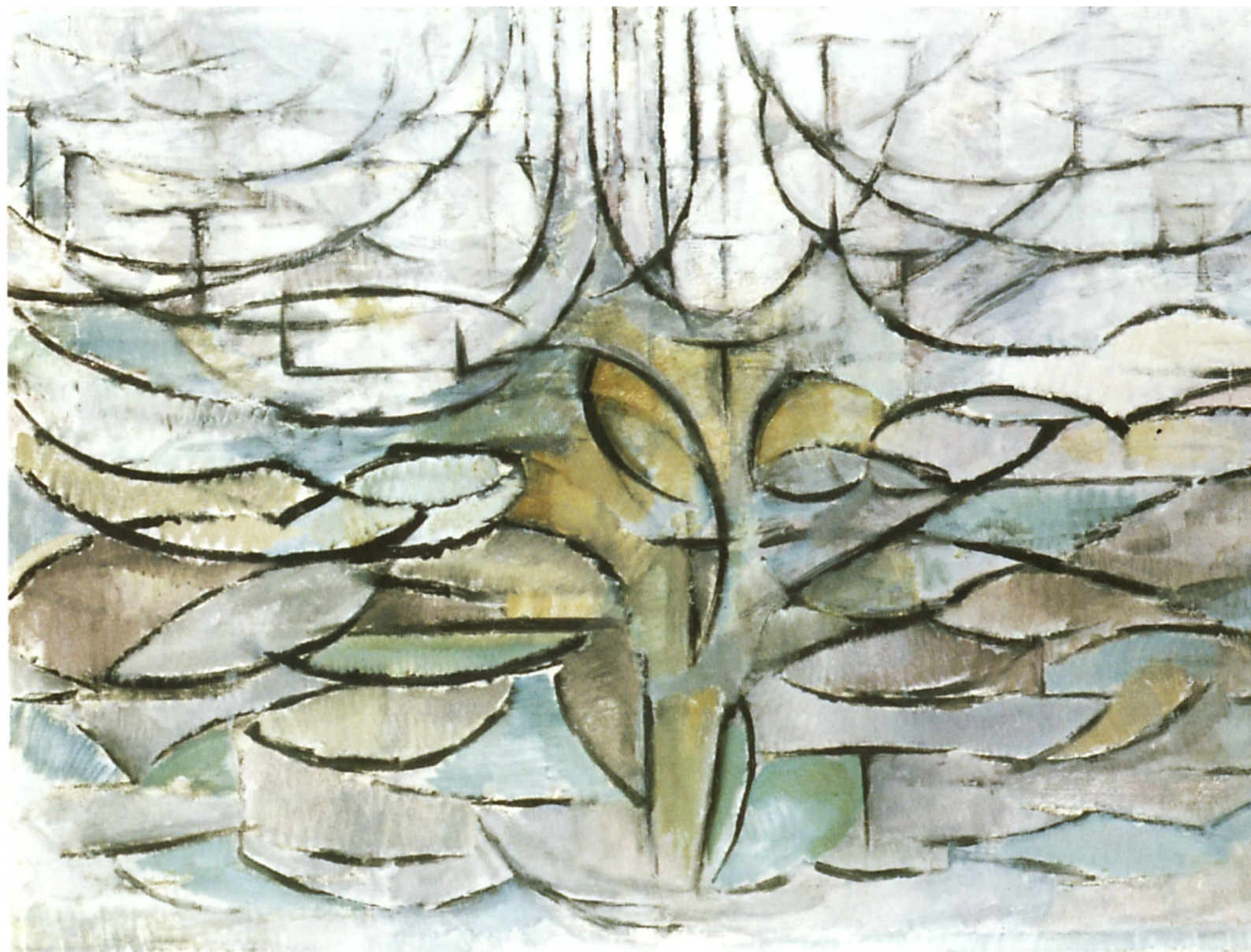


Estudos recentes e perspectivas da viabilidade técnico-econômica da produção de biodiesel



**Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Agroenergia
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**

Documentos 08

Estudos recentes e perspectivas da viabilidade técnico-econômica da produção de biodiesel

Alice Medeiros de Lima

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Agroenergia

Parque Estação Biológica, PqEB s/n, Brasília, DF

Fone: (61) 3448-4246

Fax: (61) 3448-1589

www.cnepae.embrapa.br

sac@cnepae.embrapa.br

Comitê de Publicações da Unidade

Presidente: José Manuel Cabral de Sousa Dias

Secretária-Executiva: Anna Leticia M. T. Pighinelli

Membros: Alice Medeiros de Lima, Larissa Andreani, Leonardo Fonseca Valadares.

Supervisão editorial: José Manuel Cabral de Sousa Dias

Revisão de texto: José Manuel Cabral de Sousa Dias

Normalização bibliográfica: Maria Iara Pereira Machado

Tratamento de ilustrações:

Editoração eletrônica: Maria Goreti Braga dos Santos

Foto(s) da capa:

1ª edição - 2011

Todos os direitos reservados

A reprodução não-autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Embrapa Agroenergia**

L 732 Lima, Alice Medeiros de

Estudos recentes e perspectivas da viabilidade técnico-econômica da produção de biodiesel / Alice Medeiros de Lima. – Brasília, DF: Embrapa Agroenergia, 2012.

23 p. – Documentos / Embrapa Agroenergia, ISSN 2177-4439; 08).

1. Biodiesel – produção- custos. 2. Biodiesel – matérias-primas. 3. Energia – fontes renováveis. 4. Biocombustível. 5. Revisão de literatura. I. Título. II. Série.

333.79 – CDD 22.

© Embrapa 2011

Autora

Alice Medeiros de Lima

Engenheira Química, mestre em Engenharia Química, analista da Embrapa Agroenergia, Brasília, DF, alice.lima@embrapa.br

Apresentação

Motivada por questões ambientais, a busca por fontes renováveis de energia tem crescido em todo o mundo. Nesse cenário, o biodiesel surge como um biocombustível potencial. Entretanto, sua produção encontra algumas limitações, como o elevado custo de processamento e a sustentabilidade da matéria-prima. Assim, o objetivo deste artigo é fazer uma revisão da literatura sobre os custos da produção de biodiesel a partir de diversas matérias-primas.

A partir do levantamento dos custos de produção de biodiesel pode-se concluir que eles são bastante elevados quando comparados aos custos de produção do óleo diesel a partir de matéria-prima fóssil. Tal fato indica que muitos esforços para viabilização da produção do biodiesel em escala industrial devem ser aplicados.

De acordo com a literatura, a maior parte dos custos associados à produção de biodiesel é a matéria-prima, podendo chegar a 88%. Outros fatores que podem influenciar são a capacidade de processamento, a localização, a forma como o óleo para processamento é obtido (produção própria, compra de grãos ou de óleo) e a tecnologia de processamento (rota metélica ou etélica, catalisadores ácidos, básicos, sólidos ou biológicos, além do processo supercrítico).

Manoel Teixeira Souza Júnior
Chefe-Geral

Sumário

Introdução	9
Estudos recentes	9
Transesterificação	11
Ácida e Alcalina	11
Enzimática	13
Supercrítica	14
Estudos brasileiros	17
Perspectivas e conclusões	19
Referências	22

Estudos recentes e perspectivas da viabilidade técnico-econômica da produção de biodiesel

Alice Medeiros de Lima

Introdução

Devido ao agravamento dos problemas ambientais gerados pelo aumento das emissões de gases poluentes nos últimos anos cresce em todo o mundo a busca por matérias-primas renováveis, bem como por fontes alternativas de energia. Uma das iniciativas brasileiras inclui a produção de biodiesel, a partir do Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB). Além disso, a legislação vigente estabelece a adição de 5% de biodiesel ao diesel comercializado em todo país.

O biodiesel pode ser produzido a partir de óleos vegetais, saturados ou de gorduras animais. No Brasil, há diversas matérias-primas potenciais para produção de biodiesel: soja, girassol, algodão, mamona, dendê, pinhão-mansão, macaúba, amendoim, canola, babaçu, buriti, óleos residuais, dentre várias outras. A rota tecnológica para produção de biodiesel por transesterificação está bem estabelecida, outras (esterificação, reação supercrítica, rota enzimática) no estágio inicial de desenvolvimento.

Um passo decisivo para a utilização dessas tecnologias para produção industrial é o estudo de viabilidade técnico-econômica. Aplicando-se esta metodologia juntamente com a simulação de processos, é possível analisar diferentes cenários e avaliar a produtividade, consumo de matérias-primas, competitividade econômica e os impactos ambientais de cada processo. E assim, definir estratégias para implementação de determinada rota tecnológica ou para utilização de certa matéria-prima em diferentes regiões do país.

