

Otimização da Etapa Reacional da Produção de Biodiesel Tendo em Consideração o Sistema de Separação

Lucas Pereira Ladeira^{a*}, Raquel Massad Cavalcante^a, André Ferreira Young^b

^a Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, Rio de Janeiro-Rj, Brasil

^b Universidade Federal Fluminense, Departamento de Engenharia Química e de Petróleo, Niterói, Brasil

* lpladeira1998@eq.ufrj.br

RESUMO

Nos últimos anos, técnicas computacionais têm sido amplamente empregadas na análise, simulação e otimização de processos químicos. Neste trabalho, propõe-se a otimização do sistema reacional de produção de biodiesel em uma planta com capacidade de 15,15 L/h, por meio de uma metodologia integrada entre *Matlab®* e *Aspen Plus®*, considerando simultaneamente o sistema de separação e adotando uma função objetivo econômica. Os resultados indicaram razão metanol:óleo ótima de 8,1155:1 e volume reacional ótimo de 219,18 L. Do ponto de vista econômico, a configuração analisada apresentou VPL de $-2,6164 \times 10^6$, com preços de equilíbrio de US\$ 5,5356/kg para lucro zero no primeiro ano, US\$ 7,1604/kg para VPL nulo em 10 anos e US\$ 8,1692/kg para VPL nulo em 5 anos. Os resultados mostram que a integração *Matlab®*–*Aspen Plus®* é eficaz para a análise e otimização do processo, embora o cenário avaliado não tenha apresentado viabilidade econômica.

Palavras-chave: Aspen Plus, Matlab, Transesterificação, Otimização, Biodiesel.

1 Introdução

A produção de biodiesel a partir de óleos vegetais ou gorduras animais é uma alternativa relevante aos combustíveis fósseis, uma vez que pode substituir, parcialmente ou totalmente, o diesel de origem petroquímica. Entre as rotas de produção de biodiesel disponíveis, a transesterificação via catálise alcalina permanece a mais amplamente empregada, em razão de sua elevada eficiência de conversão. Ainda assim, a produção de biodiesel continua enfrentando dificuldades para se viabilizar economicamente, sobretudo em razão da forte influência do custo da matéria-prima e das etapas de separação sobre o custo global do processo.

Nesse contexto, o sistema reacional exerce papel central no desempenho global do processo, pois as variáveis do reator influenciam diretamente a conversão, a formação dos produtos e as etapas subsequentes de separação. Assim, torna-se relevante avaliar como a otimização do reator afeta o comportamento global da planta e o sistema de separação a jusante.

Na área de biodiesel, diversos trabalhos de simulação foram desenvolvidos, com destaque para os reportados por Zhang *et al.* (2003a) e Young *et al.* (2015). No que se refere especificamente ao sistema reacional, Szuster *et al.* (2019) apresentou uma abordagem baseada em superestruturas para a otimização da produção de biodiesel, adotando a vazão de entrada de metanol no sistema e os volumes dos reatores como variáveis de otimização.

2 Motivação

A integração entre *Matlab®* e *Aspen Plus®* constitui uma estratégia promissora para a otimização de processos, ao combinar simulação rigorosa e rotinas numéricas externas. A aplicação de estudos de otimização desse tipo em processos de produção de biodiesel é especialmente relevante no Brasil, onde o biodiesel já se encontra consolidado por meio do PNPB (Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel), que completou 20 anos em 2024, e onde permanece a perspectiva de ampliação de sua participação no diesel comercial, com metas de mistura obrigatória de até 20% em 2030 (Ministério da Fazenda, 2025; Ministério de Minas e Energia, 2025). Nesse contexto, este trabalho é motivado pela aplicação dessa integração na otimização de um sistema reacional com reator CSTR, considerando simultaneamente o sistema de separação.

3 Metodologia

3.1 Integração Matlab® e Aspen Plus®

O presente trabalho adota a abordagem proposta por Ladeira *et al.* (2024), que estabelece uma integração entre o *Aspen Plus*®, responsável pela simulação rigorosa do processo, e o *Matlab*®, no qual são realizados os cálculos de otimização e análise econômica. Nessa configuração, o *Aspen Plus*® executa a simulação das operações unitárias, enquanto o *Matlab*® realiza os cálculos numéricos e a atualização iterativa das variáveis de interesse. A comunicação entre os *softwares* é feita por meio de *ActiveX Automation/COM*, recurso amplamente empregado para o acoplamento entre simuladores de processo e plataformas externas de cálculo.

