



I CONGRESSO BRASILEIRO DE MAMONA

Energia e Sustentabilidade

23 a 26 de novembro de 2004 - Campina Grande - PB

BALANÇO ENERGÉTICO DE ÉSTERES METÍLICOS E ETÍLICOS DE ÓLEO DE MAMONA*

José Adolfo de Almeida Neto¹, Rosenira Serpa da Cruz¹, Jaenes Miranda Alves¹, Mônica de Moura Pires¹, Sabine Robra¹ e Exedito Parente Jr.² (1)Grupo Bioenergia e Meio Ambiente, Universidade Estadual de Santa Cruz (UESC), Rod. Ilhéus-Itabuna km 16 s/n 45650-000 Ilhéus, BA. e-mail: jalmeida@uesc.br, (2) TECBIO/NUTEC, R. Prof. Rômulo Proença, s/n. Bloco A, Galp. 01 - Campus do Pici, 60455-700. Fortaleza, CE. e-mail: expeditojr@tecbio.com.br

RESUMO

A mamona (*Ricinus communis* L.) é uma das culturas eleitas pelos programas federal e estadual de biodiesel para fornecer matéria-prima para a produção do biodiesel, um biocombustível apontado como renovável e menos poluente que o seu concorrente fóssil, o diesel. Neste estudo, realizou-se um balanço energético com base nos princípios da ACV e da Análise *Output/Input*, comparando-se a performance energética da mamona com duas culturas tradicionais na produção do biodiesel, a colza (*Brassica napus*) na Europa e a soja (*Glycine max*) nos Estados Unidos (EUA). O balanço energético (O-I) foi positivo em ambas as rotas de produção (metílica e etílica) e independente da alternativa de alocação de uso dos coprodutos. A relação *Output/Input* (O/I) calculada para o biodiesel de mamona (1,3-2,9) foi superior ao de colza (1,2-1,9) e inferior ao de soja (3,2-3,4), independente da rota e da alocação de subproduto utilizada. Os dois indicadores sugerem a viabilidade energética e ambiental do biodiesel de mamona, desde que se garanta produtividades agrícolas elevadas (acima de 1.500 kg/ha ano). A potencialização dos efeitos ambientais e energéticos positivos depende do aproveitamento adequado dos coprodutos e resíduos do processo, da melhoria da eficiência energética no processamento da mamona e do biodiesel, e da implementação de manejos eficientes no uso dos insumos químicos (especialmente o N), responsáveis por até 65% do *INPUT* total de energia.

INTRODUÇÃO

Os combustíveis líquidos, devido ao seu alto poder calorífico e suas características positivas no manuseio, armazenamento e transporte, são formas nobres de energia de difícil substituição no curto prazo. Apesar dessa relativa supremacia dos combustíveis líquidos frente a outras formas de energia, alguns problemas comprometem a sua performance, destacando-se os diversos problemas ambientais associados ao ciclo de vida dos combustíveis fósseis; a finitude das reservas mundiais de petróleo e a distribuição desigual da localização e propriedade das reservas existentes no globo (UBA, 1999).

Dentre as alternativas numa transição de paradigma energético, destacam-se os biocombustíveis líquidos: os álcoois, derivados da cana-de-açúcar, da beterraba açucareira, do milho ou trigo, em motores ciclo Otto e os óleos vegetais modificados ou não em motores ciclo Diesel.

No Brasil, os governos federal, através de uma Comissão Interministerial da Casa Civil, e o estadual, através do Programa de Biodiesel da Bahia, articulam ações para o uso de óleos vegetais na



I CONGRESSO BRASILEIRO DE MAMONA

Energia e Sustentabilidade

23 a 26 de novembro de 2004 - Campina Grande - PB

produção de um substituto parcial para o diesel de petróleo, o biodiesel¹. O marco legal prevê a adição não obrigatória de 2% de biodiesel a partir de 2005 e de 5% até 2007. Tanto em nível federal quanto estadual, a principal matéria-prima indicada no Programa é a mamona², cultura tradicional adaptada às condições edafoclimáticas do semi-árido nordestino e que, portanto, deve estar associada à geração de emprego e renda numa das regiões com menores índices de desenvolvimento socioeconômico do país.

