

12º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

ANÁLISE ECONÔMICA DA PRODUÇÃO DE BIODIESEL A PARTIR DO ÓLEO DE MACAÚBA E DO ÓLEO DE SOJA

AUTORES:

Gabriel de Figueiredo da Costa¹, Manuela dos Santos Reaes¹, Raquel Massad Cavalcante¹, André Ferreira Young²

INSTITUIÇÃO:

¹Escola de Química (EQ), Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ),

²Departamento de Eng. Química e de Petróleo, Universidade Federal Fluminense (UFF)

ANÁLISE ECONÔMICA DA PRODUÇÃO DE BIODIESEL A PARTIR DO ÓLEO DE MACAÚBA E DO ÓLEO DE SOJA

Resumo

O presente estudo visou comparar técnica e economicamente a obtenção de biodiesel metílico a partir de óleo de macaúba e de soja, por meio de simulações, correlações de custo e fluxos de caixa. A rota adotada foi a catálise homogênea alcalina para ambos os casos. Uma simulação foi conduzida para cada processo, visando obter dados dos equipamentos e das correntes dos processos. Utilizando o software Aspen Plus® v12, as plantas industriais foram simuladas considerando condições operacionais similares, porém adaptadas às necessidades específicas de cada matéria-prima. Inicialmente, os componentes foram selecionados para representar a composição dos óleos, aproximando-se dos triglicerídeos principais de cada oleaginosa. Posteriormente, simulou-se a etapa de pré-tratamento para remoção dos ácidos graxos livres por esterificação, seguida da reação principal de transesterificação. A capacidade de processamento assumida foi de 1.000 kg/h para cada óleo. Para a macaúba, considerou-se que o óleo conteria 5% de ácidos graxos e 95% de triglicerídeos; já para o óleo de soja, foi considerada a composição de 0,5% de ácidos graxos e 99,5% de triglicerídeos (em todos os casos, em base molar). As simulações resultaram na produção estimada de 979 kg/h de biodiesel de macaúba e 978 kg/h de biodiesel de soja. Ambos os processos compartilharam a mesma quantidade de equipamentos, que foram dimensionados, tendo sido obtidas dimensões similares, além de correntes e consumos energéticos de mesma grandeza. Na análise econômica, os custos de capital (CAPEX) de cada planta foram estimados em cerca de US\$ 21 milhões. Já os custos operacionais (OPEX) de cada planta foram estimados em cerca de US\$ 18 milhões por ano, correspondendo a 85% do CAPEX a cada ano de operação. Os resultados dos fluxos de caixa mostraram que ambas as plantas seriam viáveis caso o biodiesel produzido fosse vendido a um valor cerca de 15% acima dos valores de referência publicados pela ANP para a data-base da análise, que foi o ano de 2022. Por outro lado, as plantas também seriam viáveis caso o óleo bruto fosse comprado com um desconto de cerca de 20% em relação ao preço do óleo de soja disponível no mercado, resultando na produção de biodiesel competitivo em relação aos valores de referência da ANP. Os resultados encontrados mostram que não há diferença significativa na produção de biodiesel a partir da soja e da macaúba, tanto em termos técnicos quanto econômicos, o que pode contribuir para o uso da macaúba como matéria-prima alternativa para produção de biodiesel no País.

Palavras-chave: soja, macaúba, transesterificação, biodiesel.

Abstract

The present study aimed to compare, both technically and economically, the production of methyl biodiesel from macauba palm oil and soybean oil using simulations, cost correlations, and cash flow analyses. Alkaline homogeneous catalysis was employed for both cases. A simulation was conducted for each process to gather equipment data and process streams using Aspen Plus® v12 software. Industrial plants were simulated under similar operational conditions, tailored to the specific needs of each raw material. Initially, components were selected to represent the oil compositions, focusing on the main triglycerides of each oilseed. Subsequently, a pretreatment step simulated the removal of free fatty acids through esterification, followed by the main transesterification reaction. Processing capacity was defined as 1,000 kg/h for each oil. Macauba palm oil was assumed to contain 5% fatty acids and 95% triglycerides, while soybean oil was assumed to have 0.5% fatty acids and