Essa integração permite utilizar os modelos já implementados no *Aspen Plus*® para a modelagem rigorosa de operações unitárias complexas, como as envolvidas no sistema de separação. Dessa forma, é possível avaliar, de maneira integrada, os efeitos das variáveis do sistema reacional sobre o desempenho global do processo.

3.2 Formulação do Problema de Otimização

A otimização, por sua vez, opera avaliando a função objetivo e atualizando, a cada iteração, os valores da razão metanol:óleo e do volume do reator. Para definir uma função objetivo, é preciso, inicialmente, determinar quais ganhos se deseja obter por meio da otimização. A função objetivo utilizada neste trabalho está descrita na Equação 1 e corresponde ao Valor Presente Líquido (VPL) do empreendimento:

$$VPL = \sum_{t=0}^n \frac{FC_t}{(1 + TMA)^t} \quad (1)$$

onde:

FC_t = fluxo de caixa em um determinado ano,

t = tempo, em anos, desde o tempo inicial ($t = 0$),

TMA = taxa mínima de atratividade, considerada igual a 10% ao ano,

n = número total de anos do empreendimento.

O valor presente líquido (VPL) é o critério financeiro adotado para avaliar a viabilidade econômica do processo, sendo definido como a diferença entre o valor presente das receitas obtidas com a comercialização dos produtos e o valor presente dos custos de investimento e operação da planta ao longo de sua vida útil. Para a formulação do problema de otimização, foram definidas variáveis de decisão que exercem influência direta sobre o sistema reacional e sobre a eficiência global do processo: a razão metanol:óleo e o volume do reator. A Equação 1 foi utilizada com o objetivo de ser maximizada, tendo como restrições de igualdade as equações que descrevem o modelo, sendo representadas por $g(x)=0$, que são resolvidas pelo simulador, e as restrições de desigualdade são as especificações da ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis) para comercialização de biodiesel e de temperatura de fundo máxima das colunas que contêm glicerol, conforme demonstrado nas Equações 2 a 11:

$$\max(F_{Obj}) = \max(VPL) \quad (2)$$

$$s.a := g(x) = 0 \quad (3)$$

$$Temp_{fundo} \leq 150 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (4)$$

$$x_{biodiesel} \geq 96,5 \text{ } \% \quad (5)$$

$$x_{glicerollivre} \leq 0,02 \text{ } \% \quad (6)$$

$$x_{gliceroltotal} \leq 0,02 \text{ } \% \quad (7)$$

$$x_{monoacilglicerol} \leq 0,50 \text{ } \% \quad (8)$$

$$x_{x_2iacilglicerol} \leq 0,20 \text{ } \% \quad (9)$$

$$x_{triacilglicerol} \leq 0,20 \text{ } \% \quad (10)$$

$$x_{metanol} \leq 0,20 \text{ } \% \quad (11)$$

As restrições do processo foram implementadas diretamente no *Aspen Plus®* por meio de *Design Specs*: as especificações de purificação do biodiesel foram impostas nas colunas correspondentes, enquanto os limites de temperatura de fundo foram definidos nas colunas de recuperação de metanol e de purificação de glicerina, garantindo que as simulações atendessem às condições de operação estabelecidas pelo problema de otimização.