Este artigo tem o objetivo de levantar por meio da revisão da literatura os custos de produção de biodiesel a partir de diversas matérias-primas, tanto no Brasil, como em outros países produtores de biodiesel.

Estudos recentes

Independente do processo tecnológico adotado, a maior contribuição para os custos de produção do biodiesel é o custo da matéria-prima (ENGUÍDANOS et al., 2002). Segundo Van Kasteren e Nisworo (2007) os fatores de sensibilidade para a viabilidade econômica são: a matéria-prima, a capacidade da planta e o preço do glicerol.

O biodiesel pode ser obtido por três rotas de produção: (i) transesterificação; (ii) esterificação e (iii) craqueamento. A transesterificação pode ser catalisada por ácidos, bases, enzimas ou ocorrer sem a presença de catalisadores (supercrítica). O processo de esterificação é catalisado geralmente por ácidos inorgânicos. Nessa rota, produz-se éster e água a partir da reação de um ácido carboxílico com o álcool. No craqueamento, o processo ocorre em altas temperaturas (a partir de 350°C) para

quebra das moléculas do óleo em presença de um catalisador para remoção dos compostos oxigenados (MENANI, 2008). O craqueamento pode ser viável em pequenas localidades. Atualmente, a rota de transesterificação catalisada por bases é a mais utilizada e viável economicamente.

Na sequência apresenta-se uma breve revisão bibliográfica sobre os custos de produção de biodiesel no Brasil e no mundo. Os estudos estão separados por tipo de processo de transesterificação (ácida/alcalina, enzimática e supercrítica), seguidos pelos estudos brasileiros. Não foram localizados estudos de avaliação técnico-econômica da produção de biodiesel pelas outras rotas (esterificação e craqueamento).

O custo de produção do biodiesel geralmente é de 1,5 a 3 vezes maior que o custo do diesel obtido por matéria-prima fóssil (ENGUÍDANOS et al., 2002).

Johnston e Holloway (2007) levantaram os custos de produção do biodiesel em 226 países utilizando dados econômicos, ambientais e energéticos. Como resultado obtiveram mapeamentos do potencial de produção de biodiesel e do custo de produção do biodiesel, mostrados nas Figuras 1 e 2. Segundo a ANP, a produção anual de biodiesel brasileira no ano de 2010 foi de $2,4 \cdot 10^6$ L (AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS, 2011), assim baseando-se neste panorama (Figura 1; JOHNSTON; HOLLOWAY, 2007), o Brasil tem grande potencial para ser um dos maiores produtores mundiais de biodiesel (até $15 \cdot 10^6$ L), com um dos menores custos produtivos, podendo chegar em US\$ $0,29 \cdot L^{-1}$. De acordo com o levantamento feito pelos autores (JOHNSTON; HOLLOWAY, 2007) a dependência média de matéria-prima nos países estudados para produção de biodiesel é de 28% de soja, 22% de palma, 20% de gorduras animais, 11% de coco, 5% de colza, 5% de girassol, 5% de oliva, e 4% para as demais matérias-primas.

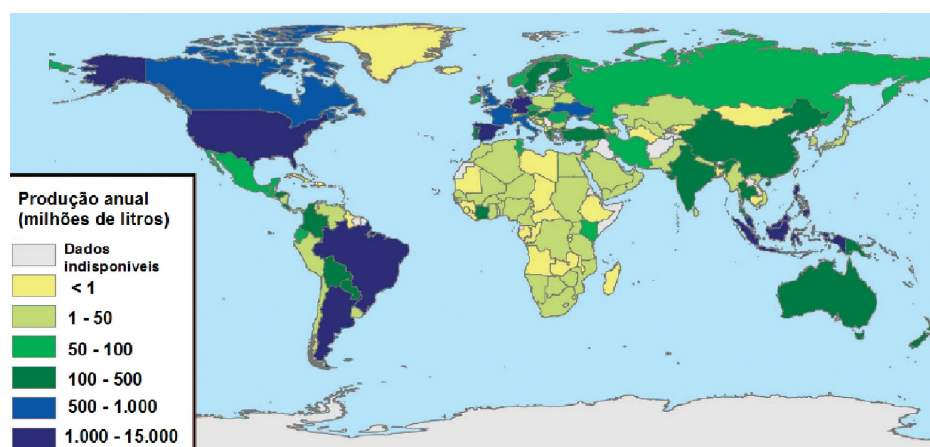


Figura 1. Mapeamento do potencial mundial para produção de biodiesel (JOHNSTON; HOLLOWAY, 2007).

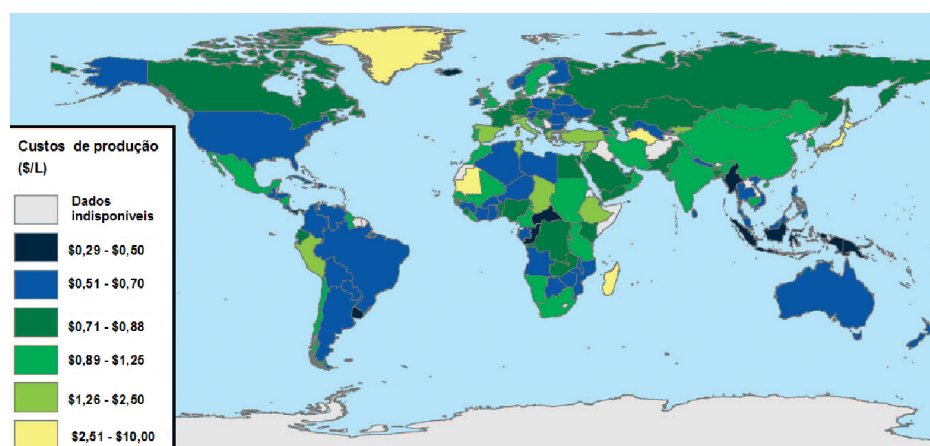


Figura 2. Mapeamento dos custos da produção de biodiesel (JOHNSTON; HOLLOWAY, 2007).

Transesterificação

O processo de transesterificação pode ocorrer com o uso de catalisadores ácidos, alcalinos, enzimáticos ou sem catalisador (processo supercrítico) utilizando-se metanol ou etanol para reagir com o óleo. A reação mostrada na Figura 3 ilustra a reação de transesterificação.

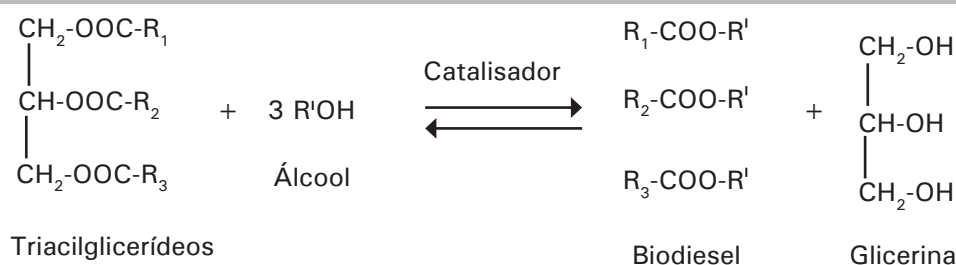


Figura 3. Reação de transesterificação.

O processo de transesterificação utilizando-se catalisador alcalino e metanol é o processo utilizado comercialmente. A rota etílica tem sido levantada como potencial no Brasil devido à tradição na produção do etanol e a sua natureza renovável, além dos benefícios ambientais oriundos da troca do metanol pelo etanol. O processo pela rota etílica apresenta algumas desvantagens técnicas em relação à rota metílica como taxa de reação mais lenta e menor rendimento.

Ácida e Alcalina

Uma limitação do processo catalisado por álcalis é a sensibilidade à pureza dos reagentes, o sistema é muito sensível à presença de água e ácidos graxos. A presença de água pode causar saponificação do éster sob condições alcalinas e os ácidos graxos produzem sabão e água. A saponificação não só consome o catalisador alcalino, como também ajuda na formação de emulsões que dificultam o processo de separação e purificação do biodiesel (ZHANG et al., 2003). Por estas razões, recomenda-se o pré-tratamento para reduzir a quantidade de ácidos graxos livres pela reação de esterificação com metanol na presença de ácido sulfúrico como catalisador (LEPPER; FRIESENHAGEN, 1986 citado por ZHANG et al., 2003). Um fluxograma típico do processo de transesterificação utilizando-se metanol e catalisador alcalino é mostrado na Figura 4.