99.5% triglycerides (in all cases, on a molar basis). Simulations estimated a production of 979 kg/h of macauba palm biodiesel and 978 kg/h of soybean biodiesel. Both processes shared the same equipment quantity, sized similarly, with comparable streams and energy consumption. In the economic analysis, the capital costs (CAPEX) for each plant were estimated at approximately US\$ 21 million. Operational costs (OPEX) were estimated at around US\$ 18 million per year, corresponding to 85% of CAPEX annually. Cash flow results indicated that both plants would be feasible if the biodiesel produced were sold at a price approximately 15% higher than the reference values published by ANP for the analysis base year of 2022. Alternatively, the plants would also be viable if crude oil were purchased at a discount of about 20% compared to the market price of soybean oil, resulting in competitive biodiesel production relative to ANP reference values. The findings showed no significant difference in biodiesel production from soybean and macauba palm oil, both technically and economically, suggesting that macauba palm could be a feasible alternative feedstock for biodiesel production in the country.

Keywords: soybean, macauba, transesterification, biodiesel.

Introdução

No âmbito dos combustíveis mais comumente utilizados, o diesel ocupa espaço relevante no mercado sendo ele um dos grandes produtos do beneficiamento do petróleo. Portanto, desde 2004, com o início do Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB), o governo brasileiro tem tido investimentos que tornasse atrativo ao produtor agrícola o cultivo de culturas em que seus grãos viessem a ser úteis para a geração de biodiesel. Quase vinte anos se passaram desde que o programa foi institucionalizado, e desde então muitos estudos foram feitos com intuito de compreender quais variáveis poderiam ser modificadas de modo a tornar o valor de mercado maior, minimizando custos e maximizando a produtividade.

Tendo sob perspectiva a tendência global de procurar métodos ainda mais sustentáveis, estudos têm sido feitos para localizar na natureza, em especial nas espécies nativas, matéria prima capaz de atender às demandas do mercado, desenvolver localmente os pequenos agricultores e ser cultivada de modo a proteger o meio ambiente na qual ela está envolvida, favorecendo assim a produção sustentável de biodiesel a fim de atender aos objetivos do desenvolvimento nacional e da transição energética.

Sendo assim, deseja-se no presente trabalho realizar a comparação econômica entre os processos de obtenção de biodiesel a partir do óleo de duas diferentes matérias-primas: a macaúba e a soja. A rota catalítica utilizada foi a catálise homogênea para ambas as situações.

Em trabalho anterior, o arranjo produtivo escolhido foi avaliado tecnicamente por meio de uma simulação computacional (COSTA *et al.*, 2023) para cada uma das duas matérias primas comparadas, e no presente trabalho foi realizada uma análise econômica por meio da estimativa de seu custo de investimento (CAPEX) e custo operacional (OPEX), realizando-se um fluxo de caixa para análise da viabilidade econômica do projeto.

Metodologia

Uma simulação usando o software comercial Aspen Plus® versão 12 foi feita para cada processo, em trabalho anterior (COSTA *et al.*, 2023), onde são apresentados os dados dos equipamentos, correntes materiais e fluxos energéticos em ambas as plantas industriais comparadas.

Na análise econômica realizada, a nível conceitual (correspondendo à classe 4 na classificação AACEI, com incerteza de -30% a +50%), os custos de investimento ou CAPEX foram estimados para todos os equipamentos simulados considerando a metodologia CapCost (EPE, 2018), que tem como data-base o ano de 2001. Os custos foram atualizados de 2001 para 2022 utilizando o índice de custo de plantas de engenharia química (Chemical Engineering Plant Cost Index, CEPCI). Segundo Turton *et al.* (2018), por meio desta metodologia é possível estimar o valor total de investimento, ou seja, custo de capital para uma planta química, utilizando-se equações construídas e calibradas com base em informações do mercado. A forma geral das equações utilizadas no CapCost é apresentada nas Equações 1 e 2.

$$CUSTO (US\$_{2001}) = 10^{\{K_1 + K_2 \cdot \log(S) + K_3 \cdot \log(S)^2\}} \cdot (B_1 + B_2 \cdot F_m \cdot F_p) \quad [1]$$

$$F = 10^{\{C_1 + C_2 \cdot \log(P) + C_3 \cdot \log(P)^2\}} \quad [2]$$

onde: S representa um parâmetro ou dimensão típicos do equipamento;

P representa a maior pressão de trabalho do equipamento, em bar;

K_i, B_i e C_i (i = 1,2,3...) são parâmetros das correlações específicas de cada tipo de equipamento;

F_p e F_m são índices respectivamente chamados de “fator de pressão” e “fator de material”.

