



Avaliação Econômica da Agregação de Valor na Produção de Biodiesel de Soja

Thaís Veiga Barreiros

Projeto de Final de Curso

Orientadores

Prof. Eduardo Mach Queiroz, D.Sc
Prof^ª. Raquel Massad Cavalcante, D.Sc
Prof. André Ferreira Young, D.Sc

Maio de 2019

AVALIAÇÃO ECONÔMICA DA AGREGAÇÃO DE VALOR NA PRODUÇÃO DE BIODIESEL DE SOJA

Thaís Veiga Barreiros

Projeto de Final de Curso submetido ao Corpo Docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Química.

Aprovado por:

Diego Di Domenico Pinto, D.Sc.

Fernando Luiz Pellegrini Pessoa, D.Sc.

Tatiana Felix Ferreira, D.Sc.

Orientado por:

Eduardo Mach Queiroz, D.Sc.
(orientador – presidente da banca)

Raquel Massad Cavalcante, D.Sc.
(co-orientadora)

André Ferreira Young, D.Sc.
(co-orientador)

Rio de Janeiro, RJ - Brasil

Maio de 2019

Veiga Barreiros, Thaís

Avaliação Econômica da Agregação de Valor na Produção de Biodiesel de Soja / Thaís Veiga Barreiros. -

Rio de Janeiro, 2019

154 f.

Orientador: Eduardo Mach Queiroz.

Coorientadora: Raquel Massad Cavalcante.

Coorientador: André Ferreira Young.

Trabalho de conclusão de curso (graduação) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, Bacharel em Engenharia Química, 2019.

1. Biodiesel. 2. Grão de Soja. 3. Biorrefinaria. 4. Co-produtos. I. Mach Queiroz, Eduardo, orient. II. Massad Cavalcante, Raquel, coorient. III. Ferreira Young, André, coorient. IV. Título.

AGRADECIMENTOS

A Deus por nunca me deixar perder a esperança e vontade de atingir meus objetivos, por nunca ter me desamparado e sempre ter me abençoado com sua proteção.

Aos meus pais por sempre terem me ensinado a ser forte, a pautar minhas decisões tentando sempre ser correta e justa, por terem me ensinado a importância da educação e por durante toda a minha vida nunca se pouparem para me oferecer o melhor possível. Agradeço, especialmente, a minha mãe por ter sido minha primeira professora na vida.

A minha irmã Anna, a qual considero um pouco também minha filha, que é uma bênção na minha vida e chegou para acalmar meu coração em um dos momentos mais tristes que passei.

Ao meu noivo Gabriel, meu amor desde sempre, agradeço por sempre ter estado ao meu lado, me incentivado a atingir meus sonhos, por todas as histórias e os quase 9 anos compartilhados até agora. E também sou grata por toda a sua família.

Aos meus padrinhos, avós e demais familiares, por todo o suporte que me deram até aqui. Mesmo que algumas vezes fisicamente distantes, sempre foram muito presentes na minha vida e me ensinaram o verdadeiro significado de união e família.

Aos meus amigos da vida, em especial, Gabriel Braga, Juliana Echenique, Luísa Veiga, Iago Santos, Vinicius Chaffin, Victor Daniel, Lana Mendes, Guilherme Vasconcelos, Eliza, Darlan, Paulo, Marcelle e Ana Carolina Jerdy. Agradeço por toda a ajuda que vocês me deram no ambiente acadêmico, quanto na companhia agradável que fazem na minha vida.

Aos meus atuais orientadores André Young, Eduardo Mach e Raquel Massad pelo apoio, confiança e toda a ajuda recebida. Agradeço por sempre terem me dado atenção e me ensinado muito, a experiência na UFRJ se tornou muito mais completa por ter esses orientadores. E também ao Professor João Cajaiba, meu primeiro orientador na graduação, pela orientação e por ser um professor tão querido por mim e pelos seus demais alunos.

Por fim, agradeço às equipes que me acolheram até agora em toda a minha vida profissional: Cosan, NQTR, Charles University, Guterres, P&G e GIPQ. E agradeço ao ensino público de qualidade que recebi no ensino médio e ensino superior, que possibilita que eu esteja aqui, hoje, cada vez mais perto de atingir meus sonhos.

Resumo do Projeto de Final de Curso apresentado à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Química.

AVALIAÇÃO ECONÔMICA DA AGREGAÇÃO DE VALOR NA PRODUÇÃO DE BIODIESEL DE SOJA

Thaís Veiga Barreiros
Maio, 2019

Orientadores: Prof. Eduardo Mach Queiroz, D.Sc.
Prof. Raquel Massad Cavalcante, D.Sc.
Prof. André Ferreira Young, D.Sc.

Biodiesel, produzido do grão de soja, representa uma alternativa de substituição de combustíveis fósseis e uma possibilidade de diminuição da dependência externa brasileira de diesel petroquímico. No entanto, o grão de soja possui um alto valor comercial e representa, aproximadamente, 85% dos custos de produção do biodiesel, fazendo necessários subsídios governamentais para tornar esta produção viável. Uma possível solução para esse problema seria a avaliação das etapas que ocorrem antes da transesterificação alcalina, como a extração do óleo e o refino. Durante essas etapas, alguns co-produtos com valor comercial podem ser isolados dos resíduos, tais como tocoferóis, esqualeno, farelo de soja, lecitina e a casca. Como possuem um preço de venda elevado, poderia ser avaliada a cadeia de processamento do grão de soja no contexto de uma biorrefinaria, onde o biodiesel seria apenas um dos produtos do empreendimento. Neste contexto, o presente trabalho objetiva avaliar economicamente a integração desses processos e mostrar como esses co-produtos impactam de forma positiva o desempenho econômico da biorrefinaria. Um programa foi elaborado usando GNU Octave, um software de base livre, para resolver o balanço de massa de uma biorrefinaria, localizada no sudeste do Brasil. A partir dos valores do balanço de massa, obtiveram-se as receitas e despesas da planta. Como resultado, o custo de aquisição do grão de soja continuou tendo a maior contribuição para os custos totais, mas agora representado apenas 43% dos custos diretos e 46% das despesas com matéria-prima. Para uma biorrefinaria com capacidade de processamento de 4.132.566 toneladas de grão de soja por ano, o Valor Presente Líquido, Taxa Interna de Retorno e Tempo de Retorno sobre o Investimento são de R\$ 1.155.769.036,00, 0,5 e 6 anos, respectivamente, calculados com uma Taxa Mínima de Atratividade de 25%. Esses resultados mostram a possibilidade da biorrefinaria de soja tornar-se lucrativa com a venda destes co-produtos, principalmente farelo de soja.

Abstract of a Final Course Project presented to Escola de Química as partial fulfillment of the requirements for the degree of Bachelor of Chemical Engineering.

ECONOMIC EVALUATION OF VALUE AGGREGATION IN THE PRODUCTION OF SOYBEAN BIODIESEL

Thaís Veiga Barreiros
May, 2019

Supervisor: Prof. Eduardo Mach Queiroz, D.Sc.
Prof. Raquel Massad Cavalcante, D.Sc.
Prof. Andre Ferreira Young, D.Sc.

