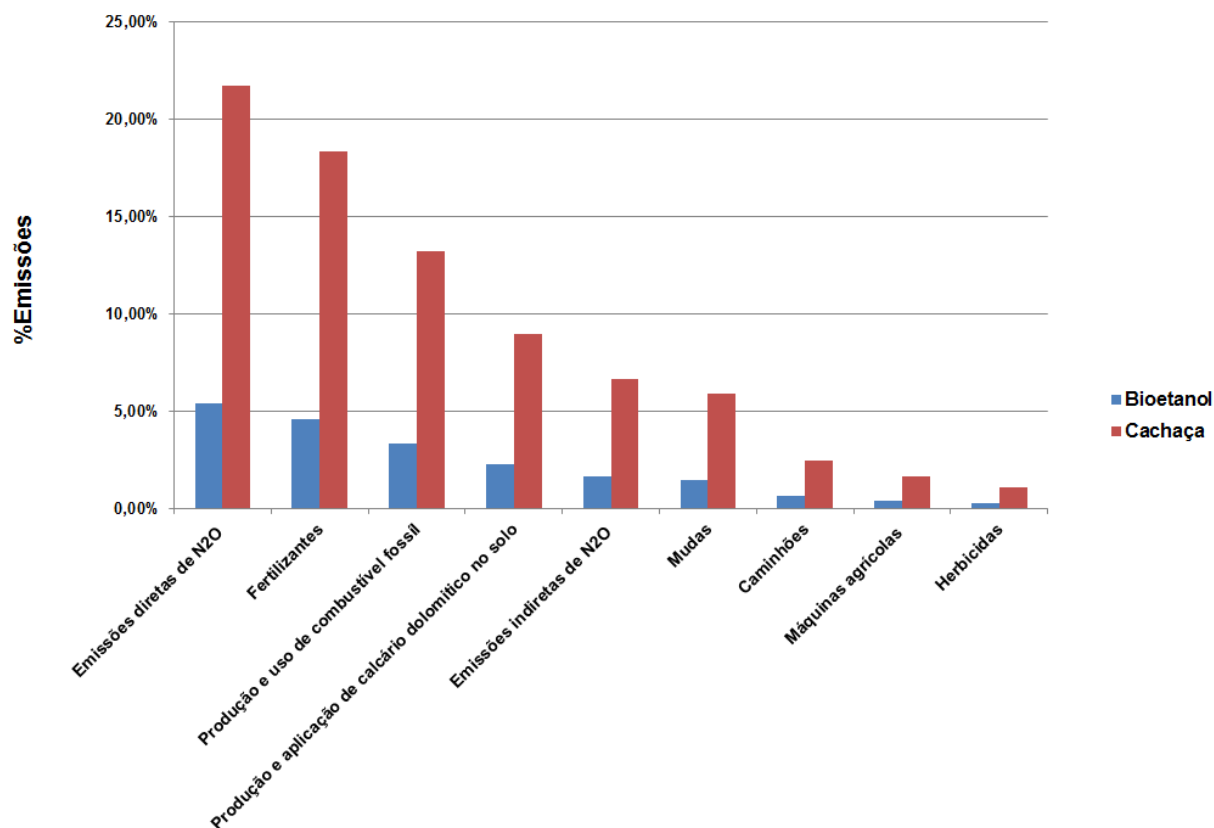


Figura 1 – Participação percentual das categorias nas emissões totais de gases de efeito estufa na produção integrada de cachaça e álcool combustível de fazenda.

As categorias mais impactantes na fase agrícola na produção de cachaça e bioetanol, em relação às emissões totais da produção integrada da cachaça e álcool combustível de fazenda, foram às emissões diretas de N₂O devido à aplicação de fertilizantes nitrogenados e do N contido nos resíduos da colheita, com 21,71% para a produção da cachaça e 5,43% para a produção do bioetanol, seguidas pelas emissões na produção de fertilizantes com 18,36% na produção da cachaça e 4,59% na produção do bioetanol. Para otimização das emissões, a substituição do adubo sintético nitrogenado pelo adubo orgânico pode colaborar para a redução de emissões de gases de efeito estufa na fase agrícola.

