



Avaliação do desempenho ambiental do etanol de milho para o Brasil

A. C. G. DONKE^{1,4}, M. I. S. F. MATSUURA², L. KULAY^{3,4} e P. H. L. S. MATAI¹

¹PPGE – Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo

²EMBRAPA Meio Ambiente – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

³DEQ – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

⁴GP2 – Grupo de Prevenção da Poluição – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Av. Prof. Luciano Gualberto, Travessa 3, 380 – PQI - Cidade Universitária, São Paulo, SP

Segundo a Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, a demanda de etanol no Brasil alcançou os 9,9 milhões de m³ em 2012. No entanto, o setor sucroalcooleiro vem passando por uma fase de crise. Por outro lado, a região do Mato Grosso vem ganhando atenção por possibilitar a produção de etanol de outra fonte que não a cana-de-açúcar. O produto em questão é o milho, com recorrentes safras recordes e, com isso, vendido a baixos preços. Nesse contexto, este estudo se propõe a elaborar uma avaliação do desempenho ambiental da produção de etanol de milho nas condições da região oeste do Mato Grosso. A avaliação se trata de uma ACV atribucional com escopo de aplicação “berço ao portão”, com sistema de produto que engloba a produção de milho, transporte, produção de etanol e geração de energias térmica e elétrica a partir da queima de gás natural ou de cavaco. Dentre as categorias de impacto analisadas, os resultados destacam Mudanças Climáticas e Depleção de Recursos Fósseis como as principais. Além disso, de um modo geral, a substituição de um combustível fóssil por um renovável influenciou positivamente o desempenho do processo.

1. Introdução

Segundo a Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), a demanda de etanol hidratado no mercado brasileiro alcançou 9,9 milhões de m³ em 2012. Embora a região Sudeste responda por 56% do total nacional, assumindo o posto de principal estado produtor de etanol hidratado, apenas a região Centro-Oeste (CO) apresentou aumento da produção do combustível no país, enquanto as demais regiões apresentaram reduções de 2,5% a 11,5% (ANP, 2013). Isso caracteriza os estados do CO como áreas de expansão do etanol, ainda que grande parte de seu território não apresente condições ideais para a produção de cana-de-açúcar, seja por acolher área de Amazônia Legal, ou por apresentar média aptidão para a cultura, segundo o Zoneamento Agroecológico da Cana (MANZATTO et al, 2009).

Adicionalmente, o CO apresenta bons desempenhos na produção agrícola, assumindo a posição de liderança na produção de grãos do país. O estado do Mato Grosso ganha destaque, sendo responsável por 25% da produção nacional de milho, 29% da produção de soja e 55% da produção de algodão em caroço.

Neste contexto, produtores locais e usineiros inovaram a produção de etanol do estado introduzindo o milho como uma nova matéria-prima para o biocombustível. O grão em questão vem apresentando aumentos de produção e produtividade, ainda que produzido em sistema de segunda safra que, tradicionalmente, recebe menor aporte de recursos. Com a alta oferta, o produto tem sido comercializado a baixos preços de mercado.

A tecnologia de produção do etanol de milho tem como base o processo norte-americano, mas pode divergir em relação à fonte de energia utilizada na planta. Assim como as usinas dos EUA, o estado do Mato Grosso pode utilizar o gás natural como fonte de energia, já que o país é abastecido pelo Gasbol e Gasoduto Lateral Cuiabá, que trazem o gás natural da Bolívia para o

Brasil, entrando pela região Centro-Oeste e terminando na região Sul do país. Além disso, as usinas brasileiras têm a possibilidade de utilizar biomassa, como o bagaço de cana-de-açúcar, se a usina estiver integrada a uma usina convencional, ou cavaco de madeira, que pode alimentar energeticamente uma planta que produza exclusivamente etanol de milho.

Por se tratar de um novo processo de produção de combustível no país - especificamente de etanol, um produto frequentemente destinado à exportação -, o seu desempenho deve ser avaliado, especialmente do ponto de vista ambiental. Estudos vêm sendo realizados nesse sentido e já avaliaram diferentes cenários de produção integrada de etanol de cana-de-açúcar e milho, pelo método da avaliação de ciclo de vida, em sua maioria com dados principalmente secundários (Donke et al, 2013; Milanez et al, 2014; Nogueira et al, 2014). Este estudo, porém, objetiva avaliar a produção de etanol exclusivamente de milho, seguindo as diretrizes das normas ABNT NBR ISO 14040 e 14044 (ABNT, 2009a,b). O trabalho utiliza dados predominantemente primários e busca identificar quais os potenciais impactos ambientais mais expressivos e quais as alterações induzidas pela substituição do combustível fóssil, o gás natural, pelo renovável, o cavaco de madeira, no processo.