Biodiesel, mainly produced from soybean, represents an alternative to replace fossil fuels and decrease the Brazilian external dependence on petrochemical diesel. However, soybean has a high commercial price and represents almost 85% of biodiesel production costs, which makes government subsidies necessary in order to make biodiesel production feasible. A possible solution to tackle this problem is to look to the steps before the alkaline transesterification, as the oil extraction and refining. During these stages, some co-products can be isolated from residues, for instance tocopherol, squalene, soybean meal, soybean lecithin and its hull. Since they have a high sale price, it makes sense evaluate the soybean chain as a biorefinery, as a consequence, biodiesel would be only one of the products that would make the enterprise economically viable. This work aims to economically evaluate these processes integration and to show the co-products impact on the economic performance of the biorefinery. Several data of initial investment costs were obtained from other works and they were adjusted according to current time, place, and flow rate. Moreover, a program was coded in GNU Octave, an open source software, to solve the mass balance of the integrated industry, located in Brazil, and to calculate the prices and the economic parameters. With the mass balance values, it was possible to obtain the revenue and the plant expenses. As a result, the cost of purchasing soybeans continued to have the largest contribution to total costs, but now it only represents 43% of direct costs and 46% of feedstock expenses. For a biorefinery with processing capacity of 4.132.566 tonnes of soybean grain per year, the Net Present Value, Internal Rate of Return and Payback Time are R\$ 1.155.769.036,00, 0.5 and 6 years, respectively, calculated with Minimum Attractive Rate of Return of 25%. These results show that the biorefinery could be lucrative due to the possibility of selling the co-products, above all soybean meal incomes.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – Introdução	7
1.1– Cenário Histórico e Político do Biodiesel no Brasil	7
1.2– Objetivos	9
1.3– Divisão do Trabalho	10
CAPÍTULO 2 – Revisão Bibliográfica	12
2.1 – Biocombustíveis e o Biodiesel	12
2.2 – Cenário Nacional.....	13
2.3 – Características e Propriedades Físico-Químicas do Biodiesel	17
2.4 – Matérias-primas para a Produção de Biodiesel	19
2.5 – Grão de Soja.....	21
2.6 – O Grão de Soja e seus Principais Constituintes	23
2.6.1 - Triglicerídeos e Ácidos Graxos	25
2.6.2 - Fosfolípidios	27
2.6.3 - Matéria Insaponificável	28
2.7 – Processo de obtenção do biodiesel a partir do óleo de soja	30
2.7.1 - Preparo do grão de soja	30
2.7.2 - Extração do óleo de soja.....	33
2.7.3 - Recuperação de óleo e hexano	37
2.7.4 - Refino do Óleo de Soja.....	39
2.7.5 - Produção de biodiesel a partir do óleo de soja	45
2.8 – Processos de Produção avaliados na Literatura.....	52
CAPÍTULO 3 – Processo Integrado	55
3.1 - Integração das etapas	55
3.2 - Insumos e Produtos da Biorrefinaria.....	57
3.3 - Empresas de Produção Integrada no Brasil	63
3.4 - Definições do Processo.....	64
3.5 - Estrutura de Cálculo.....	67
3.6 - Capacidade Total da Planta.....	70
3.7 - Capacidade Operacional da Planta em Função da Demanda.....	72
CAPÍTULO 4 – Análise Econômica	75

4.1 – Dados Econômicos do Processo.....	75
4.1.1 – Investimento Inicial	75
4.1.2 – Custo de Produção	79
4.2 - Fluxo de Caixa e Premissas na Avaliação Econômica	88
4.3 - Critérios na Avaliação Econômica.....	93
4.4 - Avaliação das Incertezas	96
CAPÍTULO 5 – Resultados e Discussão.....	98
5.1 – Cálculos do Balanço de Massa.....	98
5.2 – Cálculos de Investimento Inicial	102
5.3 – Cálculo dos Custos Diretos, Indiretos e Gerais.....	103
5.4 – Cálculo das Receitas.....	106
5.5 – Avaliação Econômica.....	108
5.6 – Análise de Sensibilidade	113
CAPÍTULO 6 – Conclusão e Perspectivas	115
CAPÍTULO 7 – Referências	117
ANEXOS	129

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1 - Ambiente Institucional da Soja no Brasil (MANDARINO; ROESSING; HIRAKURI, 2015)	14
Figura 2. 2 - Evolução da Produção de Biodiesel no Brasil de 2006 a 2017 (Dados Adaptados de ANP (2018a)).....	15
Figura 2. 3 - Distribuição de plantas autorizadas que produziram e que não produziram no Brasil em 2017 (ANP, 2018a).	16
Figura 2. 4 - Principais matérias-primas utilizadas no Brasil para produção de biodiesel (Dados Obtidos em ANP (2018a))	22
Figura 2. 5 - Constituintes principais do grão de soja (Traduzido de Ohyama et al.(2017)) ..	24
Figura 2. 6 - Estrutura Química dos ácidos linoleico e oleico, principais triglicerídeos do óleo de soja.	26
Figura 2. 7 - Principais Constituintes da Vitamina E (Adaptado de Guinaz et al. (2009)) ...	29
Figura 2. 8 - Fórmula Química do Esqualeno	30
Figura 2. 9 - Representação de Prensa Contínua – Tipo Expeller (SNT, 2018).....	34
Figura 2. 10 - Extrator tipo De Smet (THOMAS, 2003).....	36
Figura 2. 11 - Modelo de Extrator Tipo ROTOCEL (THOMAS, 2003)	37
Figura 2. 12 - Exemplo de Extrator SMET acoplado ao destilador (Adaptado de (BURGHART; EVRARD; INDUSTRIEL, 2019)	38
Figura 2. 13 - Esquema de Refino de Óleo.....	40
Figura 2. 14 - Representação do equipamento de Girdler de desodorização semicontínua (Adaptado de Zehnder (1995))	44
Figura 2. 15 - Reação de Transesterificação de um Triacilglicerídeo (Adaptado de Geris et al. (2007))	46
Figura 2. 16 - Obtenção de biodiesel através do Craqueamento Térmico de um triglicerídeo (Adaptado de Caixeta (2009))	50
Figura 2. 17 - Obtenção de biodiesel através da Esterificação de Triglicerídeos (Adaptado de Caixeta (2009))	51
Figura 3. 1 - Resumo das principais correntes de interesse obtidas/ reutilizadas a partir do grão de soja.....	56
Figura 3. 2 - Diagrama de blocos global de uma biorrefinaria de soja (Adaptado de Granjo; Duarte; Oliveira (2017))	57
Figura 3. 3 - Preços da tonelada do grão de soja no Brasil (Elaborado a partir de dados do Agrolink (2019)).....	58
Figura 3. 4 - Diagrama de blocos do Processo adotado.....	65
Figura 3. 5 - Estrutura de Cálculo do Processo	68
Figura 3. 6 - Produção de Biodiesel (m ³) confirmada e estimada do Sudeste (Elaboração própria a partir de ANP (2018a) e APROBIO; UBRABIO; ABIOVE (2016))	73
Figura 4. 1 - Representação esquemática do fluxo de caixa (Adaptado de Cheng (2017))....	89
Figura 4. 2 - Representação Valor Presente Líquido em função da taxa de desconto (Adaptado de Rego et al. (2010))	95