3.5. CONCLUSÕES

As emissões de gases de efeito estufa na fase agrícola na produção da cana de açúcar foram de 1.798,46Kg CO₂eq/ha.ano.

As categorias mais impactantes na fase agrícola para produção de cachaça e bioetanol, em relação às emissões totais da fase agrícola da produção integrada, foram às emissões diretas de N₂O devido à aplicação de fertilizantes nitrogenados e do N contido nos resíduos da colheita, com 21,71% para produção da cachaça e 5,43% para produção do bioetanol, seguidas pelas emissões na produção de fertilizantes com 18,36% na produção da cachaça e 4,59% na produção do bioetanol.

Para otimização das emissões, a substituição do adubo sintético nitrogenado pelo adubo orgânico pode colaborar para redução de emissões de gases de efeito estufa na fase agrícola.

Os gases de efeito estufa da fase industrial foram de 457,25 kg CO₂ eq./ha ano, emissões estas devidas ao uso de energia elétrica e à queima de bagaço para geração de energia térmica.

Na fase industrial de emissões foram 365,80 kgCO₂eq/ha.ano no processamento da cana para produção da cachaça, e 91,40 kgCO₂eq/ha.ano para destilação da cabeça e cauda para obtenção do bioetanol.

A fase agrícola corresponde a 79,73% das emissões totais.

3.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BIOGRACE (2008) - **Biofuel Greenhouse Gas Emissions in Europe**. Disponível em: <http://www.biograce.net/>. Acesso em 2015.

BODDY, R. M., SOARES, L. H. B., ALVES, B. J. R., URQUIAGA, S. **Bio-Ethanol Production in Brazil**. In: PIMENTEL, D (Ed.). Biofuels, solar and wind as renewable energy systems. New York, 2008. P321-356 (Chapter 13).

BONATO FILHO, G. G. (2013). **Produção de álcool combustível a partir de subprodutos da fabricação de cachaça para associação de produtores**. Viçosa – MG. UFV. 98 p. 2013. Dissertação de mestrado.

CARVALHO, P. T. de (2012). **Balanço de emissões de gases de efeito estufa de biodiesel produzido a partir de soja e dendê no Brasil**. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2012. 153P. Dissertação de mestrado.

CLAROS GARCIA, J. C. (2011). **Emissão de gases de efeito estufa na obtenção do etanol de cana de açúcar: uma avaliação considerando diferentes cenários tecnológicos em Minas Gerais**. Belo Horizonte: UFMG, 2011. Tese doutorado.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Cana-de-Açúcar**. Quarto Levantamento, Brasília, p. 1-14, abr. 2014.

EPE - Empresa Brasileira de Energia. **Balanco Energético Nacional 2013: ano base 2012**. Rio de Janeiro: MME/EPE 2013.

IPCC (2006a). Guidelines for national greenhouse gases inventories. Stationary Combustion. Institute for Global Environmental Strategies. **Kamiyamaguchi Hayama, Japan**. (Vol 2 Energy. Chapter 2.). <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol2.html>.

IPCC (2006b). Guidelines for national greenhouse gases inventories. Institute for Global Environmental Strategies. **Kamiyamaguchi Hayama, Japan**. (Vol 4 Agriculture, Forest and Other land use. Chapter 11 N₂O Emissions from managed soils, and CO₂ emissions form lime and urea applicaton. Retrieved http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/4_Volume4/V4_11_Ch11_N2O&CO2.pdf).

IPCC (2007). **Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Core Writing Team, Pachauri, R.K. and Reisinger, A. (Eds.). IPCC, Geneva, Switzerland. 104 p.

MACEDO, I. C., SEABRA, J. E. A., SILVA, J. E. A. R. Green house gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: The 2005/2006 averages and a prediction for 2020. **Biomass and Bioenergy**, 32(2008), 582-595.