Estudos ambientais recentes questionam esta associação direta dos biocombustíveis com o “ecologicamente correto” ou “ambientalmente amigável” (UBA, 1999). A discussão da sustentabilidade ecológica na produção e uso de um biocombustível deve considerar aspectos específicos, destacando-se entre eles: o monitoramento de toda a cadeia de produção do biocombustível (cultivo, processamento, uso/conversão e destinação dos resíduos), limites da capacidade de regeneração dos recursos naturais (solo, água etc.), de tal modo que a taxa de utilização não supere a de renovação e possíveis conflitos e concorrências no uso das matérias-primas e recursos naturais utilizados na produção do biocombustível, como por exemplo o conflito entre produção de alimentos *versus* produção de energia.

A relação entre a energia investida na produção de um combustível (*Input*) e a energia obtida na sua combustão (*Output*) é um indicador importante na viabilidade econômica e ambiental de um processo. Estudos apontam que as emissões específicas de CO₂ (gCO₂/MJ) são inversamente proporcionais ao valor da relação *Output/Input* (O/I) para os biocombustíveis (SCHARMER et al., 1996).

Neste trabalho, estudou-se o gasto de energia ao longo do ciclo de vida do biodiesel de mamona etílico (BME) e metílico (BMM), o balanço energético *Output-Input* (O-I) e a relação O/I, comparando com os resultados obtidos para o biodiesel metílico de soja (SME) nos EUA (SHEEHAN et al., 1998) e o biodiesel metílico de colza (RME) na Europa (UBA, 1999).

MATERIAL E MÉTODOS

O balanço energético para um sistema de produção de biocombustíveis pode ser definido como a diferença entre a energia consumida por unidade de área (*Input/ha*) e a energia produzida por unidade de área (*Output/ha*). Neste estudo utilizou-se uma combinação entre os princípios da ACV³ e da Análise *Input-Output*⁴ energética na realização do balanço energético (ANGGRAINI-SÜß, 1999). A

¹ O biodiesel é definido como sendo os ésteres metílicos ou etílicos de ácidos graxos, produzidos a partir da transesterificação de óleos e gorduras vegetais ou animais, conhecidos por triglicerídeos.

² O governo federal tem como meta a produção de 40% de biodiesel da mistura B-2 a partir da mamona, o que representa uma área adicional de 540.000 ha, tomando-se como base uma produtividade agrícola de 1080 kg de baga por ha (cálculos do autor a partir de estimativas de produtividade pela EBDA).

³ Análise do Ciclo de Vida, conhecida também como análise do “berço ao túmulo”, em inglês *Life Cycle Analysis* (LCA),

⁴ Análise *Input-Output* energética é uma extensão da *Input-Output Analysis* econômica (Anggraini-Süß, 1999) p.41.



I CONGRESSO BRASILEIRO DE MAMONA

Energia e Sustentabilidade

23 a 26 de novembro de 2004 - Campina Grande - PB

fronteira do sistema para o biodiesel inicia na produção agrícola e vai até a oferta do biodiesel.

O *Input* no sistema pode ser dividido em:

- energia direta: é a energia consumida na forma de combustíveis fósseis, eletricidade, vapor e lenha na cadeia de produção dos combustíveis. É calculada a partir da energia primária fóssil consumida na sua produção (etanol e eletricidade) ou do Poder Calorífico Inferior (PCI) para os demais combustíveis, - indireta: é a energia consumida na forma de insumos agrícolas, equipamentos, máquinas, prédios e transporte, sendo estimada através do consumo de energia fóssil na produção de cada produto, - energia de transporte: energia empregada no transporte das matérias-primas e do produto final, sendo estimada a partir da distância, da carga transportada e do consumo de combustível.

