

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



TÍTULO DO TRABALHO:

ANÁLISE ECONÔMICA DE BIORREFINARIA PARA PRODUÇÃO DE LIMONENO, ADUBO E BIOMETANO A PARTIR DA CASCA DE LARANJA

AUTORES:

Gabriel de Figueiredo da Costa¹, Pedro Vedolin Lima¹, Raquel Massad Cavalcante¹, André Ferreira Young², Ofélia de Queiroz Fernandes Araújo¹

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 DE BIORREFINARIA PARA PRODUÇÃO DE LIMONENO, ADUBO E BIOMETANO A PARTIR DA CASCA DE LARANJA

Resumo

Os resíduos de processamento de frutas representam 50-75% (em massa) da fruticultura, e atualmente têm sido destinados a aterros, podendo causar a proliferação de patógenos e perturbar a microbiota ambiental. Há um forte apelo pela utilização desse resíduo com sua valorização, por exemplo, para produção de suplementos nutricionais, bioprodutos e biocombustíveis. Sendo assim, esse trabalho teve como objetivo realizar o dimensionamento e a análise econômica de uma biorrefinaria de resíduo de laranja, tendo como objetivo a produção de biometano enquanto corrente energética e limoneno enquanto bioproduto de alto valor agregado, através da extração com CO₂ supercrítico seguida de biodigestão do resíduo e tratamento da corrente gasosa gerada. A biorrefinaria foi simulada no software Aspen Plus® v12, tendo como base a entrada de 1.000 toneladas/dia de cascas de laranja, o que resultou na produção de 44 toneladas/dia de limoneno, 16 mil m³/dia de biometano e 941 toneladas/dia de digestato, que poderia ser utilizado como adubo. Os dados obtidos na simulação foram utilizados para o dimensionamento e para a estimativa dos custos dos equipamentos referentes à biorrefinaria, por meio de correlações de custo disponíveis da literatura, corrigidas para o ano de 2022 por meio do índice de custos de capital para plantas de engenharia química (CEPCI). Os custos dos equipamentos, por sua vez, foram utilizados para a estimativa de custos de investimento (CAPEX) e custos operacionais (OPEX) da planta industrial completa. O CAPEX da biorrefinaria foi estimado em US\$ 214 milhões, com OPEX de US\$ 68 milhões ao ano (correspondentes a 32% do CAPEX), já incluindo insumos, utilidades, mão-de-obra, manutenção, supervisão, administração e demais custos. A partir dos resultados obtidos, foi realizado um fluxo de caixa descontado, utilizando uma taxa interna de retorno (TIR) típica de 13,5%, resultando em um valor presente líquido (VPL) de US\$ 31 milhões e concluindo-se pela viabilidade econômica do empreendimento, com *payback* no oitavo ano de operação. Ressalta-se que estes resultados dependem fortemente dos parâmetros utilizados nos cálculos, que por sua vez podem variar conforme os condicionantes de mercado que se façam presentes na época da implantação e operação da biorrefinaria. Os valores de custo são classificados na classe 4 de incerteza segundo a classificação da Associação Internacional para Avanço da Engenharia de Custos (AACI).

Palavras-chave: laranja, biometano, limoneno, extração com fluido supercrítico.

Abstract

Fruit processing residues represent 50-75% (by mass) of fruit production and are currently being disposed of in landfills, which can lead to pathogen proliferation and disrupt environmental microbiota. There is a strong appeal for utilizing this waste while increasing its value, such as producing nutritional supplements, bioproducts, and biofuels. Therefore, this study aimed to size and economically analyze an orange waste biorefinery, focusing on producing biomethane as an energy stream and limonene as a high-value bioproduct. This involved supercritical CO₂ extraction of orange peel followed by anaerobic digestion of the residue and treatment of the resulting gas stream. The biorefinery was simulated using Aspen Plus® v12 software, based on an input of 1,000 tons/day of orange peels, resulting in daily production of 44 tons of limonene, 16,000 m³ of biomethane, and 941 tons of digestate, which could be used as fertilizer. Simulation data were used to size equipment and estimate biorefinery costs using cost