Figura 5. 1 - Comparação das quantidades (em massa) de matéria-prima utilizada	101
Figura 5. 2 - Comparação das quantidades de produtos gerados	101
Figura 5. 3 - Representação dos Custos Diretos, Indiretos e Gerais ao longo dos anos.....	104
Figura 5. 4 - Detalhamentos dos Custos Diretos	104
Figura 5.5 - Comparação dos custos das matérias- primas utilizadas	105
Figura 5. 6 - Detalhamento dos Custos Indiretos	106
Figura 5. 7 - Detalhamento das Receitas	107
Figura 5.8 - Fluxo de Caixa ao longo dos anos com TMA 25%	109
Figura 5. 9 - Fluxo de Caixa em diferentes Cenários de TMA (0, 10, 20 e 30%).....	110
Figura 5. 10 - Superfície de Resposta de VPL variando TMA e Desconto do Grão de Soja	111

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2. 1 - Capacidade de Produção de Biodiesel por Região Brasileira em 2017 (Adaptado de ANP (2018a))	15
Tabela 2. 2 - Principais constituintes do biodiesel (Adaptado de Hoekman et al. (2012)) ...	17
Tabela 2. 3 - Quantidade de matérias-primas (m ³) utilizadas na produção de biodiesel no Brasil (Adaptado de ANP (2018a))	21
Tabela 2. 4 - Capacidade de produção de grão de soja no Brasil e no mundo (Dados obtidos em Embrapa (2018))	23
Tabela 2. 5 - Distribuição em frações (%) dos principais constituintes do grão de soja (GUNSTONE, 2002)	24
Tabela 2. 6 - Composição do óleo de soja cru e refinado (GUNSTONE, 2002)	25
Tabela 2. 7 - Principais ácidos graxos presentes no óleo de soja (GUNSTONE, 2002)	26
Tabela 2. 8 - Material insaponificável no óleo de soja (GUNSTONE, 2002)	28
Tabela 2. 9 - Teor de tocoferóis no óleo prensado e óleo extraído com hexano (GUNSTONE, 2002)	29
Tabela 2. 10 - Comparativo entre utilização de etanol e metanol (SOUZA, 2011)	47
Tabela 3. 1 – Resumo dos preços adotados em R\$/ tonelada	63
Tabela 3. 2 - Descrição das correntes da estrutura de cálculo	69
Tabela 3. 3 - Dados de produção anual (m ³) de biodiesel no Brasil e no Sudeste (Dados obtidos em ANP (2018a))	71
Tabela 3. 4 - Capacidade necessária para o Sudeste	71
Tabela 3. 5 - Capacidade projetada para a planta	72
Tabela 3. 6 - Capacidade de produção de biodiesel da planta e quantidade de grão de soja utilizada	74
Tabela 4. 1 - Classificações das estimativas de investimento (Elaborado a partir do livro de Turton et al. (2009), baseado em Marques (2018))	75
Tabela 4. 2 - Classificação das estimativas de Custo de Investimento (Elaborado a partir do livro de Turton et al. (2009), baseado em Marques (2018))	76
Tabela 4. 3 - Dados de Investimento implementados em GNU Octave	79
Tabela 4. 4 - Resumo dos Custos de Produção (Elaborado a partir de Silla (2003) e Turton et al. (2009), baseado em Marques (2018))	80
Tabela 4. 5 - Resumo dos preços das matérias-primas	83
Tabela 4. 6 - Cálculo dos Custos Indiretos (Adaptado de Silla (2003) e Turton et Al. (2009))	87
Tabela 4. 7 - Cálculo dos Custos Gerais (Adaptado de Silla (2003) e Turton et Al. (2009))	88
Tabela 4. 8 - Representação do Fluxo de Caixa global (Adaptado de Rego et al. (2010))	90
Tabela 4. 9 - Preço de venda dos produtos	91
Tabela 4. 10 - Resumo do preço de compra / venda dos produtos	97
Tabela 5. 1 - Vazões mássicas (ton/h) das correntes durante a Extração	98
Tabela 5.2 - Vazões mássicas (ton/h) das correntes do início do Refino ao final da Neutralização	99

Tabela 5. 3 - Vazões mássicas (ton/h) das correntes das etapas de Lavagem ao Branqueamento	99
Tabela 5. 4 - Vazões mássicas (ton/h) das correntes do início do Refino ao final da Neutralização	100
Tabela 5. 5 - Cálculos de Investimento Inicial das principais etapas da Biorrefinaria de Soja	102
Tabela 5. 6 - Cálculo dos Custos Diretos, Indiretos e Gerais de acordo com o ano.....	103
Tabela 5. 7 - Variação da Receita da planta ao longo dos anos	106
Tabela 5. 8 - Fluxo de Caixa ao longo dos anos e com diferentes TMA	108
Tabela 5.9 – Comparação dos Parâmetros Econômicos.....	112
Tabela 5. 10 – Cálculo de Sensibilidade do VPL.....	113

Introdução

1.1– Cenário Histórico e Político do Biodiesel no Brasil

Após a ocorrência de dois choques de petróleo na década de 70, os países importadores de produtos de origem fóssil foram motivados a diminuir sua dependência externa desse tipo de produto não renovável. Com isso, os interesses pelos biocombustíveis aumentaram, almejando-se maior segurança de suprimento ou redução dos impactos financeiros (LEITE; LEAL, 2007).

Aliando-se ao fator econômico determinante, a queima de biocombustíveis em comparação aos combustíveis fósseis não adiciona mais carbono na atmosfera. Isso ocorre porque os átomos de carbono liberados pela queima dos combustíveis de origem renovável são os mesmos que foram utilizados durante o processo de fotossíntese da biomassa aplicada a produção do biodiesel (ADVANCED BIOFUELS USA, 2019; SANTOS et al., 2017). Além da redução de emissão de dióxido de carbono, uma grande vantagem do biodiesel em relação ao diesel é a redução de enxofre em sua composição. Dessa forma, durante a queima, a emissão de óxidos de enxofre é reduzida (FRANÇA, 2013).

Neste contexto foram criados, no Brasil, programas que incentivaram a produção de combustíveis automotivos de origem limpa, destacando-se, em 1975, o Programa Nacional do Álcool (Proálcool). O Proálcool visava substituir o uso de combustíveis derivados do petróleo por álcool etílico, derivado da cana de açúcar (GOVERNO FEDERAL, 2010).

No início do Proálcool, também houve uma grande tentativa de substituir o diesel petroquímico utilizando outros biocombustíveis, mas essa tentativa fracassou por conta dos baixos preços do diesel (LEITE; LEAL, 2007). Dessa forma, percebeu-se a necessidade de um programa para atender à substituição do diesel. Assim, com o objetivo de implementar um programa sustentável para produção de biodiesel, que contemplasse aspectos sociais, preços

competitivos e qualidade do produto, foi criado, em 2004, o Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB) (GOVERNO FEDERAL, 2019).

No entanto, já em 1999, existiam estudos apresentados pelo Núcleo de Assuntos Estratégicos (NAE), órgão extinto do Governo Federal, relativos aos potenciais gastos na produção de biodiesel partindo de diferentes oleaginosas. Esses relatórios apontavam que mesmo utilizando a soja, que produzia o biodiesel com menores custos, seriam necessários, na época, US\$ 260 milhões em subsídios por ano para tornar a produção de biocombustível viável em quantidade compatível com a demanda brasileira. A necessidade desse incentivo seria provocada pela diferença entre o preço do biodiesel produzido por oleaginosas e pelo petróleo, e pelo fato de que os produtores de soja faturariam mais vendendo a produção para a indústria alimentícia do que vendendo para o setor de combustíveis e energia (VALOR ECONÔMICO, 1999).