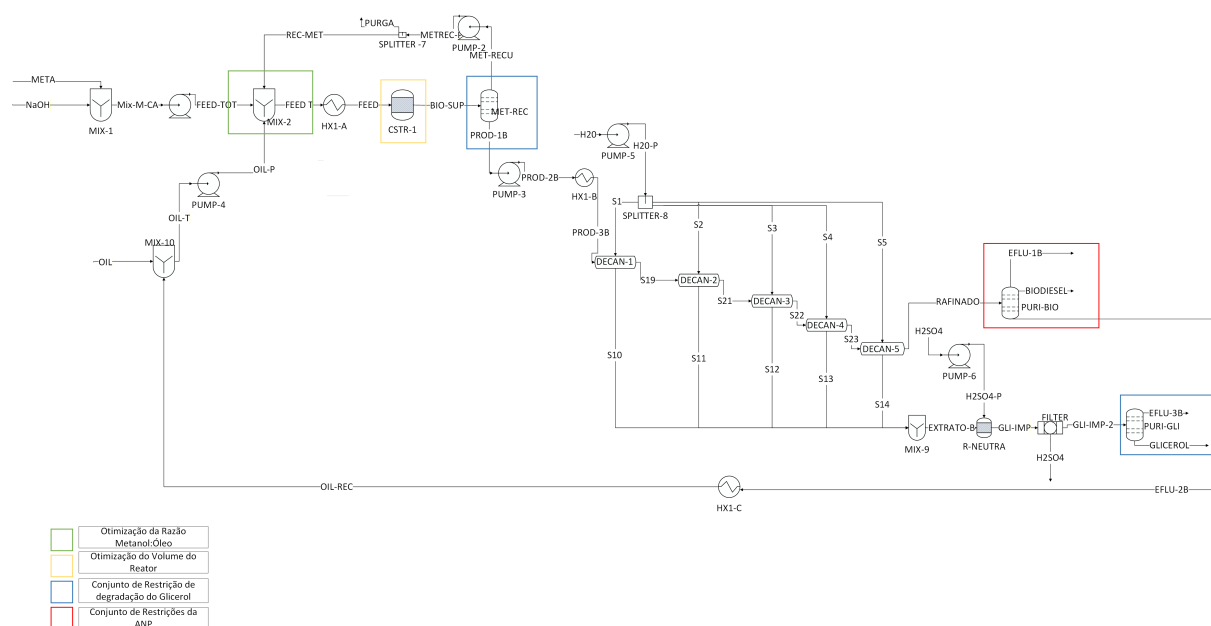
3.3 Estudo de caso

3.3.1 Simulação da Produção de Biodiesel

A metodologia desenvolvida neste trabalho para a simulação da produção de biodiesel via catálise homogênea alcalina foi baseada nos estudos de Zhang *et al.* (2003a) e Young *et al.* (2015), e foi assumido como álcool primário o metanol. O simulador de processos utilizado foi o *Aspen Plus* (versão 14). Os pacotes termodinâmicos utilizados na simulação foram o NRTL (*Non-Random Two Liquid*) para a fase líquida e o Peng-Robinson para a fase gasosa, de acordo com Zhang *et al.* (2003a) e West *et al.* (2008). O *software Matlab®* foi adotado para o desenvolvimento da rotina de otimização do reator.

A capacidade da planta de biodiesel foi definida com a base na Resolução ANP N° 18, de 22.6.2007, que determina uma produção mínima de 10.000 L/mês para comercialização do biodiesel, o que equivaleria a 15,15 L/h, ou, 0,2525 L/min, assumindo um fator de operação de 7.920 horas/ano. Assim, calculou-se a vazão molar inicial do regente, utilizando as propriedades físicas como densidade e massas molares do biodiesel e do óleo de soja e considerando um rendimento de 90%, que é o mínimo observado para uma planta de biodiesel segundo El-Assad *et al.* (2011). Portanto, a vazão de entrada de óleo na planta foi de 0,2823 mol/min. A Figura 1 apresenta o fluxograma de produção de biodiesel, com o indicativo dos locais onde atuaram as variáveis de otimização e foram estabelecidas as restrições.

Figura 1: Fluxograma de produção de biodiesel.



3.3.2 Análise Econômica

A análise econômica foi conduzida a partir do dimensionamento preliminar dos equipamentos, da estimativa do investimento da planta e da determinação do preço de equilíbrio do biodiesel. O dimensionamento foi realizado com base na metodologia de Seider *et al.* (2016), amplamente empregada em projeto preliminar de processos. Quando as condições operacionais extrapolaram a faixa de aplicação das correlações adotadas, utilizou-se a regra dos seis décimos, conforme Turton *et al.* (2018), como critério de extrapolação em escala. Embora aproximada, essa abordagem é compatível com estudos técnico-econômicos preliminares, por permitir estimativas consistentes a partir de equipamentos similares já dimensionados.