correlations from literature adjusted to 2022 using the Chemical Engineering Plant Cost Index (CEPCI). Equipment costs were then used to estimate the capital expenditure (CAPEX) and annual operating costs (OPEX) of the industrial plant. The biorefinery's CAPEX was estimated at US\$ 214 million, with annual OPEX of US\$ 68 million (32% of CAPEX), covering inputs, utilities, labor, maintenance, supervision, administration, and other costs. Based on these results, a discounted cash flow analysis was performed using a typical internal rate of return (IRR) of 13.5%, yielding a net present value (NPV) of US\$ 31 million, indicating the economic viability of the project with an eighth-year payback period. It is noted that these results heavily depend on the parameters used, which can vary based on market conditions during biorefinery implementation and operation. The cost values fall under Class 4 uncertainty according to the Association for the Advancement of Cost Engineering International (AACEI) classification.

Keywords: orange, biomethane, limonene, supercritical fluid extraction.

Introdução

Os resíduos do processamento de frutas representam de 50% a 75% (em massa) da fruticultura. Esses resíduos semissólidos têm sido destinados a aterros, podendo causar a proliferação de patógenos e perturbar a microbiota ambiental. Há um forte apelo na utilização desse resíduo com sua valoração, por exemplo, na produção de suplementos nutricionais, bioprodutos e biocombustíveis (STANISIC *et al.*, 2022). Destaca-se que a valoração de resíduos do agronegócio em uma estratégia de economia circular (LEONG *et al.*, 2021), quando integrada à geração de energia em biorrefinarias, possibilita avançar a economia sustentável de baixo carbono.

Para além das considerações ambientais, a viabilidade econômica de um processo produtivo continua sendo fator determinante para a sua implementação industrial, e esta é favorecida pelo aumento de receitas trazido pela máxima utilização do recurso natural (o agorresíduo), com a geração de bioproduto. Desta forma, no âmbito da geração de energia baseada em resíduos agroindustriais, verifica-se a possibilidade de geração de biogás viabilizada economicamente pela extração de bioprodutos de alto valor agregado dos resíduos.

Sendo assim, o presente trabalho teve como objetivo definir um arranjo produtivo de biorrefinaria que potencialize o desempenho econômico de bioenergia pela co-produção de bioproduto de agorresíduo por extração com CO₂ supercrítico (FSC-CO₂). Especificamente, como um estudo de caso com o intuito de exemplificar e implementar a tecnologia em pauta, a pesquisa focou no resíduo do processamento de laranja, com extração de limoneno e destinação do resíduo exaurido para a geração de energia via biodigestão com produção de biogás, purificado a biometano para sua venda ao mercado.

Em trabalho anterior, o arranjo produtivo escolhido foi avaliado tecnicamente por meio de uma simulação computacional (COSTA *et al.*, 2023), 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

Os dados dos equipamentos, vazões de correntes materiais e fluxos de energia na planta estudada foram obtidos por meio de simulação computacional utilizando o programa Aspen Plus® v12, e são apresentadas detalhadamente em Costa *et al.* (2023).

Na análise econômica realizada, a nível conceitual (correspondendo à classe 4 na classificação ACEI, com incerteza de -30% a +50%), os custos de investimento ou CAPEX foram estimados para todos os equipamentos simulados considerando a metodologia CapCost (EPE, 2018a), 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 ($i = 1, 2, 3, \dots$) 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
Compressor centrífugo (S = potência em kW; P>10 bar)	2,2891	1,3604	-0,1027	1,63	1,66	-0,0016	-0,00627	0,0123	2,7
Trocador de calor casco-e-tubo (S = área em m²; P>5 bar)	4,3247	-0,303	0,1634	1,63	1,66	-0,0016	-0,00627	0,0123	2,7
Bomba centrífuga (S = potência em kW; P>10 bar)	3,87	0,32	0,12	1,89	1,35	-0,0016	-0,00627	0,0123	2,35
Vasos de pressão (S = volume em m³; P qualquer)	3,4974	0,4485	0,1074	2,25	1,82	*	*	*	3,1
Tanques com teto removível (S = volume em m³; P<10 bar)	9,3012	-0,0449	0,0488	0	1	0	0	0	1,0