Por outro lado, a produção do biodiesel é bastante atrativa dos pontos de vista social e ambiental, pois, além de reduzir a inserção de novas moléculas contendo carbono na atmosfera, contribuindo para a redução o acúmulo de gases do efeito estufa, permite o aproveitamento do potencial agrícola brasileiro, uma vez que uma importante possibilidade de matéria-prima a ser utilizada são as oleaginosas. Entretanto, apesar de ser uma alternativa sustentável, a produção de biodiesel enfrenta alguns problemas, como o alto preço das matérias-primas citado anteriormente, que correspondem a cerca de 85% do custo de produção (CGEE, 2004). Além disso, como esta matéria-prima também é utilizada pelo setor alimentício, a influência da demanda global por alimentos e de fatores sociais também pode ser relevante na análise de sua utilização na fabricação dos biocombustíveis (GARCILASSO; OLIVEIRA; COELHO, 2015).

Apesar dos problemas supracitados, devido aos incentivos recebidos, o Brasil já é um dos maiores produtores de biodiesel no mundo e a principal matéria-prima utilizada é a soja, chegando a 63,6% do total das matérias-primas utilizadas em 2017, de acordo com o Anuário Estatístico da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) (ANP, 2018a). Mesmo o Brasil sendo um dos países que mais produz a soja, o preço do seu grão

continua sendo o maior responsável pela redução da rentabilidade das plantas destinadas à produção de biodiesel.

Uma das vantagens de utilização do óleo de soja como matéria-prima é a sua grande disponibilidade no território brasileiro. O Brasil possui grande oferta de soja, devido ao clima e os melhoramentos genéticos já realizados. Além disso, dentre os óleos com possibilidade de aplicação para a produção de biodiesel, o óleo de soja ainda possui a característica de ser um dos óleos mais baratos, quando comparado aos outros óleos passíveis de utilização (LEITE; LEAL, 2007; ZANCAN; MARTINES FILHO, 2008).

O processo de produção do biodiesel a partir do grão de soja passa pelas etapas de extração e refino do óleo, seguidas da transesterificação para a produção de biodiesel e glicerina. Nas etapas iniciais, ocorre a formação de sub-produtos e de co-produtos, como lecitina, tocoferóis, esqualeno e farelo de soja. A comercialização desses produtos pode ser utilizada uma tentativa de agregação de valor à produção de biodiesel de soja, caso seja considerada uma planta integrada envolvendo desde a obtenção do óleo até a produção do biodiesel (VILLARDI et al., 2017a).

Assim, a integração das plantas de extração, refino e transesterificação de óleo se enquadra na definição de biorrefinaria. De acordo com a definição proposta por Berntsson (2007), nesse tipo de integração, a biomassa é utilizada para gerar um ou mais produtos de valor agregado, como combustível, produtos químicos, eletricidade e calor de uma maneira integrada. Com isso, quando avaliada de maneira integrada, a produção de biodiesel pode representar uma alternativa economicamente viável no Brasil e reduzir a necessidade de subsídios.

1.2– Objetivos

Diante do exposto, o objetivo geral deste trabalho é apresentar uma proposta de biorrefinaria integrada de biodiesel, contemplando as etapas de extração, refino e transesterificação (via alcalina) e avaliar economicamente o seu desempenho. Os objetivos específicos contemplam:

- (i) Definição das etapas de processo e elaboração de uma macroestrutura.
- (ii) Implementação de uma metodologia de cálculo que contemple balanço de massa e composição das correntes; estimativas de investimentos iniciais; custo de utilidades e custos de implementação do processo; avaliação econômica do empreendimento.
- (iii) Avaliação da influência do preço de comercialização das correntes na rentabilidade do empreendimento.

1.3– Divisão do Trabalho

Para que os objetivos citados sejam atendidos, o trabalho possui a seguinte divisão:

No Capítulo 1, foi realizada uma breve introdução ao tema do trabalho, além da definição dos objetivos gerais e específicos do mesmo e detalhamento dos demais capítulos.

No Capítulo 2, serão apresentadas e discutidas as principais definições necessárias ao desenvolvimento do trabalho. Além disso, serão descritas características de processos já presentes na literatura, bem como trabalhos na área.

No Capítulo 3, será apresentada uma possibilidade de aproveitamento de correntes e integração entre as plantas de obtenção do óleo de soja, refino do óleo e transesterificação para produção de biodiesel. Também serão disponibilizados detalhes que permitiram a implementação do código no *software* GNU Octave, além das premissas adotadas.

No Capítulo 4, será explicada a metodologia aplicada nos cálculos de custos de capital, equipamentos, matérias-primas utilizadas, produtos gerados e demais custos de processo. O principal objetivo será avaliar o empreendimento projetado utilizando a metodologia de Fluxo de Caixa e as análises econômicas que podem ser realizadas a partir desse método. Também serão explicitados os parâmetros adotados durante esses cálculos.

No Capítulo 5, serão apresentados os resultados de balanço de massa, incluindo o consumo de matérias-primas e a geração de produtos. Além disso, os resultados das análises econômicas serão apresentados e discutidos.

No Capítulo 6, serão apresentadas as principais conclusões obtidas no trabalho e sugestões de próximas etapas a serem desenvolvidas.

Revisão Bibliográfica

2.1 – Biocombustíveis e o Biodiesel

A energia obtida através da utilização de biocombustíveis é uma das alternativas renováveis para a oferta de energia. A classificação “biocombustíveis” contempla diversos combustíveis derivados de diferentes biomassas, podendo ser líquidos ou gasosos. Os biocombustíveis são utilizados, principalmente, em substituição a alternativas fósseis, como os derivados de petróleo (AWUDU; ZHANG, 2012). No Brasil, os principais biocombustíveis são o etanol e o biodiesel (LEITE; LEAL, 2007).

Pela Lei 11097, de 13 de janeiro de 2005, biocombustível pode ser definido como “combustível derivado de biomassa renovável para uso em motores a combustão interna ou, conforme regulamento, para outro tipo de geração de energia, que possa substituir parcial ou totalmente combustíveis de origem fóssil”. O biodiesel, por sua vez, é caracterizado como “biocombustível derivado de biomassa renovável para uso em motores a combustão interna com ignição por compressão ou, conforme regulamento, para geração de outro tipo de energia, que possa substituir parcial ou totalmente combustíveis de origem fóssil” (CASA CIVIL - PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA, 2005).

A definição da ANP fornece maiores informações sobre as características químicas e físicas do biodiesel. De acordo com a ANP, Biodiesel é um “combustível composto de alquil ésteres de ácidos carboxílicos de cadeia longa, produzido a partir da transesterificação e/ou esterificação de materiais graxos, de origem vegetal ou animal, e que atenda a especificação contida no Regulamento Técnico nº 3/2014, parte integrante da Resolução ANP nº 45 de 25 de agosto de 2014, ou outra que venha substituí-la” (ANP, 2017).