O processo catalisado por ácidos é insensível à presença de ácidos graxos na alimentação, logo a etapa de pré-tratamento é desnecessária, entretanto o processo não tem sido aplicado devido às baixas taxas de reação (ZHANG et al., 2003).

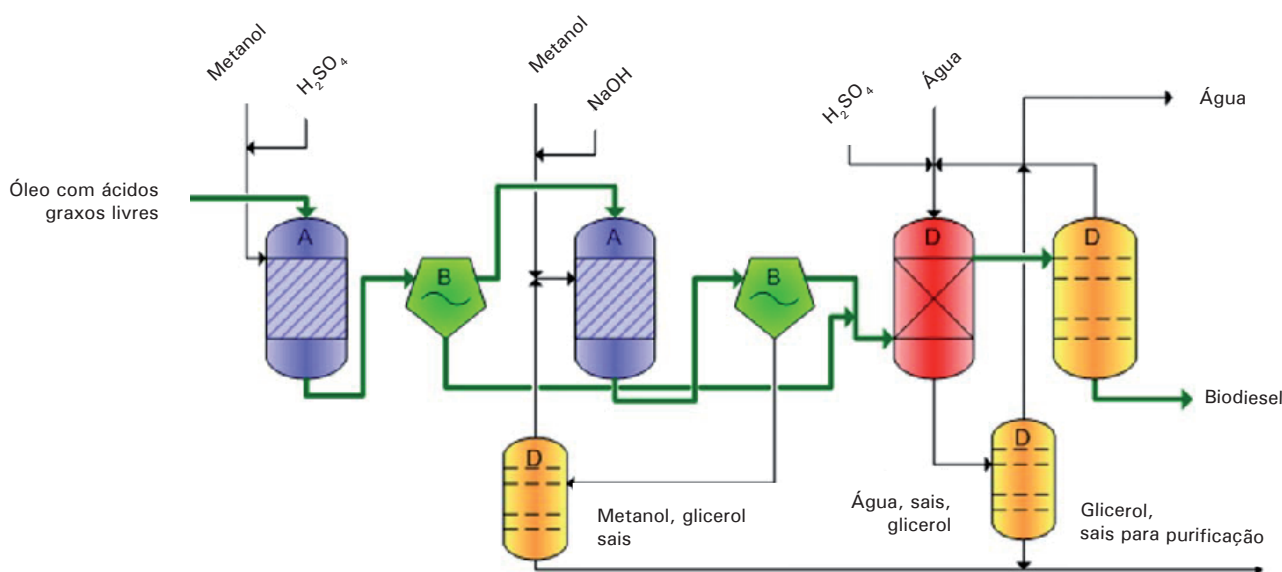


Figura 4. Fluxograma do processo de transesterificação tradicional com pré-tratamento e catálise alcalina. (A) Reator, (B) Separação (centrifugação ou decantação), (D) Purificação do produto ou recuperação do álcool.

Fonte: Adaptado de Fjerbaek et al. (2009).

Na sequência estão alguns estudos recentes da viabilidade técnico-econômica da produção de biodiesel no mundo.

Enguídanos et al. (2002) reporta a produção de biodiesel a partir da semente de colza (€0,214.kg⁻¹) na Europa a partir da transesterificação com etanol utilizando-se um catalisador básico. A semente de colza foi utilizada no estudo devido ao maior rendimento por hectare quando comparado com o rendimento do girassol, além do que a produção de colza não compete com a produção de alimentos. Adotou-se que para cada litro de biodiesel produzido é necessário 2,23 kg de semente de colza, sendo que o custo do biodiesel é de €0,557.L⁻¹. Os autores (ENGUIÐANOS et al., 2002) apontam que a substituição de 1 litro de diesel fóssil por 1,1 litro de biodiesel evita a emissão de 2,8 kg de CO₂, fato que contribui para a sustentabilidade ambiental do processo.

Radich (2011) projetou os custos de produção de biodiesel a partir de óleo de soja, gordura animal e petróleo nos EUA. Concordando com outros trabalhos (ENGUIÐANOS et al., 2002; HAAS et al., 2006), grande parte dos custos está associada à matéria-prima utilizada. A Tabela 2 mostra as estimativas feitas para o custo de produção de biodiesel a partir das diferentes matérias-primas (soja, gordura animal e petróleo) ao longo do tempo (2004 – 2013). As projeções mostradas na Tabela 1 foram baseadas no processo de transesterificação alcalina (catalisado por hidróxido de sódio) utilizando-se metanol.

Haas et al. (2006) propôs um modelo para estimar os custos de produção do biodiesel a partir de óleos vegetais para uma planta localizada nos EUA. O autor utilizou os softwares AspenPlus[®] e ChemCost[®] para simulação do processo e cálculo dos custos com equipamentos, respectivamente. O cenário simulado opera com óleo de soja e metanol, utilizando o metóxido de sódio como catalisador, contém uma unidade de transesterificação, uma seção de purificação do biodiesel e outra para recuperação do glicerol. Enquanto que o custo de produção do diesel fóssil variou entre US\$0,20.L⁻¹ e US\$0,25.L⁻¹, o custo final estimado para produção de biodiesel foi de US\$0,53.L⁻¹, sendo que 88% destes custos estão associados à matéria-prima. Segundo Haas et al. (2006), este valor pode ser reduzido em 6% com a venda do glicerol.

Weber e Van Dyne (1998) fizeram um estudo do custo de produção de biodiesel a partir de diferentes matérias-primas nos EUA. Foram feitas diversas simulações para o cenário estudado com capacidade de processamento de 130.000 L, assumindo-se uma planta convencional para produção de biodiesel (metanol e catálise alcalina). A Tabela 2 mostra os resultados encontrados pelos autores.

Tabela 1. Projeção dos custos de produção do biodiesel (US\$.L⁻¹) nos USA a partir de diferentes matérias-primas (soja, gordura animal e petróleo).

Ano	Soja	Gordura animal	Petróleo
2004/05	0,67	0,37	0,18
2005/06	0,66	0,36	0,21
2006/07	0,65	0,36	0,2
2007/08	0,64	0,36	0,21
2008/09	0,66	0,37	0,21
2009/10	0,68	0,37	0,19
2010/11	0,7	0,38	0,2
2011/12	0,72	0,39	0,2
2012/13	0,74	0,41	0,19

Fonte: Energy Information Administration, Office of Integrated Analysis and Forecasting *apud* Radich (2011).

Tabela 2. Custos de produção do biodiesel (US\$/L) nos USA.

Matéria-prima	Custo (US\$.L ⁻¹)
Soja	0,33
Canola	0,42
Gordura animal	0,48
Girassol	0,65

Fonte: Weber e Van Dyne (1998).

Apostolakou et al. (2009) reportaram um estudo da viabilidade técnico-econômica da produção de biodiesel na Grécia a partir da semente de colza, utilizando o catalisador alcalino convencional e metanol. Usou-se o software Hysys® para simulação de uma planta com capacidade de 50.000 t.ano⁻¹. Para o cenário estudado, encontrou-se um custo de US\$1,15.L⁻¹ de biodiesel, sendo que 75% deste valor está associado a matéria-prima. Concluíram que um fator importante na viabilidade econômica é a escala, que deve variar de 50.000 - 80.000 t.ano⁻¹.

Kiss et al. (2010) compararam o custo de produção do biodiesel a partir da semente de colza com dois catalisadores distintos (homogêneo e heterogêneo). O processo heterogêneo apresentou algumas vantagens, como: alto rendimento de biodiesel, alta pureza da glicerina e baixos custos do catalisador e de manutenção. Os autores (KISS et al., 2010) apontam que a competitividade econômica (com catalisador heterogêneo) depende da diminuição do consumo energético. Segundo a estimativa dos autores, uma planta industrial utilizando catalisador heterogêneo tem o custo reduzido em 40 - 60% quando comparado com a operação com catalisador homogêneo.

Enzimática

A transesterificação enzimática, ao contrário da alcalina, não forma sabões e pode esterificar tanto os ácidos graxos quanto os triglicerídeos em uma única etapa, sem necessidade de uma etapa posterior de lavagem (FJERBAEK et al., 2009). Assim, a prospecção de enzimas que possibilitem a aplicação industrial é de grande importância devido a redução de custos. De acordo com Fjerbaek et al. (2009), o uso de catalisadores enzimáticos tem as seguintes vantagens:

- (i) Maior compatibilidade com uma ampla variedade de matérias-primas, inclusive materiais usados.
- (ii) Permite a produção de biodiesel em poucas etapas utilizando menos energia e com uma redução drástica do consumo de água.
- (iii) Melhoria na separação do produto e aumento do rendimento e da qualidade do glicerol.