* 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, 2018a), 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 – como as cascas de laranja transportadas até a biorrefinaria, e a monoetanolamina utilizada na purificação do biogás –, com utilidades – como energia elétrica, combustível, vapor –, 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, preferencialmente o ano de 2022. Nos casos em que não havia dados disponíveis para 2022, foram consultados os últimos dados disponíveis, que foram indexados a 2022 pelos índices adequados (indicados caso a caso, quando necessário). Após a compilação de valores médios, o custo com insumos foi calculado diretamente, realizando a multiplicação das vazões ou taxas anuais que a planta utiliza pelo preço individual de cada componente. 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).

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 13,5% ao ano (EPE, 2018b).

Resultados e Discussão

Na análise técnica, por meio de simulações computacionais, e tendo como base a entrada de 1.000 toneladas/dia de cascas de laranja na biorrefinaria, foi estimado que seria possível a produção de 44 toneladas/dia de limoneno, 16 mil m³/dia de biometano e 941 toneladas/dia de digestato.

No fluxo de caixa a nível conceitual, baseado nos dados dos equipamentos, o CAPEX da biorrefinaria foi estimado em US\$ 214 milhões, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3. Resultados obtidos para o CAPEX

CAPEX	CUSTO (US\$ 2022)
Turbina	78.950,51
Compressor	451.722,97
Bomba	112.689,83
Resfriador	142.082,59
Extrator supercrítico	14.578.989,38
Tanques de biodigestão	5.594.116,43
Reator de lavagem com MEA	1.118.084,50
Reator de recuperação de MEA	464.529,61
Aquecedor	549.931,38
TOTAL EQUIPAMENTOS (US\$ 2022)	23.091.097,20
TOTAL DA PLANTA (US\$ 2022)	109.451.800,72
TOTAL TROPICALIZADO (US\$ 2022)	186.068.061,22
CAPITAL DE GIRO (US\$ 2022)	27.910.209,18
INVESTIMENTO TOTAL (US\$ 2022)	213.978.270,40

Fonte: elaboração própria.

O OPEX total foi estimado em US\$ 68 milhões ao ano (correspondentes a 32% do CAPEX), já incluindo insumos, utilidades, mão de obra, manutenção e demais custos, conforme apresentado na Tabela 4.

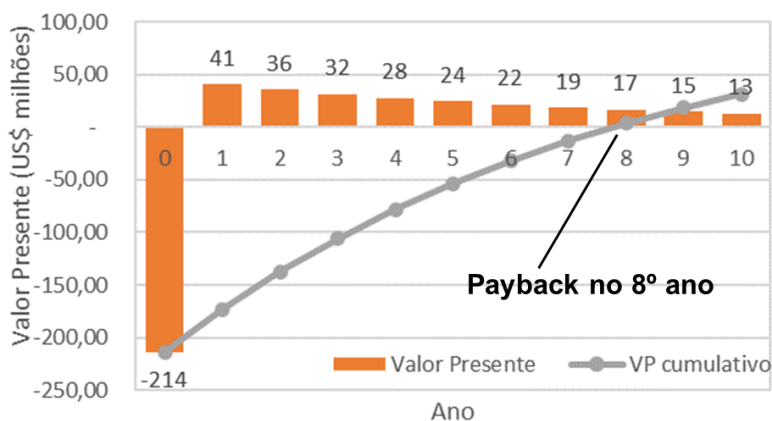
Tabela 4. Resultados obtidos para o OPEX