Em relação ao diesel petroquímico, o biodiesel apresenta algumas diferenças essenciais, como a redução da quantidade de dióxido de carbono emitida, devido a parte do

CO₂ emitido ser parcialmente absorvido através da fotossíntese realizada no cultivo da matéria-prima, e a redução da emissão de materiais particulados (FRANÇA, 2013). No entanto, alguns outros autores defendem que os materiais particulados permanecem sendo emitidos, porém em menor granulometria (KUMAR; GUPTA; KOTHARI, 2011).

Outro fator de extrema relevância é a ausência de enxofre na composição do biodiesel, evitando a emissão dos óxidos desse elemento. Seu ponto de fulgor é superior ao do diesel, ocasionando maior estabilidade e segurança. Outro diferencial do uso do biodiesel, combinado ao diesel petroquímico, é o aumento da vida útil do motor e periféricos, uma vez que ele melhora a lubricidade e reduz o desgaste. No entanto, devido à presença de ésteres em sua composição, em baixas temperaturas seu uso pode prejudicar o funcionamento do motor, devido à possível cristalização desses compostos. Estudos apontam que a utilização de aditivos ajuda a combater este problema (FRANÇA, 2013).

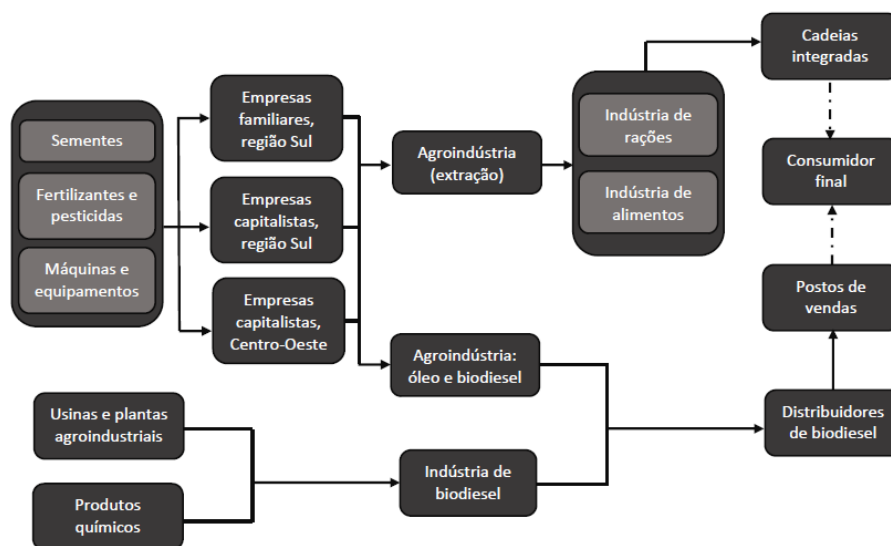
2.2 – Cenário Nacional

No Brasil, o biodiesel, além de ter diversas vantagens de utilização citadas anteriormente, também deve ser adicionado ao óleo diesel em proporções definidas por lei. Em março de 2017, houve o aumento da quantidade biodiesel a ser acrescida de 7% para 8% em volume em todo o diesel comercializado no Brasil. O objetivo era que em 2019 esse percentual chegasse a 10% (PORTAL BRASIL, 2017). No entanto, no dia primeiro de março de 2018 essa medida foi antecipada e o teor de biodiesel presente no óleo diesel em 2018 já passou a ser de 10%. A partir de 2019, existem previsões de aumento para 15%, conforme determinação do Conselho Nacional de Política Energética (ANP, 2018b). Como consequência, observa-se a crescente demanda por biodiesel no mercado nacional.

O aumento da quantidade de biodiesel misturada ao diesel é importante, pois permite a redução das importações de óleo diesel e incentiva a produção do biodiesel. A produção de biodiesel, por ser nacional, beneficia a agricultura familiar e o agronegócio brasileiro (PORTAL BRASIL, 2017). A Figura 2.1 representa o atual ambiente institucional da soja e do biodiesel no Brasil, apresentando a contribuição dessa indústria para diversos setores. Essa

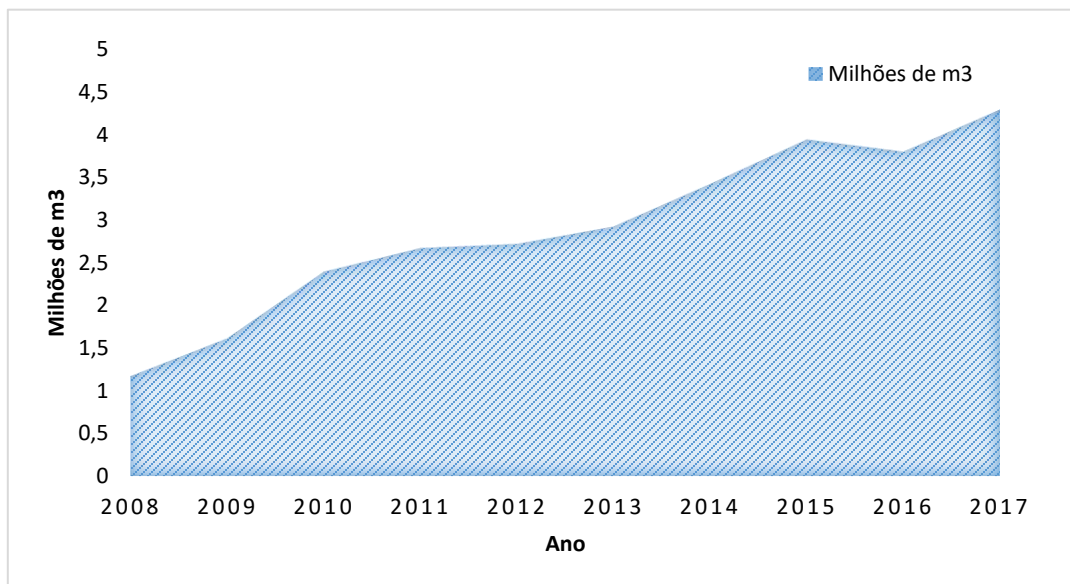
imagem mostra como a indústria de produção do grão de soja, obtenção e refino do óleo de soja, impulsiona empresas de menor e maior porte nas regiões Sul e Centro-Oeste, majoritariamente, e apresenta interligação com o comércio de sementes, fertilizantes e máquinas (MANDARINO; ROESSING; HIRAKURI, 2015).

Figura 2. 1 - Ambiente Institucional da Soja no Brasil (MANDARINO; ROESSING; HIRAKURI, 2015)



O Brasil é um dos maiores produtores de biodiesel, superando, em alguns anos, produtores tradicionais europeus como a Alemanha, e a tendência é de crescimento no setor de produção, conforme explicado anteriormente (RADENKOVIC, 2016). O gráfico disponibilizado na Figura 2.2 mostra como a produção de biodiesel aumentou nos últimos anos no território brasileiro.

Figura 2. 2 - Evolução da Produção de Biodiesel no Brasil de 2006 a 2017 (Dados Adaptados de ANP (2018a))



Essa produção de biodiesel se concentra principalmente nas regiões centro-oeste e sul, conforme apresentado nos dados da ANP de capacidade nominal e capacidade produzida no ano de 2017, disponibilizados na Tabela 2.1.