Entretanto, o processo também apresenta algumas desvantagens:

- (i) Baixa taxa de reação (ZHANG et al., 2003).
- (ii) Alto custo das enzimas quando comparado ao catalisador alcalino (FUKUDA et al., 2001).
- (iii) Baixa atividade catalítica (FJERBAEK et al., 2009).

Um fluxograma do processo de produção de biodiesel ideal através da transesterificação enzimática é mostrada na Figura 5, e inclui as etapas de reação, separação e filtração.

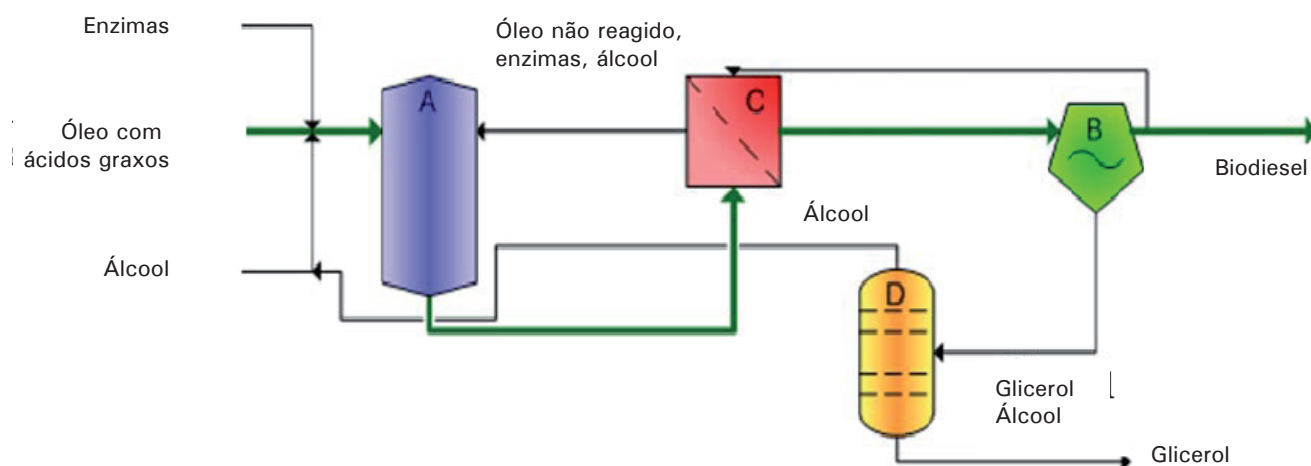


Figura 5. Processo "ideal" de produção de biodiesel através da transesterificação enzimática. (A) Reator, (B, D) Separação, (C) Filtro. Fonte: Adaptado de Fjerbaek et al. (2009).

Jegannathan et al. (2011) efetuaram o estudo da viabilidade técnico-econômica da produção de biodiesel a partir do óleo de palma na Índia, adotando o processo batelada com uma capacidade de 10.000 t. O custo de produção levantado foi de US\$1,38.L⁻¹ utilizando-se catalisador alcalino, US\$2,87.L⁻¹ usando-se enzimas imobilizadas e de US\$9,31.L⁻¹ com enzimas solúveis. O custo de produção usando-se enzimas imobilizadas foi menor que o das enzimas solúveis devido àquelas permitirem reuso. Os autores apontam que o melhoramento das características que favoreçam o reuso das enzimas pode tornar o processo biocatalítico competitivo economicamente frente ao processo alcalino.

Sotoft et al. (2010) fizeram o estudo de viabilidade econômica da produção de biodiesel pela via enzimática para uma planta localizada na Europa com capacidade de produção de biodiesel de 8.10⁶ kg.ano⁻¹ e de 200.10⁶ kg.ano⁻¹ utilizando óleo de semente de colza. Os autores simularam vários cenários utilizando metanol, avaliando o uso ou não de solvente; além de analisar a viabilidade econômica com o preço atual das enzimas (€ 762,71.kg⁻¹) e com um preço mais atrativo (€ 7,627.kg⁻¹, MITTELBACH, 2005 citado por SOTOFT et al., 2010). As simulações foram feitas no software Aspen Plus[®] e a avaliação econômica com o Aspen Icarus Process Evaluator[®], e incluem: (i) armazenagem, (ii) reação e (iii) separação. A seção de reação foi simulada com três reatores do tipo tanque agitado (CSTR) em série, sendo que cada um é seguido por um decantador para remoção do glicerol formado que inibe a atividade enzimática e aumenta o rendimento total; e a seção de separação é composta pela destilação. Os custos de produção do biodiesel reportado pelos autores (SOTOFT et al., 2010) está indicado na Tabela 3.

Tabela 3. Custos de produção de biodiesel pela rota enzimática em diferentes cenários de escala e tecnologia (com e sem solvente).

Cenário	Metanol							
	Sem uso de solvente				Com uso de solvente (tert-Butanol)			
Escala (10 ⁶ .ano ⁻¹)	8		200		8		200	
Custo de enzimas (€.kg ⁻¹)	762,71	7,627	762,71	7,627	762,71	7,63	762,71	7,627
Custo biodiesel (€.kg ⁻¹)	1,49	0,75	0,73	0,05	2,38	2,19	1,7	1,5

Fonte: Adaptado de Sotoft et al. (2010).

Supercrítica

Um fluido supercrítico caracteriza-se pelas condições de pressão e temperatura acima das condições críticas. No processo supercrítico utilizando-se álcool, os triglicerídeos e o álcool são aquecidos até atingir as condições críticas, o que permite a ocorrência da reação de transesterificação (TAN; LEE, 2011). Em condições supercríticas, a solubilidade do álcool é reduzida a um valor próximo da solubilidade dos triglicerídeos, o que leva a formação de uma fase homogênea entre os dois reagentes. Assim, a reação de transesterificação pode ocorrer sem uso de catalisadores, além do que é reportado que a reação ocorre a taxas superiores do que as reações catalíticas (TAN et al., 2010 citado por TAN; LEE, 2011). Adicionalmente, sem a presença de catalisador o processo de separação é simplificado, e a glicerina obtida apresenta pureza superior ao do processo catalítico.

Uma das desvantagens do processo com fluido supercrítico é o alto consumo energético. Por exemplo, utilizando-se o metanol, é necessário atingir temperaturas superiores a 239°C e pressões de 8,1MPa, enquanto que o processo convencional requer temperaturas menores que 150°C e pressão atmosférica (TAN; LEE, 2011). Outra questão mencionada por Tan e Lee (2011) é que o gasto energético para produção de biodiesel pela rota supercrítica é superior à energia fornecida pelo biocombustível. Além dos custos energéticos, o processo supercrítico tem custos elevados de materiais para construção dos equipamentos, de manutenção, de operação e de segurança devido às condições extremas do processo.

Um fluxograma proposto (MARCHETTI; ERRAZU, 2008) para o processo de transesterificação é mostrado na Figura 6. Na sequência estão listados os estudos de viabilidade técnico-econômica mais recentes da produção de biodiesel pela transesterificação supercrítica.

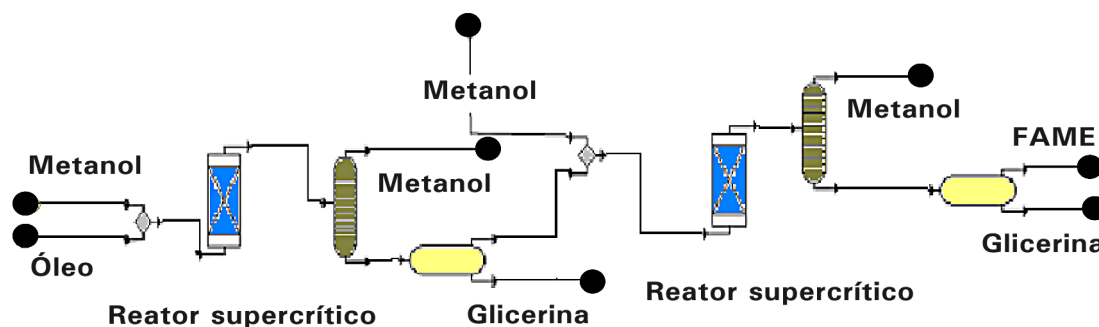


Figura 6. Fluxograma do processo de produção de biodiesel pela transesterificação supercrítica. Fonte: Adaptado de Marchetti e Errazu (2008).