As equações do CapCost são então utilizadas para se estimar o custo FOB (do inglês *free on board*, que significa o custo do produto no ponto de carregamento para venda) de cada equipamento, considerando como material básico o ferro fundido com espessura típica (parte da correlação que não envolve os fatores) e modificando-o (por meio dos fatores) para representar equipamentos feitos em outros materiais e com outras espessuras.

Na Tabela 1, são apresentados os parâmetros de custo utilizados para cada tipo de equipamento.

Tabela 1. Parâmetros de custo utilizados para cada tipo de equipamento

Equipamento	K1	K2	K3	B1	B2	C1	C2	C3	Fm
Trocador de calor casco-e-tubo (S = área em m ² ; P<5 bar)	3,99	0,07	0,24	1,74	1,55	0	0	0	2,73
Bomba alternativa (S = potência em kW; P<10 bar)	3,87	0,32	0,12	1,89	1,35	0	0	0	2,35
Cascos/Vasos de pressão verticais (S = volume em m ³ ; P qualquer)	3,4974	0,4485	0,1074	2,25	1,82	*	*	*	3,10
Vasos de pressão horizontais (S = volume em m ³ ; P qualquer)	3,5565	0,3776	0,0905	1,49	1,52	*	*	*	1,00
Clarificador (S = potência em kW; P<10 bar)	4,5097	-0,8269	0,1344	0	1	0	0	0	1,50

* no caso dos vasos de pressão, o fator de pressão é dado por $F_p = \{ [(P+1) D] / 2 [849,6 - 0,6 (P+1)] \} + 0,00315$, onde P é a pressão do vaso (em bar) e D é o diâmetro do vaso (em metros).

Fonte: adaptado de Turton *et al.* (2018).

Os valores foram atualizados de 2001 para 2022 multiplicando-se o custo por 816,0 (CEPCI de 2022) e dividindo-o por 394,3 (CEPCI de 2001). Após o cálculo do custo dos principais equipamentos, o CAPEX total da planta foi estimado multiplicando-se esta soma pelo fator de Lang de 4,74 (SEIDER *et al.*, 2003), pelo fator de tropicalização de 1,7 (EPE, 2018), e pelo fator de 1,15 referente ao acréscimo do capital de giro (SEIDER *et al.*, 2003).

No caso dos custos operacionais ou OPEX, estes são compostos por custos diretos e indiretos. Entre os custos diretos inclui-se o custo com matéria prima, com utilidades, com o tratamento de resíduos, o custo de mão de obra, da manutenção e reparos, bem como suprimentos operacionais, patentes e custos laboratoriais. Os preços considerados para os insumos e utilidades dos processos descritos tiveram como base a literatura especializada e relatórios de governo com datas recentes, sendo corrigidos para 2022.

O óleo de macaúba não tem o seu preço divulgado amplamente em bases de dado online para grandes volumes como os do óleo de soja, da ordem de toneladas, apenas para pequenas quantidades e para consumo cosmético; sendo assim, o valor do óleo de macaúba foi considerado ora como o mesmo preço do óleo de soja (para comparação da viabilidade, caso os preços sejam os mesmos), ora como um resultado do presente estudo (para análise do máximo preço que garantiria a viabilidade do processo).

Para o caso da eletricidade, o custo foi obtido através de uma média anual realizada pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), que indicou um valor correspondente a US\$ 31,59 /GJ como sendo a média do Brasil para o ano de 2022, considerando apenas indústrias (EPE, 2023). Já no que diz respeito aos valores das demais utilidades, estes foram obtidos a partir do livro de Turton *et al.* (2018), com exceção do vapor superaquecido (27 bar) entrando a 500°C e saindo a 400°C dos refeedores, que foi obtido a partir de Zhang *et al.* (2003).

O custo de mão de obra, por sua vez, foi estimado com base no número de operários, que pode ser estimado por meio da fórmula descrita por Turton *et al.* (2018), apresentada na Equação 3:

$$N_{op} = (6,29 + 31,7 \cdot P^2 + 0,23 \cdot NP)^{0,5} \quad [3]$$

onde: N_{op} é o número de operários por turno;

P é o número de equipamentos envolvendo manuseio de sólidos que, neste trabalho, vale 1;

NP é a quantidade de equipamentos que não envolvem o manuseio de sólidos, desconsiderando vasos e bombas; neste trabalho foi considerado o valor de 9.