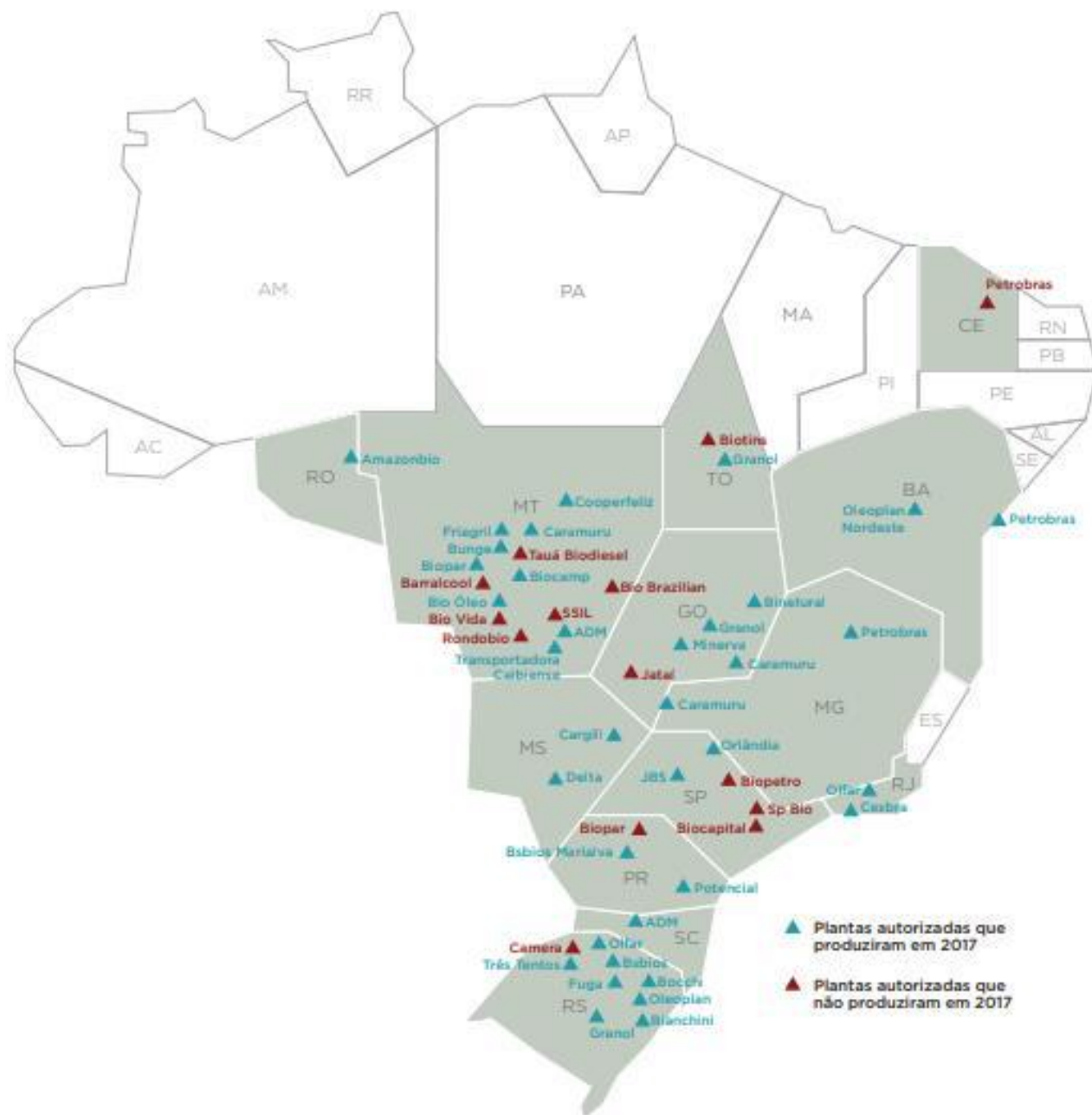
Tabela 2. 1 - Capacidade de Produção de Biodiesel por Região Brasileira em 2017 (Adaptado de ANP (2018a))

Região	Capacidade nominal (mil m ³ / ano)	Produção (mil m ³ / ano)
Norte	241,6	7,8
Nordeste	455,4	290,9
Sul	2918,3	1762,2
Sudeste	994,0	334,1
Centro-Oeste	3026,3	1896,3

Essa diferença entre capacidade nominal e produção também pode ser um reflexo da diferença entre a quantidade de plantas que foram autorizadas num determinado ano e a

quantidade de plantas que efetivamente produziram. Observa-se na Figura 2.3 que nem todas as plantas autorizadas produziram e uma possível justificativa seria a demanda compulsória por biodiesel no Brasil, variando de acordo com a utilização do diesel petroquímico.

Figura 2. 3 - Distribuição de plantas autorizadas que produziram e que não produziram no Brasil em 2017 (ANP, 2018a).



2.3 – Características e Propriedades Físico-Químicas do Biodiesel

O biodiesel possui em sua composição diversos ácidos graxos, mapeados por Hoekman et al. (2012). Dentre esses ácidos, os compostos listados na Tabela 2.2 são mais facilmente encontrados, variando seu percentual de ocorrência de acordo com a matéria-prima utilizada.

Tabela 2. 2 - Principais constituintes do biodiesel (Adaptado de Hoekman et al. (2012))

Principais ácidos graxos no Biodiesel	Nome	Nº CAS	Fórmula Molecular	Massa Molar (g/mol)
Ácido Palmítico	Ácido Hexadecanóico	57-10-3	$C_{16}H_{32}O_2$	256,43
Ácido Esteárico	Ácido Octadecanóico	57-11-4	$C_{18}H_{36}O_2$	284,48
Ácido Oleico	Ácido cis-9-octadecenoico	112-80-1	$C_{18}H_{34}O_2$	282,47
Ácido Linoleico	Ácido cis-9,12-octadecadienoico	60-33-3	$C_{18}H_{32}O_2$	280,46
Ácido Linolênico	Ácido cis-9,12,15-octadecatrienoico	453-40-1	$C_{18}H_{30}O_2$	278,44

A composição do biodiesel influencia suas propriedades físico-químicas. O conteúdo de oxigênio presente no biodiesel, usualmente 11 %, faz com que o biodiesel possua uma menor quantidade de carbono e hidrogênio quando comparado ao diesel. Essa modificação ocasiona uma redução de energia por unidade de massa em cerca de 10%, e de 5% a 7% na redução de energia por unidade de volume. A consequência mais direta disso é que na queima da mesma quantidade de diesel e biodiesel, a energia gerada pelo biodiesel é menor (HOEKMAN et al., 2012).

O tipo e a quantidade de ácidos graxos observados também influenciam na viscosidade, ponto de névoa, temperaturas e possibilidades de destilação e outras especificações do produto. Dessa forma, de acordo com as propriedades do combustível que se deseja obter, deve ser realizada uma escolha racional da matéria-prima ou ajustes com aditivos recomendados para cada caso (HOEKMAN et al., 2012).

Outros componentes presentes no biodiesel são traços de esteróis glucosídeos e monoglicéridos saturados, que são impurezas. Apesar de serem traços, esses componentes trazem como consequência a formação de precipitados insolúveis quando o biodiesel é armazenado em baixa temperatura. Porém, apesar desse efeito indesejado, esses compostos aumentam a lubricidade do biodiesel. Logo, eliminá-los da composição do combustível pode ser prejudicial à lubrificação do motor (TANG et al., 2008; TANG; SALLEY; SIMON NG, 2008). O ideal seria atuar com essas substâncias em uma composição controlada, evitando as precipitações e mantendo o motor lubrificado.