É esperado que o resultado desta avaliação possa contribuir com os tomadores de decisão na definição de sua filosofia de operação, visando incluir práticas agrícolas menos impactantes ao meio ambiente e processos industriais equilibrados e eficientes energeticamente. Dessa forma, as usinas estarão operando nas perspectivas da produção mais limpa e criando produtos mais competitivos no mercado internacional.

2. Modelagem do Ciclo de Vida

O processo de obtenção do etanol de milho foi modelado considerando um enfoque do tipo “berço ao portão” e engloba as etapas de cultivo agrícola de milho e de madeira, produção industrial de etanol e geração de energias térmica e elétrica a partir da queima de gás natural e cavaco de madeira, bem como as etapas de transporte que intermedeiam os processos. A Figura 1 representa o modelo utilizado na forma de diagrama de blocos.

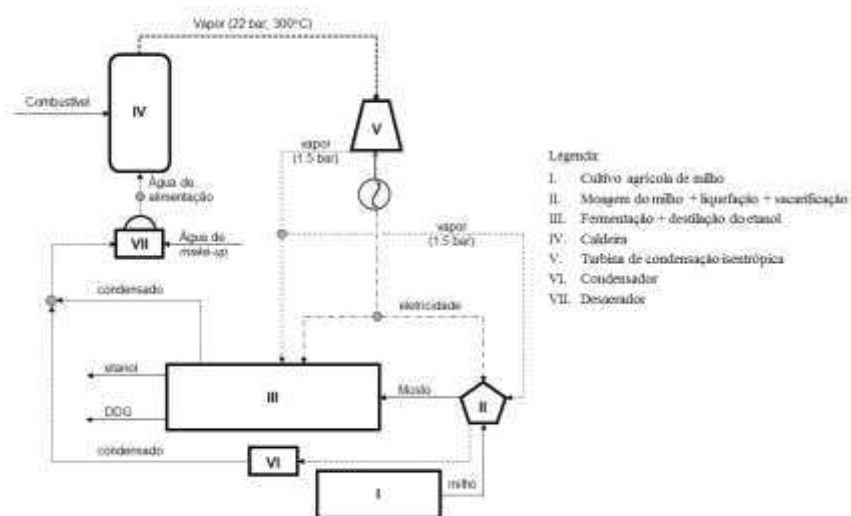


Figura 1. Diagrama de blocos do modelo de produção de etanol de milho



IV CONGRESSO BRASILEIRO SOBRE GESTÃO PELO CICLO DE VIDA

9 a 12 de novembro de 2014

São Bernardo do Campo – SP – Brasil



2.1 Cultivo de milho

A tecnologia utilizada para produção de milho adota o sistema de plantio direto e rotação de culturas, sendo a soja a cultura principal, cultivada na estação chuvosa, e o milho a segunda cultura, cultivada na estação seca. A produção conta com preparo mínimo de solo, plantio e colheita mecanizados, aporte de adubação NPK e aplicação de herbicidas, inseticidas e fungicidas. O transporte dos insumos para a produção foram considerados.

2.2 Produção de etanol e subprodutos

A tecnologia usada na produção de etanol de milho conta com os estágios de moagem do milho, liquefação com hidrólise enzimática do amido por α -amilases e glucoamilases, fermentação e destilação com obtenção de etanol hidratado (95%ww) como combustível; óleo fúsel, para o segmento químico; vinhaça, para fertirrigação; óleo de milho, para a indústria alimentícia; e DDG (*Dried Distillers Grains*), resíduo sólido destinado à alimentação animal. O transporte dos insumos para a produção foram considerados.

2.3 Cogeração energética

O sistema de cogeração opera a partir da queima de gás natural ou cavaco de madeira em uma caldeira para gerar calor e vapor, que será usado no processo e na geração de eletricidade, via ciclo Rankine. A caldeira produz vapor de alta pressão (VAP), com 20 bar e 300°C, para o processo, que por sua vez consome parte do calor e gera vapor de baixa pressão (VBP), com 1,5 bar e 130°C, também reaproveitado. O vapor segue para o desaerador e torre de resfriamento (condensador). O vapor de alta pressão impulsiona uma turbina que aciona um gerador elétrico com capacidade de 3000 kW. O cavaco de madeira considerado como combustível alternativo ao gás natural apresenta teor de umidade de 28,6%, Poder Calorífico Inferior de 14,4 MJ/kg e consumo de 270kg/t VAP, enquanto o consumo de gás natural é 83,2 m³/t VAP. O transporte dos insumos para a produção foram considerados, sendo que o gás natural por gasoduto e o cavaco de madeira por modal rodoviário.