Van Kasteren e Nisworo (2007) analisaram o custo de produção do biodiesel a partir da transesterificação supercrítica do óleo de fritura. Segundo o autor, este processo pode ser competitivo frente aos processos catalisados por ácidos e bases, por eliminar custos operacionais e com pré-tratamento. A planta simulada é composta por uma unidade de reação e uma de separação, e as simulações foram feitas com o auxílio do software AspenPlus®. A análise foi efetuada considerando-se diferentes capacidades de processamento (8.000, 80.000 e 125.000 t.ano⁻¹) e duas localizações (EUA e Nova Zelândia). O reator de transesterificação foi modelado como um reator adiabático de fluxo empistonado (PFR). O custo de produção encontrado por Van Kasteren e Nisworo (2007) considerando a planta localizada nos EUA utilizando-se tanto metanol quanto etanol na reação está indicado na Figura 7. Os autores também comparam essa rota de produção de biodiesel pela transesterificação supercrítica com outras rotas convencionais disponíveis na literatura (Figura 8) e concluem que esta pode ser competitiva, principalmente se produzido a partir do óleo de fritura. Segundo Van Kasteren e Nisworo (2007) a venda do glicerol pode reduzir os custos operacionais em até 36%.

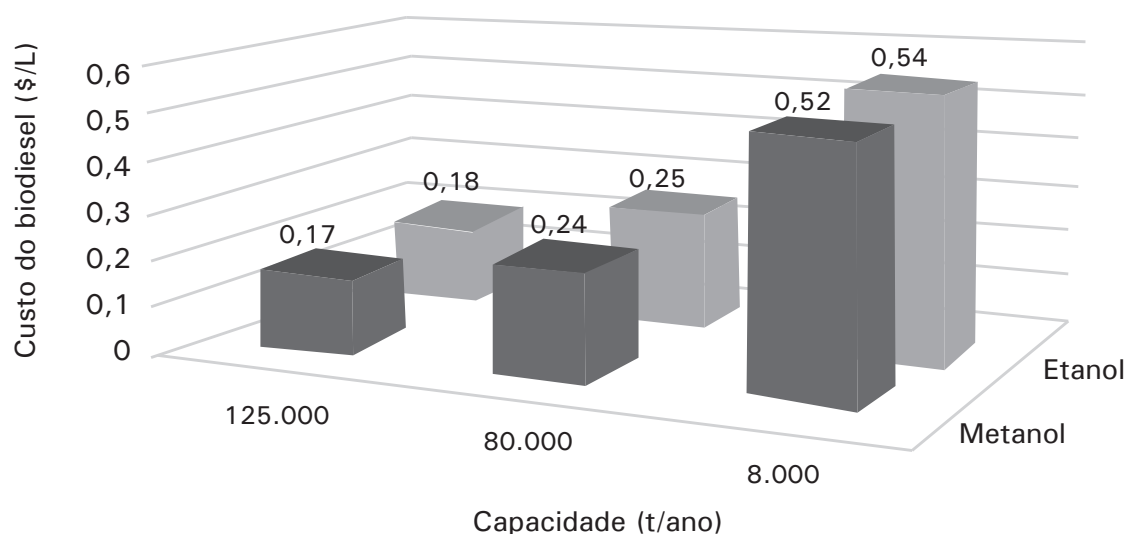


Figura 7. Custos da produção do biodiesel nos EUA em função da escala de produção e do álcool utilizado, Van Kasteren e Nisworo (2007).

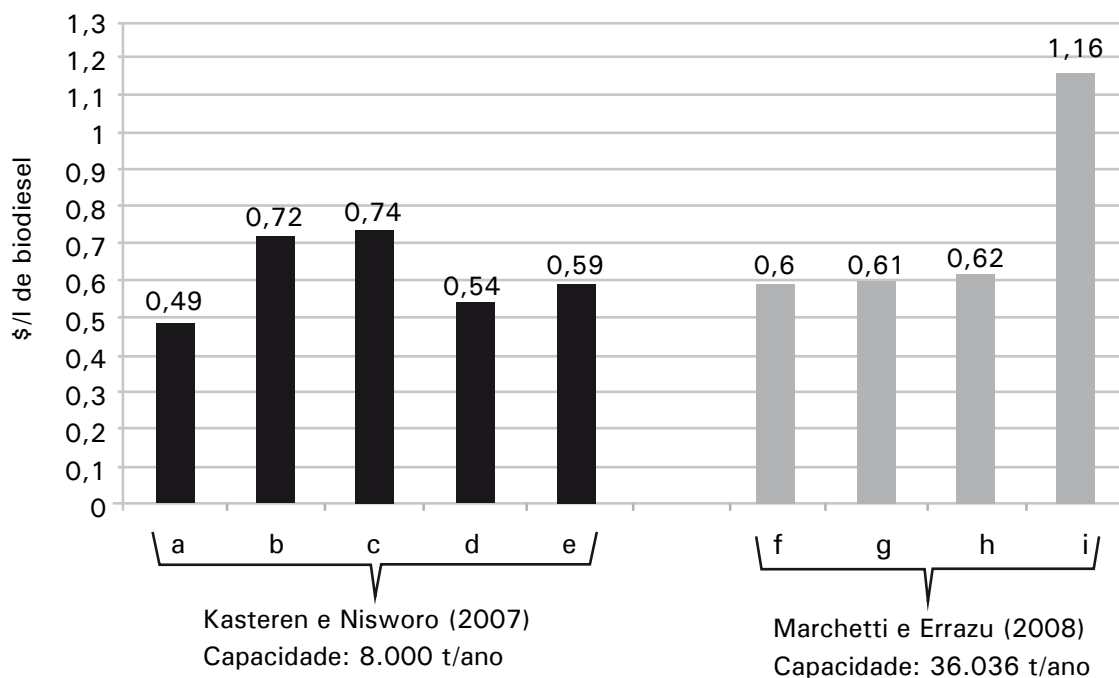


Figura 8. Custos de produção de biodiesel: (a) Sem catalisador - óleo de fritura, (b) Catalisador alcalino - óleo fresco, (c) Catalisador alcalino - óleo de fritura, (d) Catalisador ácido - óleo de fritura, (e) Catalisador ácido - óleo fresco. Marchetti e Errazu (2008) - óleo com 5% de ácidos graxos livres: (f) Catalisador alcalino, (g) Catalisador ácido, (h) Catalisador de resinas sólidas, (i) Sem catalisador.

Fonte: Van Kasteren e Nisworo (2007) e Marchetti e Errazu (2008).

Marchetti e Errazu (2008) efetuaram o estudo técnico-econômico de uma planta supercrítica para produção de biodiesel localizada na Argentina. Os autores compararam a rota supercrítica com outras três rotas convencionais e utilizaram o software SuperPro[®] para simulação e cálculo dos custos de produção associados a cada uma destas alternativas. Os custos levantados pelos autores estão descritos na Figura 8. Marchetti e Errazu (2008) concluíram que a produção de biodiesel pela via supercrítica não é viável economicamente frente às outras tecnologias no cenário estudado por apresentar um alto custo energético. Entretanto, a rota supercrítica é ambientalmente melhor, devido à baixa geração de efluentes e à alta qualidade da glicerina obtida.

Morais et al. (2010) reportaram a simulação e a análise do ciclo de vida da produção de biodiesel a partir de óleos vegetais. A simulação foi realizada com auxílio do software AspenPlus[®] considerando-se uma planta contínua com capacidade de 3.500 t.ano⁻¹. Os processos analisados foram: convencional com catalisador alcalino, catalisado por ácido e o processo em condições supercríticas. Os autores concluíram que o processo supercrítico é o mais viável ambientalmente, apesar de não ser competitivo economicamente frente aos outros processos no atual estágio de desenvolvimento.

Estudos brasileiros

No Brasil há uma ampla variedade de matérias-primas potenciais para a produção de biodiesel, entretanto poucos estudos de viabilidade técnico-econômica da aplicação destes nas mais diversas regiões brasileiras.

Araújo et al. (2002) realizaram uma avaliação técnica e econômica da produção de biodiesel a partir da soja e da mamona no Brasil, através da transesterificação alcalina com etanol. As simulações foram feitas para diferentes cenários utilizando-se o software SuperPro[®], sendo que a planta proposta consta das seções de reação e de separação. Os resultados encontrados estão dispostos na Tabela 4. Segundo os autores, o processo é economicamente viável quando se utiliza óleo extraído da torta de soja, usando a extração e a transesterificação, com aproveitamento da proteína de soja como coproduto.

Tabela 4. Custo de produção do biodiesel no Brasil a partir dos óleos de soja e de mamona.