A composição do biodiesel também afeta a sua performance em baixas temperaturas e sua estabilidade à oxidação. No entanto, essas duas propriedades requerem características conflitantes. Para que o biodiesel tenha um bom desempenho no motor a baixas temperaturas, é necessário que ele possua baixas concentrações de ésteres saturados. Por outro lado, para uma boa estabilidade oxidativa, o biodiesel deve ter alta concentração desses componentes, limitando a ocorrência de compostos graxos multi-insaturados. Desta forma, a composição deve ser balanceada para se obter um produto compatível com os interesses do mercado (PARK et al., 2008).

Em relação ao desempenho de motores do ciclo diesel, a eficiência térmica do motor aumentou quando se usou misturas de biodiesel de soja com diesel ao invés do biodiesel puro. O consumo energético foi inversamente proporcional a quantidade de biodiesel utilizada. Dessa forma, pode se observar que os motores operando com biodiesel possuem potência e eficiência reduzidas (BARBOSA et al., 2008) Motores que utilizam esse biocombustível também possuem menor vida útil, pois há um retardo na ignição. Um dos motivos desse retardo está relacionado ao número de cetanos, que mede o desempenho de um combustível em função da auto-inflamação, e quanto maior o número de cetano, menor será esse atraso (AZEVEDO, 2016).

2.4 – Matérias-primas para a Produção de Biodiesel

O biodiesel pode ser produzido através da transesterificação de óleos vegetais ou animais, que será detalhada nos próximos tópicos, além de outras rotas não convencionais. Diversos óleos vegetais podem ser utilizados para preparo do biodiesel, sendo os principais: óleos de soja, colza ou canola, girassol, palma, amêndoa, babaçu, cevada e coco. A composição de ácidos graxos é diferente em função da matéria-prima utilizada, provocando modificações nas propriedades do biodiesel obtido (GERIS et al., 2007).

No mundo inteiro, o biodiesel é obtido a partir de óleos vegetais comestíveis devido à larga escala proveniente da agricultura. O biodiesel, normalmente, é preparado a partir de canola no Canadá, soja nos EUA e palma no sudeste da Ásia. Devido à competição com essas fontes alimentícias, hoje em dia, há relatos de estudos de produção de biodiesel a partir de 26 plantas com derivados não comestíveis, como exemplo a partir do algodão. Também estão sendo desenvolvidas tecnologias para explorar materiais celulósicos para a produção de biodiesel, como folhas e caules de plantas, biomassa derivada de resíduos e também sementes oleaginosas de plantas não comestíveis (AHMIA et al., 2014). Na Europa, a principal matéria-prima utilizada para produção de biodiesel é o óleo de colza.

Existem também relatos da produção de biodiesel, através de microrganismos oleaginosos, ou seja, que acumulam lipídios em mais de 20% de sua biomassa. O lipídio microbiano possui semelhança com o óleo da planta em tipo e composição e, portanto, possui potencial para aplicação na produção de biodiesel. Geralmente, existem três formas de produção de óleo microbiano e, finalmente, o uso desse óleo como substrato para a produção de biodiesel. Estes métodos são: (i) rastreamento de microrganismos oleaginosos com alto potencial de produção lipídica, (ii) aumento do teor lipídico, otimizando os parâmetros ambientais e também usando mutação, (iii) aplicação de subprodutos para produção de lipídios (MADANI; ENSHAEIEH; ABDOLI, 2017). Outra alternativa para a produção de biodiesel seria a utilização de microalgas, que apresentam maior produtividade que fontes vegetais e maior eficiência fotossintética (FRANCO et al., 2013).

Além dessas matérias-primas, há também uma grande utilização de gordura animal para a produção de biodiesel. O sebo bovino faz parte da estrutura de “produção, processamento e dinâmica de mercado” da indústria de carne. Os subprodutos dessa indústria são segmentados nas indústrias de higiene, limpeza, moda, alimentícia e produção de biocombustível. A pele do animal é utilizada para a fabricação de couro, o colágeno é destinado ao ramo alimentício e o sebo é utilizado nas demais indústrias citadas (ROBERTO; BUENO; FREITAS, 2011).

O setor pecuário brasileiro é um dos maiores do mundo e isso contribui para a grande disponibilidade desses subprodutos da produção de carne. Em consequência, a oferta de sebo bovino é grande, possibilitando a produção de biodiesel a partir dessa fonte, que inclusive é vantajosa do ponto de vista ambiental, visto que reduz os problemas com o descarte de resíduos da pecuária (JARDINE; BARROS, 2019). Por essa razão e pelo seu baixo preço, o sebo bovino é a segunda matéria-prima mais utilizada para a produção de biodiesel no Brasil (ANP, 2018a).

Comparando o óleo da gordura animal ao óleo vegetal, a matéria-prima de origem pecuária apresenta um maior número de cetano e possui maior resistência à oxidação, devido ao maior teor de compostos graxos saturados. No entanto, a sua solidificação em temperatura ambiente e o seu maior percentual de enxofre são características que prejudicam sua aplicação. Outra desvantagem da gordura animal como matéria-prima é o teor elevado de ácidos graxos livres, que causam a formação de sabões e diminuem a eficiência do processo (JARDINE; BARROS, 2019).

No cenário brasileiro, a principal matéria-prima para a produção de biodiesel é o óleo de soja, conforme observa-se na Tabela 2.3, principalmente devido à grande disponibilidade da soja no território nacional e, além disso, por apresentar os menores custos dentre as demais matérias-primas vegetais. Outro fator que contribui para a escolha desse grão são os incentivos oferecidos pelo governo. Dessa forma, o presente trabalho considerará apenas o óleo de soja como fonte oleaginosa para a obtenção de biodiesel.

Tabela 2. 3 - Quantidade de matérias-primas (m³) utilizadas na produção de biodiesel no Brasil (Adaptado de ANP (2018a)).

Tipo de óleo	2013	2014	2015	2016	2017
Total	2.921.006	3.415.467	3.938.873	3.817.055	4.829.351
Óleo de Soja	2.231.464	2.625.558	3.061.027	3.020.819	3.072.446
Óleo de Algodão	64.359	76.792	78.840	39.628	12.426
Gordura Animal	578.427	675.861	738.920	622.311	720.935
Outros Materiais Graxos	46.756	37.255	60.086	134.927	483.544

2.5 – Grão de Soja

No período de 2883 a 2838 a.C., ocorreram as primeiras menções ao grão de soja. Nesse período, o grão era considerado sagrado, assim como o arroz. Depois desse período até o término da guerra entre a China e o Japão, em 1894 d.C., a produção foi restrita à China e só foi expandida para a Europa no final do século XV (EMBRAPA, 2019).