3. Bases conceituais, requisitos técnicos e premissas

O objetivo deste estudo é avaliar a produção de etanol hidratado a partir de milho. Seus propósitos são proporcionar subsídios para a tomada de decisão quanto a novas tecnologias e matérias-primas para a produção de etanol. O escopo do estudo delimita uma abordagem do “berço-ao-portão” e identifica como função “produzir etanol”. Neste sentido, a Unidade Funcional e o Fluxo de Referência podem ser definidos por uma mesma unidade, 1 (uma) tonelada de etanol hidratado (C₂H₆O 95%ww) em uma destilaria autônoma. O Sistema de Produto segue as definições do item 2 *Modelagem do Ciclo de Vida*.

Os dados utilizados foram essencialmente de origem primária, sendo os dados secundários usados apenas para efeito de complementação de informações necessárias para o modelo e inventários. A coleta de dados foi realizada em três visitas técnicas à uma usina que produz etanol de milho, a partir de entrevistas com produtores rurais e o corpo técnico da usina. Os dados referentes à produção de madeira foram os únicos originados de fonte exclusivamente secundária, no caso, a base de dados *Ecoinvent*. A cobertura temporal corresponde à safra 2013/2014. A cobertura geográfica foi a região oeste do estado do Mato Grosso. A cobertura tecnológica considera as especificações descritas no item 2 *Modelagem do Ciclo de Vida*.

Foram aplicados procedimentos de alocação, segundo o critério mássico, entre etanol (9,89%), vinhaça (89,74%) e óleo fúsel (0,37%) na etapa de destilação, e entre DDG (91,67%) e óleo de



IV CONGRESSO BRASILEIRO SOBRE GESTÃO PELO CICLO DE VIDA

9 a 12 de novembro de 2014

São Bernardo do Campo – SP – Brasil



milho (0,33%) na etapa de produção de DDG. O método de AICV utilizado foi o ReCiPe Midpoint (H) v.1.10. As categorias de impacto selecionadas para a avaliação foram Mudanças Climáticas (MC), Eutrofização de Água Doce (EUT), Ecotoxicidade de Água Doce (ETA), Formação de Material Particulado (FMP) e Depleção de Recursos Fósseis (DRF). Não foram considerados aspectos ambientais das construção, uso e desativação de bens de capital.

4. Resultados e Discussão

O primeiro resultado obtido da aplicação do método de AICV foi o perfil ambiental do processo base de obtenção do etanol de milho, que considera o gás natural como combustível (Tabela 1).

Tabela 1: Perfil ambiental para a obtenção de 1 t de etanol hidratado de milho

Categoria de Impacto	Unidade	Total / t CH ₂ H ₆ O
Mudanças Climáticas (MC)	kg CO ₂ eq	1070
Eutrofização de Água Doce (EUT)	kg P eq	0,074
Ecotoxicidade de Água Doce (ETA)	kg 1,4-DB eq	0,054
Formação de Material Particulado (FMP)	kg MP10 eq	4,2
Depleção de Recursos Fósseis (DRF)	kg petróleo eq	743

Fonte: Elaboração própria (2014)

O perfil ambiental indicou que, das cinco categorias de impacto analisadas, três demonstraram resultados pouco expressivos. Por se tratar de um processo que envolve atividades agrícolas e, portanto, interações diretas com o ambiente - como os corpos hídricos por lixiviação e escoamento superficial - as categorias de EUT e ETA poderiam ser consideradas relevantes. No entanto, considerando a magnitude dos outros impactos, as emissões nessas categorias foram discretas e, comparativamente, não se destacaram.