MARCHESAN TATU. Manual de Instruções. Matão, 2013.

MAROUN, M. R. (2013). **A produção integrada de etanol e alimentos por camponeses como uma oportunidade para o desenvolvimento rural sustentável do Rio Grande do Sul**. Rio de Janeiro: UFRRJ/COPPE: 2013. 227p. Tese de doutorado.

MCT (2014). Ministério da Ciência e Tecnologia. **Fatores de Emissão de CO₂ para utilizações que necessitam do fator médio de emissão do Sistema Interligado Nacional do Brasil, como, por exemplo, inventários corporativos**. Disponível em:<http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/321144.html#ancora>. Acesso em: 24 de junho de 2015

NOGUEIRA, R. M. **Análise da Produção Sustentável de Álcool Combustível, Aguardente e Leite, a partir da Cana-de-Açúcar.** Viçosa. 84 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, 2008.

SANTA IZABEL. **Manual técnico: Árado reversível Santa Izabel- ARSI.** São João da Boa Vista, 2015.

SANTA IZABEL. **Manual técnico: Distribuidora de calcário Santa Izabel.** São João da Boa Vista, 2015.

SANTA IZABEL. **Manual técnico: Sulcador Santa Izabel.** São João da Boa Vista, 2015.

SANTAL. **Manual Técnico: Linha Santal CMP - Carregadora de Açucar-de-açucar.** Ribeirão Preto, 2015.

SANTOS, R. E. R. dos. (2011). **Análise da viabilidade energética e econômica da produção de etanol em microdestilarias.** MS Thesis. Itajubá: Universidade Federal de Itajubá.

SILVA, J.S. **Produção de álcool combustível na fazenda e em sistema cooperativo.** Juarez de Sousa e Silva, editor- Viçosa-MG, v. 1,168p, 2007.

SILVA, O. C. (2012). **Uma avaliação da produção de bioetanol no contexto da agricultura familiar a partir da experiência da Cooperbio.** D.Sc. Thesis. USP: São Paulo

SOUZA, S. P. de (2010). **Produção integrada de biocombustíveis: uma proposta para reduzir o uso de combustível fóssil no ciclo de vida do etanol de cana de açúcar.** MS Thesis. São Carlos: Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos.

VALTRA. **Manual Técnico: Linha Média BM100.** Mogi das cruces, 2015.

VALTRA. **Manual técnico: Linha leve A850.** Mogi das cruces, 2015.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No estudo de balanço de energia da produção integrada de cachaça de qualidade e álcool combustível de fazenda, verificou que o uso dos subprodutos da produção da cachaça, cabeça e cauda, para produção de biocombustível, álcool de fazenda, é uma atividade viável energeticamente, visto que o balanço de energia foi positivo e a relação *output/input* foi de 4,61, abaixo da produção de álcool em grandes usinas que é em torno de 9 devido ao uso de energia elétrica em suas operações. O índice de renovabilidade demonstrou que o álcool de fazenda é um combustível renovável.

O uso de fertilizantes sintéticos foi à categoria que despendeu maior gasto de energia em relação aos outros elos da cadeia produtiva.

Em relação ao balanço de emissões, a fase agrícola é que apresentou maior contribuição na emissão de gases de efeito estufa, e a categoria mais impactantes foram relacionadas às emissões diretas de N₂O devido aplicação de fertilizantes nitrogenados e do N contido nos resíduos da colheita, seguida pelas emissões na produção de fertilizantes. Para otimização das emissões, a substituição do adubo sintético nitrogenado pelo adubo orgânico pode colaborar para redução de emissões de gases de efeito estufa na fase agrícola.

Para trabalhos futuros, sugere-se a substituição dos fertilizantes nitrogenados sintéticos por adubos orgânicos para quantificar as emissões e balanço de energia e verificar o quanto isto melhora a cadeia de produção integrada de cachaça de qualidade e biocombustível.