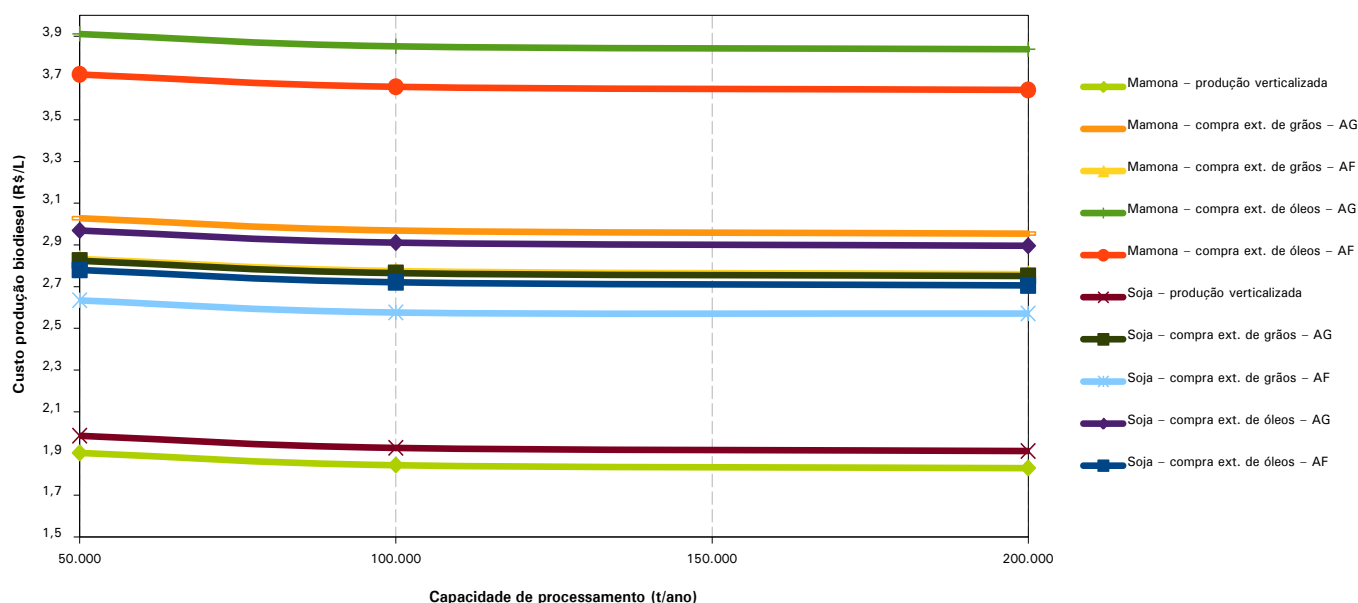
Matéria-prima	Custo (R\$.L-1)	Lucro
Soja	2,2	Não
Mamona ¹	1,9	Não
Torta ²	1,6	Sim
Torta ³	1,32	Sim

¹ 75% do preço do óleo de soja² Óleo extraído com uso de torta, 60% do preço do óleo de soja.³ Óleo extraído com uso de torta, 15% do preço do óleo de soja.

Fonte: Araújo et al. (2002).

Portela (2007) realizou um estudo técnico-econômico da produção de biodiesel no Brasil a partir da soja e da mamona através da transesterificação alcalina. Segundo o autor a produção de biodiesel é uma alternativa viável apenas se as três motivações econômica, ambiental e social forem igualmente consideradas, pois nenhuma delas possui fôlego suficiente para, isoladamente, sustentar o Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel. Foram analisados três cenários: produção verticalizada que assume necessariamente a produção própria de grãos e associa o empreendimento ao agronegócio, compra externa de grãos e de óleo, podendo ser da agricultura familiar (AF) ou do agronegócio (AG). Os resultados encontrados por Portela (2007) estão dispostos nas Figuras 9 e 10. Analisando-se estas figuras verifica-se que há uma grande variação nos preços do biodiesel em função da origem da matéria-prima, concordando com os resultados reportados por outros autores (RADICH, 2011; VAN KASTEREN; NISWORO, 2007; ENGUÍDANOS et al., 2002; HAAS et al., 2006). Sendo que nos dois cenários (rota etífica e metífica) o menor custo obtido foi para utilização de mamona com produção verticalizada.

Santana et al. (2010) estimaram o custo de produção de biodiesel a partir do óleo de mamona no Brasil. O processo estudado opera de modo contínuo com capacidade de 1.000 kg.h⁻¹, utilizando catalisador alcalino e etanol na alimentação. As simulações foram feitas com auxílio do software Hysys®, considerando-se diferentes custos da matéria-prima. Analisando-se os resultados, Tabela 5, vê-se que o custo de produção do biodiesel no Brasil a partir do óleo de mamona é alto, quando comparado aos custos de produção a partir de outras matérias-primas em diversos países e no Brasil, como mencionado nos parágrafos anteriores. Entretanto, segundo os autores, apesar de pouco competitivo economicamente, tal processo tem o objetivo de incluir pequenos produtores na cadeia de produção do biodiesel¹, gerando renda em áreas subdesenvolvidas, como a região Nordeste do país.

**Figura 9.** Custo da produção de biodiesel em diversos cenários, rota etífica.

Fonte: Portela (2007).

¹Objetivo do Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel - PNPB.

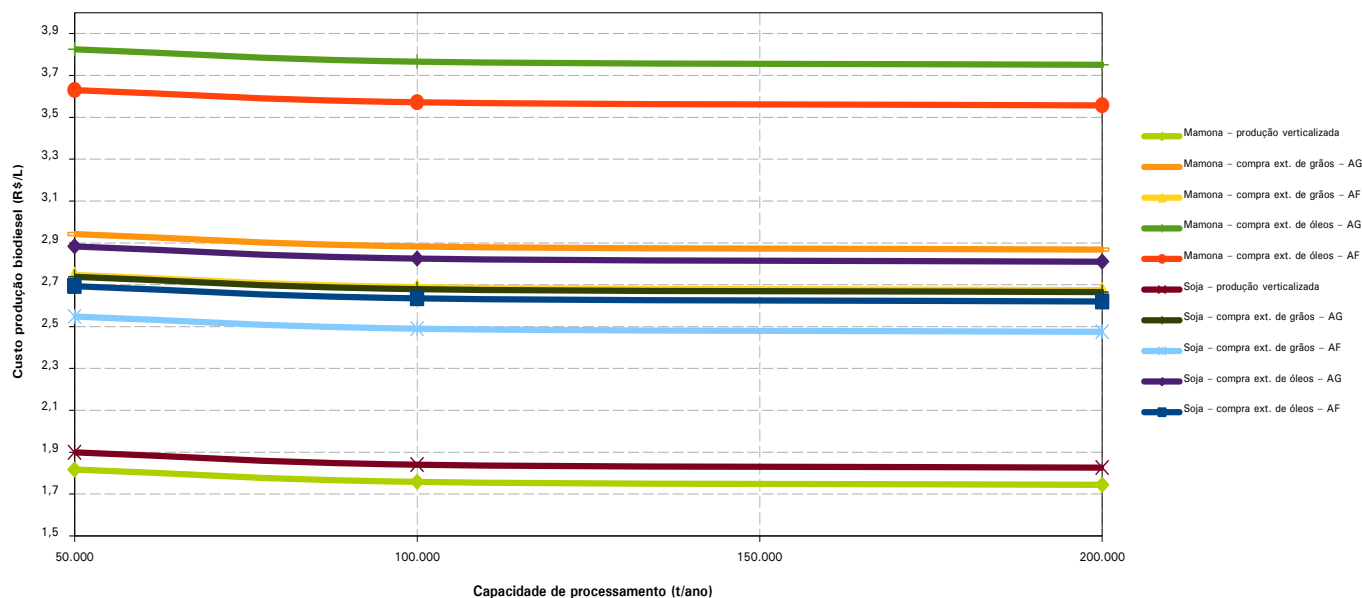


Figura 10. Preço do biodiesel em diversos cenários, rota metílica.

Fonte: Portela (2007).

Tabela 5. Custo de produção do biodiesel no Brasil a partir do óleo de mamona.

Custo matéria-prima (US\$.kg-1)	Custo biodiesel (US\$.L-1)	Purificação da glicerina
1,157	1,56	Sim
1,157	1,52	Não
0,526	0,92	Não

Fonte: Santana et al. (2010).

Perspectivas e conclusões

Diante da tendência de aumento da demanda por biodiesel no Brasil, como pode ser visto na Figura 11, vê-se a importância do aumento da capacidade produtiva, da diminuição dos custos, da utilização das diferentes matérias-primas nas diversas regiões brasileiras, e do domínio técnico da produção pela rota etílica.