Da mesma forma, a categoria de FMP poderia ser relevante pelo fato de toda a energia consumida no processo industrial ser gerada a partir do processo de combustão e, também, devido à queima de diesel nas atividades agrícolas mecanizadas. Porém, as emissões para essa categoria foram também residuais com 0,011 g de pó/t de VAP, concentradas como perdas de pó como fuligem da caldeira. Por outro lado, as categorias de MC e DRF se mostraram como as mais significativas. Para MC, convencionou-se que as emissões de CO₂ de origem biogênica apresentam balanço material sem acúmulo. Portanto, foram consideradas apenas as emissões de N₂O da nitrificação dos fertilizantes nitrogenados; emissões provenientes da queima de combustíveis fósseis nas atividades agrícolas mecanizadas e no transporte do milho; e de CO₂ e CH₄ derivados do processo de recompressão do gás natural e de vazamentos na linha de transporte. As demais emissões de GEE mostraram-se residuais e foram desconsideradas para efeito de balanceamento. A DRF se mostrou significativa pelos consumos de gás natural no fornecimento de energia térmica e elétrica para a unidade industrial. Além disso, esta categoria influencia diretamente na MC, já que etapas de transporte e queima desse combustível se mostraram relevantes.

A partir da identificação das principais categorias de impacto do processo, foi empreendida uma análise mais aprofundada, através de uma discretização, para averiguar a relação entre os processos e os resultados de cada categoria. Os mesmos procedimentos foram realizados com a introdução do cavaco de madeira como combustível renovável em substituição ao gás natural, a fim de se comparar seus desempenhos. Os resultados estão mostrados na Figura 2.

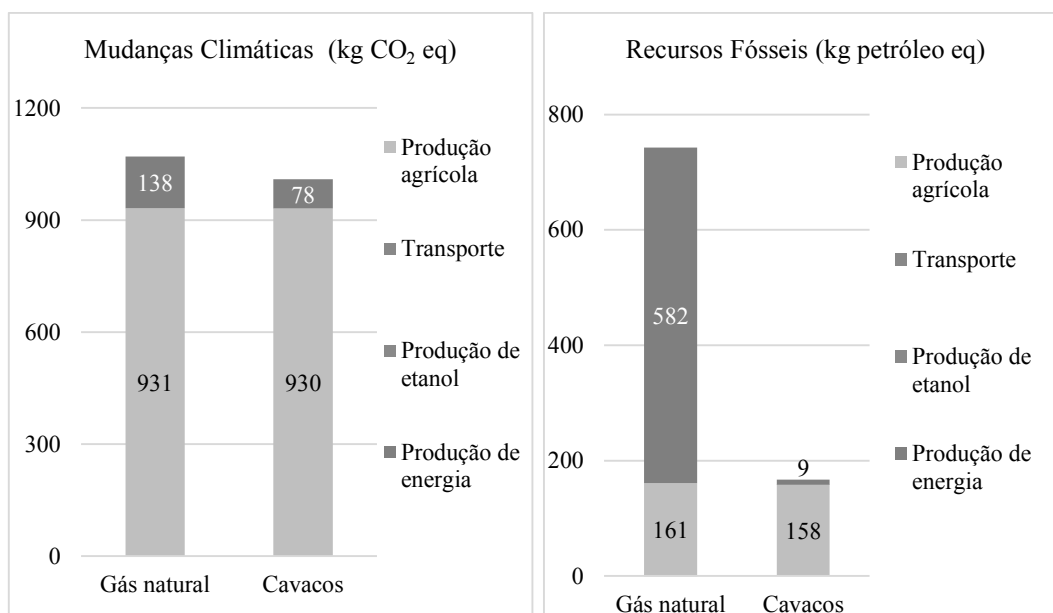


Figura 2: Resultados da AICV para as categorias de Mudanças Climáticas e Depleção de Recursos Fósseis, para a produção de etanol hidratado com gás natural ou cavaco de madeira como combustíveis

No cenário em que o Gás Natural é utilizado como combustível, para a categoria de MC, as etapas de produção agrícola e de produção de energia contribuem, respectivamente, com 87% e 13% das emissões. As emissões da etapa agrícola se dão pela substituição de áreas de Cerrado por áreas de plantio e pelas emissões de N₂O geradas pelo uso de fertilizantes nitrogenados e revolvimento do solo. As emissões da etapa de produção de energia são originadas na produção e queima do gás natural. As emissões de transporte são diminutas, pelo fato de as áreas de plantio de milho estarem situadas próximas à usina. Também as emissões da produção de etanol se limitam a emissões muito discretas de CO₂ proveniente do processo fermentativo. Para a categoria de DRF, a etapa agrícola contribui com 22% do consumo total, pois as atividades de tratores agrícolas são mecanizadas e consomem diesel, e a etapa de produção de energia contribui com 78%, já que o próprio combustível a ser queimado é um recurso fóssil. As demais etapas não geram consumos significativos.