O *Output* é obtido a partir da energia contida no produto final e nos coprodutos ou resíduos do processo, sendo calculado com base no seu uso final (alimentação, adubo e combustível). Como alimento é baseada na energia metabólica do produto, como adubo no consumo de energia fóssil na cadeia do produto substituído e como combustível no seu PCI.

O Quadro 1 apresenta os valores para o consumo energético de diversos produtos utilizados para o cálculo do *Input* e *Output* no ciclo de vida do biodiesel etílico e metílico de mamona.

Quadro 1. Valores médios de consumo energético e PCI de diferentes insumos e produtos

Item	Consumo energético	Unidade
1. Semente de Mamona	5,69	MJ/kg
2. Adubos e corretivos		
- Uréia	60,00	MJ/kg N
- Superfostato simples	12,00	MJ/kg P ₂ O ₅
- Cloreto de potássio	6,00	MJ/kg K ₂ O
- Calcáreo	2,00	MJ/kg CaO
3. Herbicida	455,00	MJ/kg produto
4. Metanol	19,70	MJ/kg a 0,79 g/cm ³
5. Etanol ¹	2,91	MJ/kg, PCI de 26,80 MJ/kg a 0,79 g/cm ³
6. Hexano	6,70	MJ/kg
7. Diesel	50,20	MJ/kg, PCI de 42,50 MJ/kg a 0,84 g/cm ³
8. Caminhão diesel 15,0 T	0,43	MJ/kg baga transportada de 250 km dist.
9. Torta de mamona magra		
- Uso como combustível	17,6	MJ/kg com < 1,5% óleo
- Uso como ração ²	11,5	umidade de 12% m
- Uso como adubo	4,6	
10. Óleo de mamona centrif. e filtrado	39,50	MJ/kg a 0,96 g/cm ³
11. Éster metílico de mamona	39,60	MJ/kg a 0,89 g/cm ³
12. Éster etílico de mamona	39,80	MJ/kg a 0,89 g/cm ³
13. Glicerina residual		
- Uso como combustível	18,05	MJ/kg a 1,26 g/cm ³
- Uso como ração ^{**}	0,42	e <0,4% m metanol
14. Energia elétrica (ref. 92% hidreletricidade)	0,29 (3,60)	MJ/KWh
15. Catalisador (KOH)	4,41	MJ/kg
16. Ácido fosfórico	8,20	MJ/kg
17. Trator 2 X 4 de 90 hp	69,00	MJ/kg

Fonte : ANGGRAINI, A. A. et al. 1998, MACEDO, 1997 e dados da pesquisa.

¹o consumo energético para o etanol foi estimado com base na relação O/I 9,2:1 ² após remoção de componentes tóxicos.

Para avaliar a eficiência da substituição de energia fóssil por energia renovável na adoção do biodiesel, calculou-se a relação (O/I) e comparou-se com os resultados obtidos para o SME e RME.



I CONGRESSO BRASILEIRO DE MAMONA

Energia e Sustentabilidade

23 a 26 de novembro de 2004 - Campina Grande - PB

Três possíveis cenários para o sistema de produção agrícola combinados com três alternativas de aproveitamento dos coprodutos foram analisados. O *cenário padrão* de cultivo solteiro, baseado na orientação de plantio e estimativas de produção da EBDA para o estado da Bahia (1800 kg de baga/ha), um *cenário de alta produtividade* (3.000 kg/ha) e um *cenário de consórcio* com feijão (1500 kg/ha). As alocações de uso para os coprodutos foram: uso energético, na ração animal e como adubo orgânico.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas Tabelas 1 e 2 nota-se que o maior consumo de energia na produção do biodiesel se dá na etapa agrícola, com cerca de 75% do *Input* total de energia, independente da rota utilizada. Apesar de a rota etílica reduzir em aproximadamente 34% o *Input* na etapa de produção do biodiesel (Tabela 1), a diferença entre *Input* total de energia no ciclo de vida do BMM (24,69 GJ/ha) e do BME (23,82 GJ/ha) foi de apenas 4% a favor do segundo. O balanço energético (O-I) é positivo para ambas as rotas em todas as alternativas de alocação dos coprodutos propostas, atingindo na alternativa mais favorável de alocação 23,32 e 25,27 GJ/ha ano para as rotas metílica e etílica, respectivamente.