Para obtenção do custo total de mão de obra, multiplicou-se o número de operários por turno pelo valor do salário e pelo número de turnos (considerando 3 turnos para operação contínua). Para o salário, foi considerada a média anual para operadores industriais no Brasil, igual a cerca de R\$ 4.000 (cerca de US\$ 800) por mês, resultando em cerca de US\$ 1,45 por hora (GLASSDOR, 2023). Assumiu-se operação industrial de 24 horas por dia e 330 dias por ano, totalizando um total de 7.920 horas anuais.

A partir do custo total de mão de obra (do inglês, *cost of operating labour*, COL), do custo fixo total (do inglês, *cost of fixed capital*, CFC) e do custo total de produção (do inglês, *cost of total production*, CTP), foram estimados os demais custos diretos, custos indiretos e despesas gerais (YOUNG, 2015). Na Tabela 2, são apresentadas as rubricas de custo que incidem sobre o custo total da mão de obra para compor o OPEX total.

Tabela 2. Rubricas que compõem o OPEX

Rubrica	Abreviação	Fórmula
Outros Custos Diretos (excluindo insumos, utilidades e mão de obra)		
Supervisão Técnica	CSC	$CSC = 0,15 \cdot COL$
Manutenção e Reparos	CMR	$CMR = 0,06 \cdot CFC$
Suprimentos Operacionais	COS	$COS = 0,15 \cdot CMR$
Encargos de Laboratório	CLC	$CLC = 0,15 \cdot COL$
Patentes e Royalties	CPR	$CPR = 0,03 \cdot CTP$
Custos Indiretos		
Empacotamento e Estocagem	COPS	$COPS = 0,60 \cdot (COL + CSC + CMR)$
Impostos Locais	LT	$LT = 0,015 \cdot CFC$
Juros	IN	$IN = 0,005 \cdot CFC$
Despesas Gerais		
Custos Administrativos	CAD	$CAD = 0,25 \cdot COPS$
Distribuição e Venda dos Produtos	CDS	$CDS = 0,10 \cdot CTP$
Pesquisa e Desenvolvimento	CRD	$CRD = 0,05 \cdot CTP$

Fonte: elaboração própria.

Cabe ressaltar que algumas rubricas (Patentes e *Royalties* - CPR, Distribuição e Venda dos Produtos - CDS, Pesquisa e Desenvolvimento - CRD) dependem do custo total de produção (CTP), que as inclui. Portanto, seu cálculo é feito de forma implícita, após a estimativa de todas as outras rubricas.

Os fluxos de caixa descontados foram calculados a partir da estimativa da receita total (venda de limoneno, biogás e adubo), das despesas (custo de investimento e custos de produção e/ou operação) e da depreciação da biorrefinaria, permitindo-se estimar o lucro líquido, trazido então a valor presente. Para o caso da receita total, ela foi calculada levando em consideração as vazões mássicas dos produtos e seus preços. Já os custos de produção podem ser calculados com base nas vazões mássicas de insumos e utilidades, e seus respectivos custos. O CAPEX total foi calculado como descrito anteriormente a partir do valor dos principais equipamentos, e a depreciação anual foi calculada como o CAPEX dividido pelo número de anos de vida útil (depreciação linear).

O Lucro Antes do Imposto de Renda (LAIR) foi então calculado pela subtração da receita total pelo CAPEX, OPEX e depreciação. A partir do LAIR, calcula-se o imposto de renda (IR) e a Contribuição Social sobre o Lucro Líquido (CSLL). O lucro líquido anual pode ser calculado pela diferença entre o LAIR e o IR+CSLL, somando-se novamente a depreciação que foi subtraída anteriormente (pois não se trata de uma despesa de fato, apenas uma despesa contábil para fins de impostos). Já o valor presente do fluxo de caixa de cada ano, e o valor presente líquido, são calculados pelas Equações 4 e 5:

$$VP_i = LLi / (1 + TD)^i \quad [4]$$

$$VPL = \sum VP_i \quad [5]$$

onde: i é o ano;

VP_i é o valor presente do fluxo de caixa do ano i ;

LLi é o lucro líquido no ano i ;

TD é a taxa de desconto utilizada; e

VPL é o valor presente líquido do projeto.