Com a introdução do combustível renovável no processo, para a categoria MC, os resultados se assemelham aos do processo base pois, ainda que as emissões decorrentes da produção agrícola e transporte da madeira sejam incluídas, a etapa agrícola da produção do milho - etapa comum aos dois cenários - é a maior responsável por essas emissões. No entanto, a etapa de produção de energia com cavaco apresenta resultados melhores, com reduções de 56% das emissões de CO₂-eq em relação ao gás natural. Tal redução resulta diretamente num melhor desempenho geral exercido pelo processo com cavaco de madeira. O mesmo ocorre para a categoria de DRF, porém com resultados bastante destoantes. Apesar dos consumos absolutos da etapa agrícola serem muito semelhantes para os dois cenários, no processo com cavaco praticamente não há outros consumos de recursos fósseis. A etapa agrícola participa com 96% do consumo total, enquanto a etapa de produção de energia consome apenas 4% dos recursos fósseis.

Há de se destacar também que, muito embora os combustíveis sólidos tenham, tradicionalmente, menor eficiência de queima, a substituição do gás natural por cavaco culminou em um baixo



IV CONGRESSO BRASILEIRO SOBRE GESTÃO PELO CICLO DE VIDA

9 a 12 de novembro de 2014

São Bernardo do Campo – SP – Brasil



acréscimo de emissões de material particulado, gerando 4,78 kgMP₁₀/t etanol, contra os 4,2 kgMP₁₀/t etanol gerados com a queima do gás natural.

5. Conclusões

Este estudo avaliou o desempenho ambiental do processo de produção do etanol de milho, segundo as condições regionais do estado do Mato Grosso, e comparou as variações que a substituição de um combustível fóssil por um renovável pode acarretar no perfil ambiental deste processo. A primeira análise apresentou o perfil ambiental do processo base, com gás natural como combustível, e salientou as categorias de impacto de maior importância, Mudanças Climáticas e Depleção de Recursos Fósseis, direcionando a uma segunda análise para aprofundar a investigação. A segunda análise permitiu identificar que a etapa agrícola é a maior contribuidora para a categoria de Mudanças Climáticas, seguida pela etapa de produção de energia. Para a categoria de Depleção de Recursos Fósseis, as mesmas etapas contribuem, porém a produção de energia responde pelos maiores consumos, com uma pequena contribuição da etapa agrícola. Ao considerar a substituição de combustíveis para o fornecimento de energia na análise, os resultados comparativos demonstraram que o uso do cavaco de madeira melhora o desempenho do processo para as duas principais categorias de impacto. Embora as contribuições das etapas agrícolas não se diferenciem expressivamente, já que as maiores cargas dessa etapa são carregadas pela produção de milho comum aos dois cenários, as etapas de produção de energia definem o combustível renovável como o de melhor desempenho ambiental neste processo.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro concedido para a realização desse estudo, materializada por intermédio do projeto CAPES/ FCT 2012 – nº 350/13

Referências

- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). **Anuário estatístico Brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis 2013**. Rio de Janeiro: ANP, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14040: Gestão Ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida - Princípios e estrutura**. Rio de Janeiro: ABNT 2009a.
- _____. **ABNT NBR ISO 14044: Gestão Ambiental - Avaliação de ciclo de vida - Requisitos e orientações**. Rio de Janeiro: ABNT 2009b.
- DONKE, Ana Cristina Guimarães et al. Energo and exergo-environmental analysis of a multipurpose process for ethanol production from sugarcane and corn. In: International Exergy, Life Cycle Assessment, and Sustainability Workshop & Symposium, 2013, Nisyros. **Anais...** Nisyros: ECOST, 2013. p. 1.305-1.312, p. 437-448.
- MANZATTO, Celso Vainer (Org.) et al. **Zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2009. 55p.: il. (Documentos / Embrapa Solos, ISSN 1517-2627; 110)
- MILANEZ, Artur Yabe et al. A produção de etanol a partir da integração do milho safrinha a usinas de cana-de-açúcar: avaliação ambiental, econômica e sugestões de política. **Revista do BNDES**, v. 41, p. 147-207, 2014.
- NOGUEIRA, Alex Rodrigues et al. Use of Environmental and Thermodynamic Indicators to Assess the Performance of an Integrated Process for Ethanol Production. **Environment and Natural Resources Research**, v. 4, p. 59-74, 2014.