OPEX	VALOR (US\$ 2022 / ano)
Cascas de laranja	30.289.050,00
MEA para reposição	97.185,00
Água de resfriamento	2.018,45
Vapor (5 bar, 160°C)	46,08
Eleticidade	87.540,09
INSUMOS E UTILIDADES (US\$ 2022 / ano)	30.475.839,62
MÃO DE OBRA (US\$ 2022 / ano)	216.801,37
OUTROS CUSTOS DIRETOS (US\$ 2022 / ano)	12.903.736,64
CUSTOS INDIRETOS (US\$ 2022 / ano)	10.569.404,38
DESPESAS GERAIS (US\$ 2022 / ano)	1.712.010,79
OUTRAS DESPESAS (US\$ 2022 / ano)	12.265.856,96
OPEX TOTAL (US\$ 2022 / ano)	68.143.649,75

Fonte: elaboração própria.

O fluxo de caixa descontado resultou em um VPL de US\$ 31 milhões, concluindo-se que a unidade industrial seria viável, com *payback* no oitavo ano de operação. Na Figura 1 apresenta-se o fluxo de caixa do projeto, a nível conceitual.

Figura 1. Fluxo de Caixa conceitual do projeto



Fonte: elaboração própria.

No que toca ao CAPEX da planta, percebe-se uma alta contribuição dos extratores, que representaram 63% do custo total dos equipamentos, seguida pelos tanques de biodigestão, representando 24% do custo total de 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.

No caso do OPEX, o custo de frete para recolher e trazer as cascas até a planta representou 99% do custo de insumos e utilidades, e no caso da receita total da planta, 98% seria associada à venda do limoneno produzido, com o biometano representando 2% do valor de vendas. Sendo assim, confirma-se a hipótese inicial de que o bioproduto de alto valor agregado apresenta grande contribuição na viabilidade da biorrefinaria, e percebe-se que o custo do resíduo de fruticultura utilizado poderia ser objeto de um estudo mais detalhado, buscando a redução em seu valor.

Conclusões

Na análise econômica a nível conceitual que foi realizada no presente estudo, foi observado que a biorrefinaria poderia se pagar em 8 anos, considerando seu CAPEX, OPEX e receitas totais.

O extrator e os tanques de biodigestão corresponderam à maior parte do custo de equipamentos, sendo que o frete das cascas de laranja até a entrada da biorrefinaria representou a maior parte do custo operacional. Sendo assim, estes pontos poderão ser melhor estudados em etapas futuras da pesquisa, buscando aprimorar o fluxo de caixa da planta estudada.

No que toca à receita total da planta, esta é quase completamente referente à venda do limoneno, o que mostra a grande importância do bioproduto, e de seu alto valor agregado, para a viabilidade do projeto.

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 de PD&I da Resolução ANP nº. 50/2015.

Referências Bibliográficas

COSTA, G.F.; LIMA, P.V.; CAVALCANTE, R.M.; YOUNG, A.F.; ARAÚJO, O.Q.F. Simulação De Biorrefinaria para Produção de Limoneno, Adubo e Biometano a Partir da Casca de Laranja. Anais do 24º Congresso Brasileiro de Engenharia Química, 2023.

Empresa de Pesquisa Energética – EPE. Compilação de Correlações de Custos de Equipamentos. Brasil: EPE, 2018a.

Empresa de Pesquisa Energética – EPE. Estudo sobre a Economicidade do Aproveitamento dos Resíduos Sólidos Urbanos em Aterro para Produção de Biometano. Brasil: EPE, 2018b.

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

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

LEONG, H.Y.; CHANG, C.; KHOO, K. S.; CHEW, K.W.; CHIA, S.R.; LIM, J.W.; CHANG, J.; e SHOW, P.. Waste biorefinery towards a sustainable circular bioeconomy: a solution to global issues. Biotechnology for Biofuels volume 14, Article number: 87, 2021.

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.

STANISÍĆ, D.; TASIĆ, M.; STAMENKOVIĆ, O.; TASIĆ, L.. Prospects and Perspectives for Producing Biodiesel, Bioethanol and Bio-Chemicals from Fruit Waste: Case Studies in Brazil and Serbia - Production of Biofuels and Chemicals from Sustainable Recycling of Organic Solid Waste. EUA: Springer, 2022.

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.