Com base nos resultados obtidos, o investimento total da planta foi estimado pelo método de Lang, considerando o custo FOB (*Free on Board*) dos equipamentos, um fator de transporte e o fator de Lang adequado para plantas com predominância de sistemas fluidos, conforme a Equação 12. Os custos individuais, inicialmente estimados a partir das correlações de Seider *et al.* (2016), foram atualizados pelo CEPCI. A partir do investimento e dos custos operacionais, avaliou-se o preço de equilíbrio do biodiesel como indicador complementar de viabilidade econômica, definido como o preço mínimo de venda necessário para viabilizar o processo. Esse parâmetro foi analisado no curto prazo, como a condição de lucro nulo no primeiro ano, e no longo prazo, como o preço capaz de resultar em VPL nulo em horizontes de 5 e 10 anos, com base em fluxo de caixa descontado.

$$I_F = 1.05 f_L \sum_i \left(\frac{CEPCI}{CEPCI_b} \right) C_i \quad (12)$$

onde:

I_F = investimento fixo,

f_L = fator de Lang, (5,04)

$CEPCI$ = *Chemical Engineering Plant Cost Index* do ano do projeto,

$CEPCI_b$ = *Chemical Engineering Plant Cost Index* do ano-base,

C_i = custo FOB de aquisição do equipamento no ano-base.

4 Resultados e Discussão

Os resultados da otimização indicaram uma razão metanol:óleo de 8,1155:1 e um volume reacional de 219,18 L como condição ótima para o sistema reacional analisado. Para a avaliação econômica, o preço de venda do biodiesel foi estimado com base nos dados da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), que mantém uma base atualizada dos preços de derivados do petróleo e biocombustíveis no Brasil. O valor adotado como referência foi de US\$ 1,0542/kg, correspondente à média do ano de 2025. Entretanto, sob a perspectiva econômica, o resultado obtido permaneceu distante da viabilidade desejada, visto que o Valor Presente Líquido (VPL) calculado foi de $-2,6164 \times 10^6$. Esse valor negativo indica que não conseguiu gerar retorno econômico satisfatório no cenário avaliado. Dessa forma, a compreensão desse comportamento requer uma análise mais detalhada da composição dos custos do processo, a qual será desenvolvida a seguir por meio da avaliação da distribuição de CAPEX e OPEX.

Como pode ser observado na Figura 2, o CAPEX apresenta forte concentração nas colunas de destilação, cujo custo supera com ampla margem o dos demais equipamentos analisados. Em seguida, bombas, trocadores de calor e sistema de lavagem aparecem como contribuições intermediárias, enquanto o reator de neutralização, o clarificador e o reator de transesterificação participam de forma menos expressiva no investimento total. Esse comportamento indica que, para a premissa estudada, a seção de separação constitui a principal penalização econômica em termos de capital imobilizado. Tal resultado é coerente com a literatura, que aponta os processos de separação e, em particular, a destilação, como operações de elevada relevância econômica e frequentemente associadas a parcelas expressivas dos custos de capital em processos de produção de biodiesel (Young *et al.*, 2015; Zhang *et al.*, 2003b). Isso reforça a necessidade de avaliar o sistema de separação conjuntamente com o sistema reacional em problemas de otimização, conforme a abordagem adotada neste trabalho.

Por sua vez, conforme a Figura 3, o OPEX é fortemente dominado pelo custo de matéria-prima, o qual supera de forma expressiva todas as demais parcelas operacionais. Em um segundo nível de relevância econômica situam-se os custos de empacotamento e estocagem, mão de obra, distribuição e manutenção e reparos, ao passo que utilidades, efluentes, seguros, suprimentos operacionais e encargos laboratoriais apresentam participações comparativamente reduzidas. Esse resultado reforça que, embora a seção de separação imponha a principal penalização em termos de investimento, a viabilidade econômica global do processo permanece particularmente sensível ao custo dos insumos, sobretudo da matéria-prima. Assim, mesmo quando há ganhos associados à otimização do sistema reacional, seu impacto sobre o desempenho econômico tende a ser limitado se a parcela referente ao *feedstock* continuar elevada, comportamento amplamente reportado na literatura para processos de produção de biodiesel.

Figura 2: CAPEX da Produção de Biodiesel.