Para a realização das etapas de cálculo descritas, foram considerados no Fluxo de Caixa Descontado: tempo de construção de 1 ano (investimento aplicado no ano “zero”); tempo de operação de 10 anos; IR de 25% do LAIR ao ano; CSLL de 9% do LAIR ao ano; TD de 10% ao ano.

Resultados e Discussão

Na análise técnica, tendo como base a entrada de 1.000 kg/h de cada um dos óleos, resultou-se na produção de 957 kg/h de biodiesel de macaúba e 956 kg/h de biodiesel de soja (0,1% de diferença na produtividade).

No fluxo de caixa a nível conceitual, baseado nos dados dos equipamentos, o CAPEX das plantas também apresentou resultados similares, conforme apresentado na Tabela 3. Percebe-se uma alta contribuição dos condensadores das colunas de destilação, que representaram 50% do custo total dos equipamentos. Estes equipamentos poderiam, portanto, ser otimizados em trabalho futuro para que o custo total de investimento da planta tenha uma redução, favorecendo o fluxo de caixa.

Tabela 3. Resultados obtidos para o CAPEX

CAPEX	CUSTO - SOJA (US\$ 2022)	CUSTO - MACAÚBA (US\$ 2022)
Trocador de Calor 01	146.457,01	154.900,26
Vaso de Flash 01	8.650,57	8.804,97
Coluna de Extração 01	42.715,09	43.625,46
Reator de Esterificação	10.090,69	10.090,53
Reator de Transesterificação	21.854,57	22.498,44
Coluna de Extração 01	43.709,91	44.154,05
Coluna de Destilação	84.350,88	85.068,98
Condensador	1.133.272,99	1.122.303,68
Vaso de Flash 02	5.715,82	5.711,53
Trocador de Calor 02	158.759,72	158.947,24
Refrervador	126.731,16	126.421,46
Bomba 01	67.519,11	67.516,42
Bomba 02	71.776,73	72.636,17
Neutralizador	6.582,58	6.576,41
Clarificador	324.774,19	326.102,70
Decantador	7.638,06	7.629,18
TOTAL EQUIPAMENTOS (US\$ 2022)	2.260.599,07	2.262.987,48
TOTAL DA PLANTA (US\$ 2022)	10.715.239,60	10.726.560,65
TOTAL TROPICALIZADO (US\$ 2022)	18.215.907,31	18.235.153,10
CAPITAL DE GIRO (US\$ 2022)	2.732.386,10	2.735.272,97
INVESTIMENTO TOTAL (US\$ 2022)	20.948.293,41	20.970.426,07

Fonte: elaboração própria.

O OPEX total foi estimado em valores igualmente similares, conforme apresentado na Tabela 4. No caso do OPEX, o custo dos óleos brutos (de soja ou de macaúba) representou 90% do custo de insumos e utilidades, e no caso da receita total da planta, 92% seria associada à venda do biodiesel produzido, com o glicerol residual representando 7% do valor de vendas e o restante sendo correspondente ao sulfato de sódio produzido durante a neutralização. Uma possibilidade a ser estudada seria a conversão do glicerol em produtos de maior valor agregado, e a realização desta etapa adicional poderia contribuir para o fluxo de caixa dos projetos.

Tabela 4. Resultados obtidos para o OPEX

OPEX	VALOR - SOJA (US\$ 2022 / ano)	VALOR - MACAÚBA (US\$ 2022 / ano)
Tratamento de efluentes	2.944,01	2.928,18
Água para lavagem	289,87	289,87
Metanol	655.365,33	649.609,84
Óleo	10.485.129,60	10.485.129,60
Água de resfriamento	4.993,03	5.050,80
Vapor (1 bar)	5.497,57	5.516,40
Vapor (27 bar)	273.488,27	269.245,27
Eletricidade	1.257,09	1.285,65
NaOH	88.211,52	88.211,52
H2SO4	108.154,33	108.154,33
CaCl2	7.529,70	7.348,58
INSUMOS E UTILIDADES (US\$ 2022 / ano)	11.632.860,32	11.622.770,06
MÃO DE OBRA (US\$ 2022 / ano)	218.056,94	218.056,94
OUTROS CUSTOS DIRETOS (US\$ 2022 / ano)	1.322.314,69	1.323.642,65
CUSTOS INDIRETOS (US\$ 2022 / ano)	1.170.550,10	1.171.627,86
DESPESAS GERAIS (US\$ 2022 / ano)	201.557,99	201.731,20
OUTRAS DESPESAS (US\$ 2022 / ano)	3.192.879,52	3.191.230,69
OPEX TOTAL (US\$ 2022 / ano)	17.738.219,55	17.729.059,39

Fonte: elaboração própria.