Tabela 1. Balanço energético na produção de ésteres metílicos de mamona por ha, para o *cenário padrão*

No.	Etapa	Energia consumida (GJ)		Energia produzida (GJ)						O/I	
		por etapa	acumulado	Produto principal	Qtde (T)	Energia (GJ)	Coproduto	Qtde (T)	Energia (GJ)		Alocação de coprodutos
1	Agrícola e transporte ¹	18,48	18,48	Baga	1,8	49,9	---	---	---	---	2,70
2	Esmagamento e refino ²	3,67	22,15	Óleo Nr. 1	0,77	30,57	Torta de Mamona	0,95	16,79	Combustível	2,14
									10,97	Ração	1,88
3	Produção biodiesel ³	2,54	24,69	Ésteres Metílicos	0,74	29,33	Glicerina + AGL	0,10	4,39	Adubo	1,58
									0,00	Sem aproveitamento	1,38
									1,89	Combustível	1,26
									0,04	Ração	1,19
									0,00	Sem aproveitamento	1,19

Fonte : ¹EBDA (considerada produtividade da baga sem casca), ²BOMBRASIL/BRASWEY/ECOTECH, ³TECBIO

Tabela 2. Balanço energético na produção de ésteres etílicos de mamona por ha, para o *cenário padrão*

No.	Etapa	Energia consumida (GJ)		Energia produzida (GJ)						O/I	
		por etapa	acumulado	Produto principal	Qtde (T)	Energia (GJ)	Sub-produto	Qtde (T)	Energia (GJ)		Alocação de coprodutos
1	Agrícola e transporte*	18,48	18,48	Baga	1,8	49,9	---	---	---	---	2,70
2	Esmagamento e refino**	3,67	22,15	Óleo Nr. 1	0,77	30,57	Torta de Mamona	0,95	16,79	Combustível	2,14
									10,97	Ração	1,88
3	Produção biodiesel****	1,67	23,82	Ésteres etílicos	0,75	29,96	Glicerina + AGL	0,13	4,39	Adubo	1,58
									0,00	Sem aproveitamento	1,38
									2,34	Combustível	1,36
									0,05	Ração	1,26
									0,00	Sem aproveitamento	1,26

Fonte : ¹EBDA (considerada produtividade da baga sem casca), ²BOMBRASIL/BRASWEY/ECOTECH, ³TECBIO

A relação O/I para um biocombustível indica a sua eficiência na substituição de energia fóssil, ou seja, quanto > 1, mais energia renovável é obtida por unidade de energia fóssil investida na produção do biocombustível. Para o diesel, a relação O/I indica que cada unidade de energia fóssil utilizada no ciclo de vida do diesel produz entre 0,83-0,85 unidades de energia útil em combustível.



I CONGRESSO BRASILEIRO DE MAMONA

Energia e Sustentabilidade

23 a 26 de novembro de 2004 - Campina Grande - PB



I CONGRESSO BRASILEIRO DE MAMONA

Energia e Sustentabilidade

23 a 26 de novembro de 2004 - Campina Grande - PB

Tabela 3. Relação (O/I) e produtividade em biodiesel/ha para diferentes matérias-primas e rotas
Combustível, matérias-primas e rotas
O/I
Produt. Óleo (L/ha)