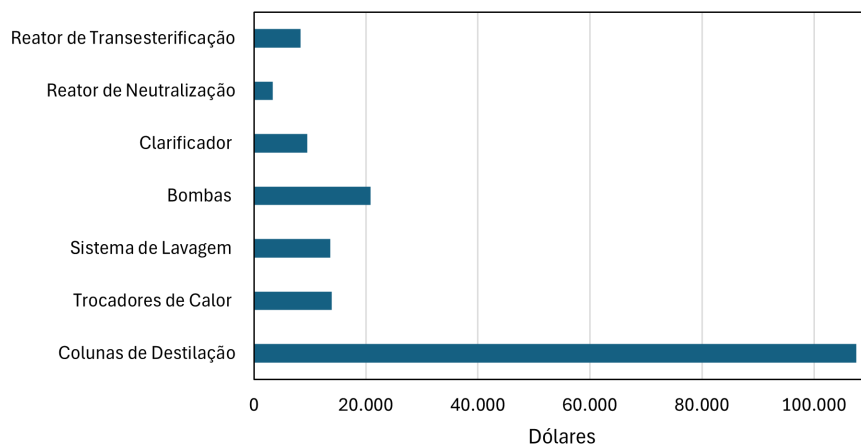
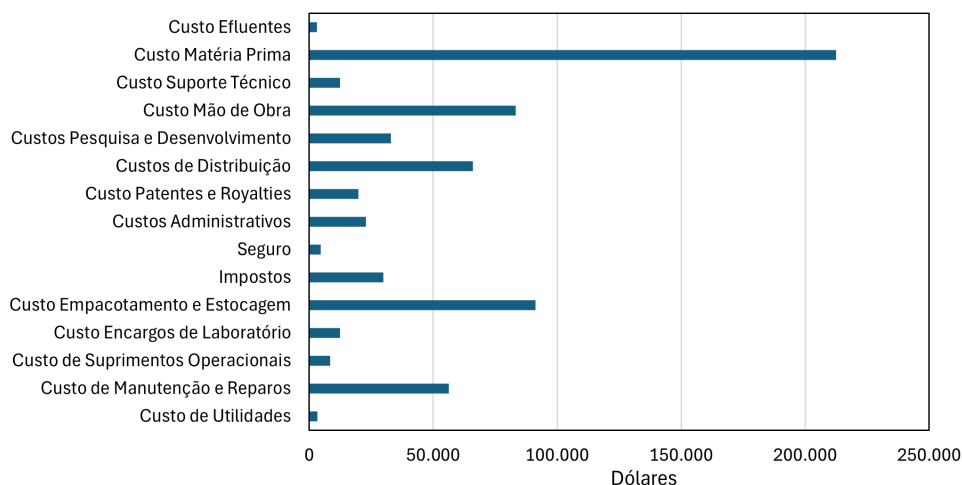


Figura 3: OPEX da Produção de Biodiesel.



A análise do preço de equilíbrio reforça a inviabilidade econômica da configuração estudada. O preço mínimo de venda do biodiesel seria de US\$ 5,5356/kg para lucro zero no primeiro ano, de US\$ 7,1604/kg para VPL nulo em 10 anos e de US\$ 8,1692/kg para VPL nulo em 5 anos. Portanto, mesmo tomando como referência o valor de US\$ 1,58/kg associado ao cenário mais favorável de comercialização considerado para o 82º leilão da ANP realizado em 2021 (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2021), observa-se que os preços requeridos permanecem muito acima do patamar de mercado, evidenciando que o cenário analisado não seria capaz de atingir viabilidade econômica nas condições avaliadas.

O preço de equilíbrio obtido neste estudo é superior ao valor de mercado praticado no Brasil, resultado que deve ser interpretado considerando as premissas do caso avaliado. A escala de produção adotada no estudo, por exemplo, é uma das premissas que condiciona o resultado econômico obtido. O custo de aquisição da matéria-prima supera as receitas obtidas com a comercialização dos produtos e coprodutos, constituindo o principal determinante do preço de equilíbrio calculado. Cabe ressaltar que a continuidade operacional das plantas comerciais no Brasil é sustentada por instrumentos regulatórios como a mistura obrigatória de biodiesel ao diesel, o Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB) e o RenovaBio. Dessa forma, o resultado obtido caracteriza o

cenário específico analisado, sem prejuízo da validade metodológica da abordagem proposta.