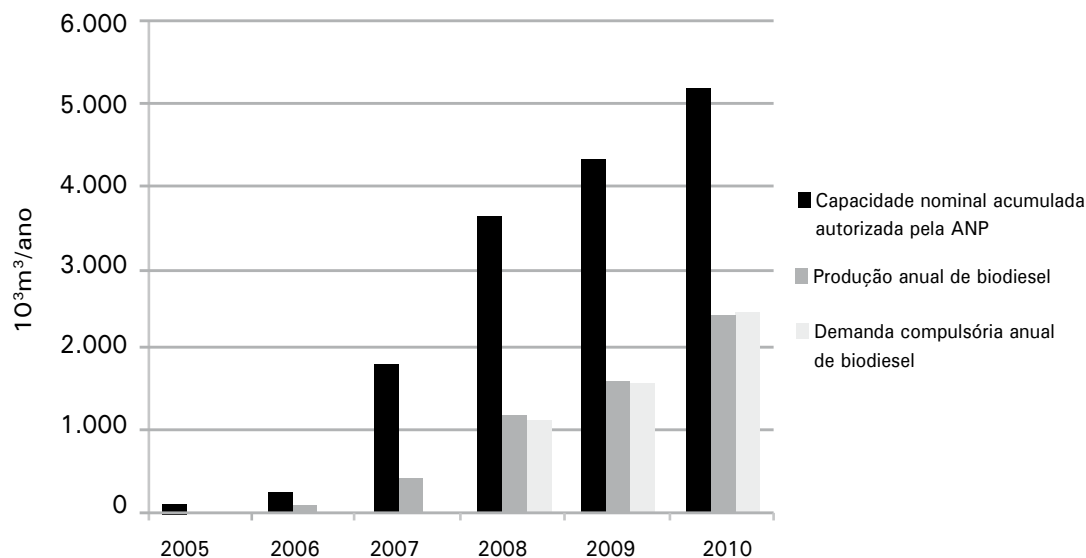


Figura 11. Evolução anual da produção, da demanda compulsória e da capacidade nominal autorizada pela ANP.

Fonte: Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (2011).

Neste cenário de aumento da demanda nacional por biodiesel, várias instituições brasileiras têm centrado esforços na pesquisa e desenvolvimento das rotas de produção de biodiesel pelas diferentes tecnologias, como a Embrapa, Petrobras Biocombustíveis, Associação Brasileira das Indústrias de Biodiesel.

Dada a grande diversidade de matérias-primas no Brasil para produção de biodiesel, tem sido estudada também a aplicabilidade de cada uma destas nas diferentes regiões produtoras, de forma a diminuir custos agrícolas e de logística. O zoneamento agrícola do risco climático e potencialidade para diferentes oleaginosas para produção de biodiesel é mostrado na Figura 12.



Figura 12. Zoneamento agrícola de risco climático da potencialidade brasileira para produção de biodiesel para sete oleaginosas.

Fonte: MAPA apud SEBRAE.

Outro ponto importante para que o biodiesel seja comercializado por um custo menor é o aumento da produtividade de óleo por hectare. Atualmente o biodiesel no Brasil é produzido majoritariamente a partir da soja, cerca de 83% do volume de biodiesel no país é proveniente da soja (ZALAFON, 2011). Segundo estimativas (ZALAFON, 2011) a produção de biodiesel já necessita de 10 milhões de toneladas de soja ao ano. Esta oleaginosa tem um rendimento médio de 700 litros de biodiesel por hectare, quase um terço a menos que outras espécies, sendo que é desejável obter rendimentos superiores a mil litros (ANUÁRIO, 2008).

A produção de biodiesel a partir do girassol apresenta maior produtividade por hectare, variando de 1.338 a 1.811 entre as safras de 2001 a 2007. O custo de produção do biodiesel em cooperativas a partir do girassol foi de R\$1,00.L⁻¹ (MENANI, 2008). Novas cultivares de girassol foram lançadas pela Embrapa com alto teor de óleo poderá agregar valor ao processo produtivo (VIEIRA, 2011).

A mamona é uma cultura que no início do PNPB foi tomada como promissora, entretanto a produção da oleaginosa tem mantido o mesmo patamar desde o início do programa (GOMES; SALDANHA, 2010). Isto se deve a alguns fatores como a concorrência com a indústria química, pois o óleo de mamona é utilizado na fabricação de cosméticos, lubrificante na aviação, além do que segundo resolução da ANP não é possível atingir a especificação exigida produzindo biodiesel apenas com o óleo de mamona, pois precisaria de aditivos (óleos de soja ou girassol) para ser utilizado em tanques (MENANI, 2008).

O uso do algodão na produção de biodiesel tem mostrado bons resultados, principalmente pelo baixo custo do óleo (R\$0,85.L⁻¹), (MENANI, 2008). Esta matéria-prima está em terceiro lugar como fonte de produção de biodiesel no país (GOMES; SALDANHA, 2010).

O dendê é uma das oleaginosas com maior produtividade (cerca de 10 vezes maior que a soja), (MENANI, 2008). É uma matéria-prima com grande potencial para produção de biodiesel, e uma das poucas opções viáveis para a Amazônia (MENANI, 2008). Há vários estudos sendo desenvolvidos pela Embrapa para aumentar a produtividade e a aplicabilidade do dendê na produção de biodiesel.

O pinhão-mansão ou *Jatropha Curcas* está entre as principais matérias-primas potenciais para produção de biodiesel. O projeto BRJATROPHA, liderado pela Embrapa Agroenergia com recursos da Financiadora de Estudos e Projetos (Finep/MCT) tem como metas ações de pesquisa em todas as regiões brasileiras englobando a parte agrônômica, de produção do biodiesel e a destoxificação da torta (COLLARES, 2010). Um dos principais problemas para a viabilidade econômica do processo produtivo está na colheita, devido ao amadurecimento desuniforme dos frutos o que aumenta os custos com mão-de-obra.

Segundo dados da Associação Brasileira das Indústrias Exportadoras de Carnes (ABIEC, 2010) o Brasil é um dos maiores exportadores de carne do mundo (1.230.571 ton em 2010) e o segundo maior produtor. Assim, a produção de biodiesel no Brasil a partir de gorduras animais é uma oportunidade interessante, pois os resíduos gerados pelos frigoríficos seriam aproveitados na geração de energia. Outra matéria-prima que vem sendo utilizada para produção de biodiesel é o óleo residual, que apresenta alguns problemas como a alta acidez e grande quantidade de água, além da dificuldade logística que inviabilizaria grandes empreendimentos. Entretanto, esta matéria-prima vem sendo utilizada em pequena escala com bons resultados, além das vantagens econômicas, sociais e ambientais.

Ressaltam-se ainda as vantagens ambientais oriundas do uso do biodiesel. Estudos indicam que o uso de 1 kg biodiesel colabora na redução de 3 kg de CO₂ (SEBRAE, 2011; ENGUÍDANOS et al., 2002). Segundo Dália (2006) o uso do biodiesel (B100) reduz 37% das emissões de hidrocarbonetos, 78,45% de CO₂, 32% de material particulado, além de ser livre dos gases do enxofre (com exceção do biodiesel obtido pelo processo de craqueamento). Além disto, ressalta-se a importância social e econômica da produção de biodiesel nas diversas regiões brasileiras, principalmente na oportunidade gerada para os pequenos agricultores. Estas questões (ambiental, social) além do mercado estão nas diretrizes do Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PORTAL DO BIODIESEL, 2011).

A partir do levantamento dos custos de produção de biodiesel pode-se concluir que são bastante elevados quando comparados aos custos de produção do óleo diesel a partir de matéria fóssil. Tal fato indica que muitos esforços para viabilização da produção do biodiesel em escala industrial devem ser aplicados.

De acordo com a literatura, a maior parte dos custos associados à produção de biodiesel é a matéria-prima, podendo chegar a 88% (HAAS et al., 2006). Outros fatores que podem influenciar são

a capacidade de processamento, a localização, a forma como o óleo para processamento é obtido (produção própria, compra de grãos ou de óleo) e a tecnologia de processamento (rota metálica ou etílica, catalisadores ácidos, básicos, sólidos ou biológicos, além do processo supercrítico).