No fluxo de caixa realizado, devido aos valores de CAPEX e OPEX serem similares entre os processos, notou-se pouca diferença dentre os VPLs, sendo o resultado igual a US\$ -11,01 milhões para o processo que possui como matéria prima a macaúba, e US\$ -11,04 milhões para o que considera a soja. Observa-se que ambos os processos apresentam leve prejuízo considerando os valores de mercado compilados.

A partir da avaliação do preço de equilíbrio (que considera o VPL igual a zero e identifica o valor ideal para um dos parâmetros), ao considerar apenas o custo do biodiesel, observou-se os preços de equilíbrio de US\$ 2,6847 /kg para o biodiesel de macaúba e US\$ 2,6854 /kg para o biodiesel de soja. Percebe-se que os valores estão apenas cerca de 15% acima do valor do biodiesel no mercado (US\$ 2,3586 /kg).

Já no que diz respeito ao parâmetro do preço de equilíbrio para o óleo bruto, ou seja, o máximo valor do óleo de macaúba ou do óleo de soja para que a planta seja viável, foi obtido um valor de US\$ 1,0681 /kg para o óleo de macaúba e US\$ 1,0678 /kg para o óleo de soja. Ou seja, um desconto de cerca de 20% em relação ao preço do óleo de soja no mercado (US\$ 1,3239 /kg) poderia viabilizar tais plantas.

Conclusões

Na análise econômica a nível conceitual que foi realizada no presente estudo, embora ambos os processos tenham se mostrado marginalmente inviáveis economicamente (VPL negativo em cerca de US\$ 11 milhões), foi observada uma grande similaridade entre os custos e entre os fluxos de caixa de ambas as plantas, considerando processos idênticos para cada um dos óleos comparados: soja ou macaúba.

Sendo assim, poderia ser alcançada a viabilidade da produção de biodiesel a partir do óleo de macaúba caso ocorra em um modelo similar ao utilizado pelas plantas de biodiesel de soja que puderam ser viabilizadas atualmente, com o auxílio de créditos de carbono ou outras fontes de financiamento.

As plantas de biodiesel de macaúba também seriam vantajosas para a produção local, caso o transporte do biodiesel de soja a partir dos centros produtores seja igual ou maior que 15% do valor do biodiesel em si; ou caso o óleo de macaúba possa ser obtido por um valor cerca de 20% menor do que de soja.

Agradecimentos

Este trabalho foi realizado com auxílio financeiro do Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (PRH-ANP), suportado com recursos de investimento de empresas petrolíferas enquadradas na Cláusula PD&I da Resolução ANP nº. 50/2015.

Referências Bibliográficas

COSTA, G.F.; REAES, M.S.; CAVALCANTE, R.M.; YOUNG, A.F. Simulação e Análise Comparativa da Produção de Biodiesel a partir do Óleo de Macaúba e do Óleo de Soja. Anais do 24º Congresso Brasileiro de Engenharia Química, 2023.

Empresa de Pesquisa Energética – EPE. Compilação de Correlações de Custos de Equipamentos (2018).

Empresa de Pesquisa Energética – EPE. Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2023.

GLASSDOOR - Engineer Plant Engineer salários (Brasil) - Atualizado em 16 de jun. de 2023.

SEIDER, W. D.; SEADER, J. D.; LEWIN, D. R. Product and Process Design Principles - Synthesis, Analysis, and Evaluation. 4ª ed. John Wiley and Sons, Inc, 2016.

TURTON, R.; SHAEIWITZ, J. A.; BHATTACHARYYA, D.; WHITTING, W. B. Analysis, synthesis and design of chemical processes. Pearson Education: 5ª edição, 2018.

YOUNG, A. F.; Comparação da Produção de Biodiesel a partir dos óleos de Soja e de Dendê com Etanol via Catálise Homogênea Alcalina. Fevereiro de 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Grau de Engenheiro Químico). UFRJ. Rio de Janeiro.

ZHANG, Y.; DUBÉ, M. A.; MCLEAN, D. D.; KATES, M. Biodiesel production from waste cooking oil: 2. Economic assessment and sensitivity analysis. Bioresource Technology, v. 90, n. 3, p. 229–240, 2003.