5 Conclusão

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que a integração entre *Matlab®* e *Aspen Plus®* mostrou-se adequada para a otimização do sistema reacional de produção de biodiesel, ao associar cálculos de otimização à simulação rigorosa do processo. Embora tenham sido determinadas condições ótimas para as variáveis do reator, o cenário analisado não apresentou viabilidade econômica. Assim, o trabalho evidencia o potencial dessa integração como ferramenta de análise e otimização de processos, bem como a necessidade de avanços adicionais para tornar a alternativa avaliada economicamente competitiva, tendo em consideração todas as etapas do processo e suas respectivas restrições operacionais.

Agradecimentos: Os autores agradecem à Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) – E-26/210.938/2024 – pelo suporte financeiro concedido para realização deste trabalho.

Referências

- Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. (2021). *82º Leilão de Biodiesel da ANP negocia 1,07 bilhão de litros* [Acesso em: 10 nov. 2025]. https://www.gov.br/anp/pt-br/canais_atendimento/imprensa/noticias-comunicados/82o-leilao-de-biodiesel-da-anp-negocia-1-07-bilhao-de-litros
- Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. (2025). *Especificação do biodiesel* [Acesso em: 10 nov. 2025.]. <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/boletins-anp/btpvc-1/2025/boletim-trimestral-4.pdf>
- El-Assad, A. B., Santiago, P., & Ladeira, R. D. S. (2011). *Síntese do Sistema de Reatores Aplicado à Produção de Biodiesel, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Escola de Química -EQ.*
- Ladeira, L. P., Young, A. F., & Cavalcante, R. M. (2024). Integração Matlab – Simulador de Processos para Otimização do Sistema de Reatores. *III Congresso Brasileiro em Engenharia de Sistemas em Processos.*
- Ministério da Fazenda. (2025). *Combustíveis do Futuro* [Acesso em: 27 abr. 2026]. <https://www.gov.br/fazenda/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/transformacao-ecologica/programas-em-destaque/combustiveis-do-futuro>
- Ministério de Minas e Energia. (2025). *Programa Nacional de Biodiesel celebra 20 anos promovendo desenvolvimento sustentável e transição energética no Brasil* [Acesso em: 27 abr. 2026]. <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/programa-nacional-de-biodiesel-celebra-20-anos-promovendo-desenvolvimento-sustentavel-e-transicao-energetica-no-brasil>
- Seider, W. D., Seader, J. D., & Lewin, D. R. (2016). *Product and Process Design Principles: Synthesis, Analysis, and Evaluation* (3ª ed.). John Wiley & Sons.
- Szuster, R., Young, A. F., & Mehl, A. (2019). API and Interface Development for Biodiesel Reaction System Optimization. *I Congresso Brasileiro em Engenharia de Sistemas em Processos.*
- Turton, R., Bailie, R. C., Whiting, W. B., & Shaeiwitz, J. A. (2018). *Analysis, Synthesis, and Design of Chemical Processes* (5ª ed.). Pearson.
- West, A. H., Posarac, D., & Ellis, N. (2008). Assessment of Four Biodiesel Production Processes Using HYSYS.Plant. *Bioresource Technology*, 99(14), 6587–6601. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.11.046>
- Young, A. F., Pessoa, F. L. P., & Queiroz, E. M. (2015). Comparação de Rotas Consolidadas para a Produção de Biodiesel a partir dos Óleos de Soja e de Dendê via Catálise Homogênea Alcalina. *Blucher Chemical Engineering Proceedings*, 1, 13093–13100. <https://doi.org/10.5151/chemeng-cobeq2014-2037-16238-175760>
- Zhang, Y., Dubé, M. A., McLean, D. D., & Kates, M. (2003a). Biodiesel Production from Waste Cooking Oil: 1. Process Design and Technological Assessment. *Bioresource Technology*, 89(1), 1–16. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(03\)00040-3](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(03)00040-3)
- Zhang, Y., Dubé, M. A., McLean, D. D., & Kates, M. (2003b). Biodiesel Production from Waste Cooking Oil: 2. Economic Assessment and Sensitivity Analysis. *Bioresource Technology*, 90(3), 229–240. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(03\)00150-0](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(03)00150-0)