Biodiesel de colza, rota metilica/Europa¹
1,2-1,9
1000-1200

Biodiesel de soja, rota metilica/EUA²
3,2-3,4
350-500

Biodiesel de mamona, rota metilica/BR
2,0-2,7
700-1300³

Biodiesel de mamona, rota etilica/BR
2,1-2,9
700-1300³

Biodiesel de OGR, metilica/UESC⁴
5,0-5,5

Diesel de Petróleo¹
0,83-0,85

Fonte: ¹Dados da EU (UBA, 1999); ²Dados para os EUA (SHEEHAN, 1998); ³Com base na produtividade agrícola nos três cenários propostos e rendimento em biodiesel de 43%. ⁴Valores para os Óleos e Gorduras Residuais da UESC.

A alocação do uso dos coprodutos é um fator determinante no valor da relação (O/I). Com a alternativa de uso energético dos coprodutos, por exemplo, aumenta-se a eficiência na substituição da energia fóssil em 43%, em comparação com a alternativa de não aproveitamento dos coprodutos.

Comparando os processos comerciais de produção de biodiesel a partir da mamona no Brasil com o RME na Europa, o primeiro foi mais eficiente na substituição de energia fóssil por renovável, porém, menos eficiente que o SME nos EUA (Tabela 3). O menor uso de adubos nitrogenados na etapa agrícola do SME, é a principal razão para a sua melhor performance na eficiência de substituição de energia fóssil por renovável, quando comparado ao RME, ao BMM e ao BME. No caso do biodiesel de OGR, encontrou-se o maior valor para a relação O/I, pois não há gastos de energia na produção da matéria-prima do biodiesel, dado que o *Input* da etapa agrícola de produção do óleo foi debitado na conta do seu primeiro uso como óleo de fritura de alimentos.

CONCLUSÕES

Os valores do balanço energético, O-I e da relação O/I encontrados para o BMM e BME são equivalentes aos indicadores energéticos encontrados para o biodiesel produzido a partir das duas principais culturas em nível mundial, a colza na Europa e a soja nos EUA. A possibilidade de uso de terras marginais e de menor concorrência no uso dos recursos naturais empregados na produção de



I CONGRESSO BRASILEIRO DE MAMONA

Energia e Sustentabilidade

23 a 26 de novembro de 2004 - Campina Grande - PB

alimentos são pontos favoráveis ao aproveitamento energético da mamona. Os desafios para alcançar sustentabilidade ambiental e econômica desta alternativa energética referem-se a: assegurar altos índices de produtividade agrícola (a partir de 1.500 kg de baga/ha), com variedades adaptadas e manejos adequados às condições edafoclimáticas do semi-árido e desenvolver manejos econômicos no uso do nitrogênio sintético, o principal fator limitante da eficiência energética do sistema.

* os autores agradecem o apoio da SECTI, da FAPESB e das empresas parceiras ECOTECH, BRASWEY e BOMBRASIL

REFERÊNCIAS

ANGGRAINI-Süß, A.A. **Wiederverwertung von gebrauchten Speiseölen/-fetten im energetisch-technischen Bereich.** Düsseldorf, VDI Verlag, 1999, p. 40-49. (Fort. Ber. Série 15, n. 219)

MACEDO, I. **Greenhouse Gas Emissions and Bio-Ethanol Production/Utilization in Brazil.** Piracicaba : Centro de Tecnologia Copersucar, 1997. (Relatório Interno CTC-05/97)

SCHARMER, K. et al. **Energy balance, ecological impact and economics of vegetable oil methylester production in Europe.** S.l., s.n. 1996. 96p. (Relatório de projeto. ALTENER CONTRACT)

SHEEHAN et. al. **An Overview of Biodiesel and Petroleum Diesel Life Cycles.** s.n.t. p. 14-24. (Relatório NREL/TP 580-24772, Golden EUA)

UBA (Ed.) **Aktuelle Bewertung des Einsatzes von Rapsöl/RME in Vergleich zu Dieselkraftstoff.** Umweltbundesamt-Texto 79/99. Berlin, 1999, p.17-24.