Assim, apresentam-se como perspectivas para o setor de produção de biodiesel no Brasil:

- (i) Domínio tecnológico da produção pela rota etílica – obter de altas taxas de conversão e rendimento;
- (ii) Aperfeiçoamento da rota enzimática – aumentar a taxa de reação e atividade catalítica, prospectar e diminuir o custo das enzimas;
- (iii) Rota supercrítica – aumentar a eficiência energética;
- (iv) Melhoramento das cultivares oleaginosas – aumentar o rendimento por hectare, diminuir custos agrícolas;
- (v) Estabelecimento dos arranjos produtivos nas regiões brasileiras de acordo com o zoneamento agrícola de risco climático – incluir os pequenos produtores, diminuir gastos com a logística;
- (vi) Coprodutos e resíduos – identificar novos mercados e aplicações de forma a aumentar a lucratividade dos empreendimentos e diminuir os impactos ambientais;
- (vii) Microalgas – avaliar a viabilidade de produção de biodiesel no Brasil a partir de algas devido a menor necessidade de área para o cultivo, o alto rendimento de óleo e as vantagens ambientais (uso de águas impróprias para a agricultura no cultivo).

Grande parte dos estudos de viabilidade técnico-econômica foi feita na Europa e nos EUA. No Brasil, apesar da ampla diversidade de matérias-primas potenciais para produção de biodiesel, há poucos estudos da aplicabilidade em diferentes regiões e da viabilidade técnico-econômica. Estes estudos são fundamentais no direcionamento da implantação da produção de biodiesel de forma eficiente considerando-se a grande diversidade de oleaginosas e as questões regionais, de forma a atender aos objetivos propostos no PNPB.

Referências

- ABIEC. Associação Brasileira das Indústrias Exportadoras de Carnes. Estatísticas. Disponível em: <<http://www.abiec.com.br/>>. Acesso em: 9 mai. 2010.
- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Produção nacional de biodiesel puro**. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/?id=472>>. Acesso em: 19 abr. 2011.
- APOSTOLAKOU, A. A.; KOOKOS, I.K.; MARAZIOTI, C.; ANGELOPOULOS, K.C. Techno-economic analysis of a biodiesel production process from vegetable oils. **Fuel Processing Technology**, Amsterdam, v. 90, p. 1023-1031, 2009.
- ARAÚJO, K. M.; OLIVEIRA, A. K. C.; COSTA, G. B.; QUEIROGA, R. N. G.; PANNIR SELVAM, P. V. **Estudo comparativo técnico e econômico de diferentes óleos vegetais brasileiros para produção de biocombustível**. Natal: UFFRN, 2002.
- COLLARES, D. G. Novos resultados com pinhão-mansão em três anos. **BiodieselBR**, 2010. Disponível em: <<http://www.biodieselbr.com/noticias/em-foco/novos-resultados-pinhao-mansao-tres-anos-180610.htm>>. Acesso em: 6 mai. 2011.
- DÁLIA, W. S. A produção de biodiesel: uma perspectiva para a agroenergia no Nordeste Brasileiro. In: FERREIRA, J. R.; CRISTO, C. M. P. N. (Coord.). **O futuro da indústria: biodiesel: coletânea de artigos**. Brasília, DF: Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior: IEL, 2006. p. 27-36 (Série política industrial, tecnológica e de comércio exterior, 14).
- ENGUÍDANOS, M.; SORIA, A.; KAVALOV, B.; JENSEN, P. **Techno-economic analysis of biodiesel production in the EU: a short summary for decision-makers**. Seville: Institute for Prospective Technological Studies, 2002. Report EUR 20279 EN.
- FJERBAEK, L.; CHRISTENSEN, K. V.; NORDDAHL, B. A review of the current state of biodiesel production using enzymatic transesterification. **Biotechnology & Bioengineering**, New York, v. 102, n. 5, p. 1298-1351, 2009.
- FUKUDA, H.; KONDO, A.; NODA, H. Biodiesel Fuel Production by Transesterification of Oils. **Journal of Bioscience and Bioengineering**, v. 92, n. 5, p. 405-416, 2001.
- GOMES, C.; SALDANHA, N. Biodiesel estimula a soja. **BiodieselBR**, nov./dez. 2010. Disponível em: <<http://www.biodieselbr.com/revista/019/biodiesel-estimula-1.htm>>. Acesso em: 17 fev. 2011.
- HAAS, M. J.; McALOON, A. J.; YEE, W. C.; FOGLIA, T. A. A process model to estimate biodiesel production costs. **Bioresource Technology**, Essex, v. 97, p. 671-678, 2006.
- JEGANNATHAN, K. R.; ENG-SENG, C.; RAVINDRA, P. Economic assessment of biodiesel production: Comparison of alkali and biocatalyst processes. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, p. 745-751, 2011.
- JOHNSTON, M.; HOLLOWAY, T. A Global Comparison of National Biodiesel Production Potentials. **Environmental Science Technology**, Easton, v. 41, p. 7967-7973, 2007.
- KISS, F. E.; JOVANOVIĆ, M.; BOSKOVIC, G. C. Economic and ecological aspects of biodiesel production over homogeneous and heterogeneous catalysts. **Fuel Processing Technology**, Amsterdam, v. 91, p. 1316-1320, 2010.
- MARCHETTI, J. M.; ERRAZU, A. F. Technoeconomic study of supercritical biodiesel production plant. **Energy Conversion and Management**, Oxford, v. 49, p. 2160-2164, 2008.
- MENANI, R. (Org.). **1º Anuário Brasileiro do Biodiesel**. Monte Alto: Letra Boreal, 2008.

MORAIS, S.; MATA, T. M.; MARTINS, A. A.; PINTO, G. A.; COSTA, C.A.V. Simulation and life cycle assessment of process design alternatives for biodiesel production from waste vegetable oils. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 18, p. 1251-1259, 2010.

PORTAL DO BODIESEL. **Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel**. Disponível em: <<http://www.biodiesel.gov.br/>>. Acesso em: 07 abr. 2011.

PORTELA, H. E. **Avaliação técnico-econômica de um empreendimento produtivo de biodiesel**. 2007. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica, Salvador, BA.

RADICH, A. **Biodiesel performance, costs, and use**: energy information administration. Disponível em: <<http://tonto.eia.doe.gov/ftproot/environment/biodiesel.pdf>>. Acesso em: 15 mar. 2011.

SANTANA, G. C. S.; MARTINS, P. F.; SILVA, N. L.; BATISTELLA, C. B.; MACIEL FILHO, R.; WOLF MACIEL, M. R. Simulation and cost estimate for biodiesel production using castor oil. **Chemical Engineering Research & Design**, Elmsford, v. 88, p. 626-632, 2010.

SEBRAE. **Biodiesel**. Disponível em: <[http://201.2.114.147/bds/BDS.nsf/D170D324C7521915832572B200470F63/\\$File/NT00035116.pdf](http://201.2.114.147/bds/BDS.nsf/D170D324C7521915832572B200470F63/$File/NT00035116.pdf)>. Acesso em: 13 abr. 2011.

SOTOFT, L. F.; RONG, B. G.; CHRISTENSEN, K. V.; NORDDAHL, B. Process simulation and economical evaluation of enzymatic biodiesel production plant. **Bioresource Technology**, v. 101, p. 5266 – 5274, 2010.

TAN, K. K.; LEE, K. T. A review on supercritical fluids (SCF) technology in sustainable biodiesel production: potencial and challenges. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, p. 2452–2456, 2011.

VAN KASTEREN, J. M. N.; NISWORO, A. P. A process model to estimate the cost of industrial scale biodiesel production from waste cooking oil by supercritical transesterification. **Resources, Conservation and Recycling**, Amsterdam, v. 50, p. 442-458, 2007.

VIEIRA, A. Novas cultivares de girassol da Embrapa chegam ao mercado. **BiodieselBR**, abr. 2011. Disponível em: <<http://www.biodieselbr.com/noticias/bio/cultivares-girassol-embrapa-mercado-200411.htm>>. Acesso em: 15 abr. 2011.

WEBER, J. A.; VAN DYNE, D. L. **Cost implications of feedstock combinations for community sized biodiesel production**. Columbia: University of Missouri, 1998.

ZALAFON, M. Produção de biodiesel já necessita de 10 milhões de toneladas de soja ao ano. **BiodieselBR**, maio 2011. Disponível em: <<http://www.biodieselbr.com/noticias/em-foco/producao-biodiesel-necessita-toneladas-soja-ano-020511.htm>>. Acesso em: 03 mai. 2011.

ZHANG, Y.; DUBÉ, M. A.; McLEAN, D. D.; KATES, M. Biodiesel production from waste cooking oil: 1. Process design and technological assessment. **Bioresource Technology**, Essex, v. 89, p. 1- 16, 2003.