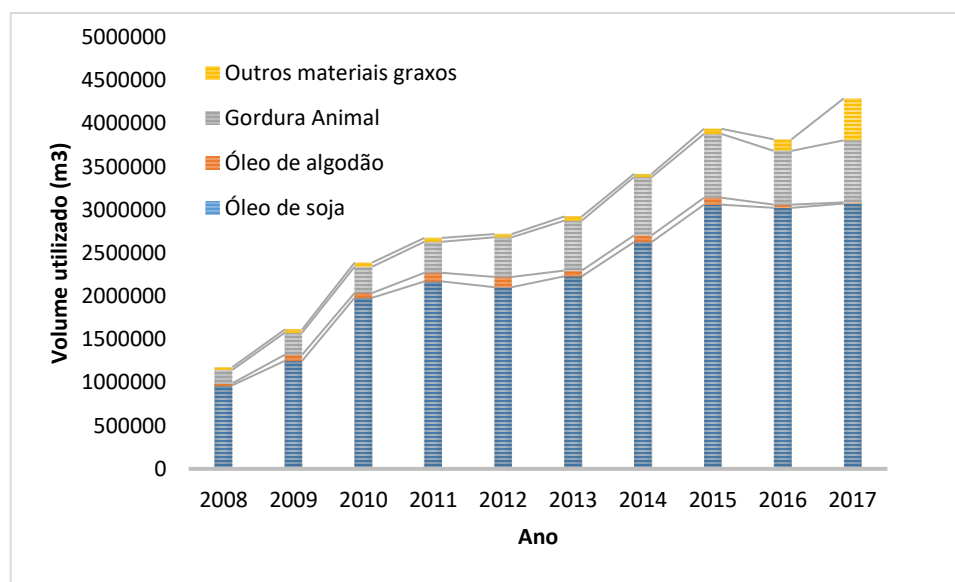
Apenas na segunda década do século 20, que o óleo e a proteína do grão despertaram interesse comercial. Os países do hemisfério norte fracassaram no cultivo do grão, devido às condições meteorológicas. No Brasil, esse fator não representava um problema e então, no final da década de 60, o Brasil foi atraído pela possibilidade de trabalhar com a soja. Dois fatores, em especial, representavam vantagens para o governo brasileiro. O primeiro deles era o fato do trigo ser a cultura mais importante do sul e a soja poderia sucedê-lo no verão, evitando assim o desabastecimento. O segundo fator era a crescente demanda por farelo de soja, para destinação como ração na produção de animais. Assim, a produção comercial de soja se tornou uma estratégia no território nacional (EMBRAPA, 2019).

O governo observou também que a soja no Brasil possuía como vantagem competitiva o fato de sua safra ser simultânea a época de entressafra americana, proporcionando preços elevados do grão de soja e atraindo o interesse de produtores nacionais. A partir deste momento, o Brasil começou a investir em adaptação da cultura às condições nacionais, liderado pela busca de tecnologias da EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa

Agropecuária). Os investimentos permitiram que o grão de soja fosse também plantado entre o Trópico de Capricórnio e a linha do Equador (EMBRAPA, 2019). Dessa maneira, com o sucesso do plantio em novas regiões e o preço competitivo com o mercado externo, o plantio do grão de soja se espalhou pelo país e se tornou um importante contribuinte para o sucesso do setor agrário nacional.

Atualmente, uma das principais aplicações do grão de soja no Brasil é a obtenção de seu óleo, que pode ser destinado à produção de biodiesel ou à indústria de alimentos. A Figura 2.4 mostra o crescimento da aplicação do óleo de soja na produção de biodiesel no Brasil ao longo dos anos, em comparação com outras matérias-primas (ANP, 2018a).

Figura 2. 4 - Principais matérias-primas utilizadas no Brasil para produção de biodiesel (Dados Obtidos em ANP (2018a))



De acordo com a EMBRAPA (2018), o maior produtor mundial do grão de soja são os Estados Unidos e o segundo maior produtor é o Brasil. Os dados destes produtores, de acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB) e o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA, em inglês), conforme atualização em maio de 2018, estão resumidos na Tabela 2.4.

Tabela 2. 4 - Capacidade de produção de grão de soja no Brasil e no mundo (Dados obtidos em Embrapa (2018))

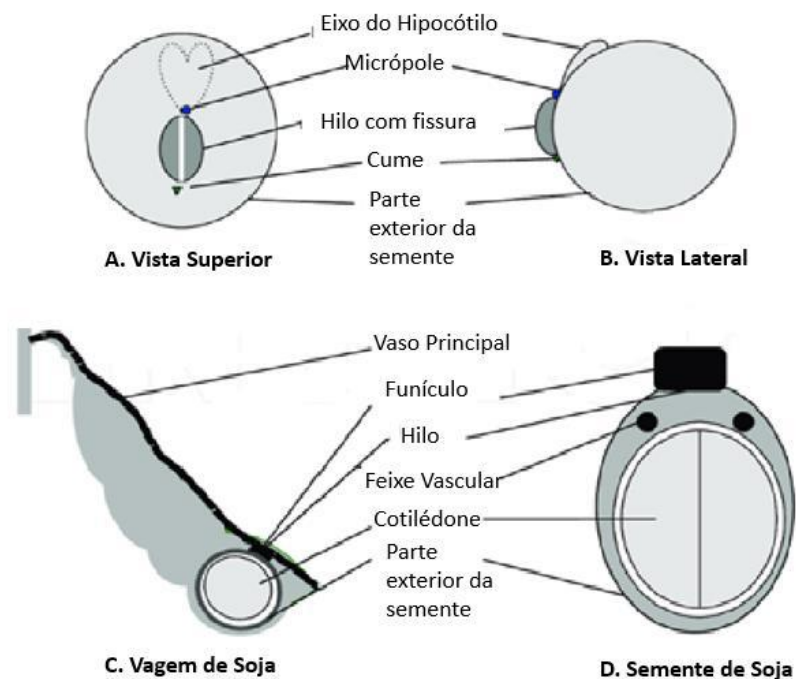
Local	Produção (milhões de toneladas)	Área Plantada (milhões de hectares)	Produtividade (kg/ha)	Fonte
Mundo	336,699	124,580	-	USDA
EUA	119,518	36,228	3.299	USDA
Brasil	116,996	35,100	3.333	CONAB
Mato Grosso	31,887	9,519	3.350	CONAB

As safras de soja brasileira estão anualmente atingindo produções recordistas. A safra de 2017/2018 fechou com a produção de 119,3 milhões de toneladas e as projeções para a safra 2018/2019 indicam valores próximos a 122 milhões de toneladas. No entanto, apesar de uma previsão de crescimento, o Brasil permanecerá em posição inferior aos Estados Unidos, com safra 2018/2019 estimada para 125,18 milhões de toneladas (MENDES, 2018).

2.6 – O Grão de Soja e seus Principais Constituintes

O grão de soja, assim como os demais grãos, possui em sua constituição diversas partes com composição e propriedades físico-químicas diferentes. Essas variadas características da estrutura desse grão permitem diferentes destinações e, portanto, diferentes aplicações na indústria. Esse grão pode ser descrito como uma semente constituída de casca ou casco, cotilédone e germe ou hipocótilo, conforme mostra a Figura 2.5 (GUNSTONE, 2002; OHYAMA et al., 2017).

Figura 2. 5 - Constituintes principais do grão de soja (Traduzido de Ohyama et al.(2017))



A composição química do grão de soja é basicamente proteína, óleo, carboidratos e cinzas. A Tabela 2.5 descreve a composição mais detalhada de todas as regiões apresentadas nas vistas do grão de soja ilustradas na Figura 2.5, sendo as principais: grão, polpa, casca e hipocotiledon (GUNSTONE, 2002).

Tabela 2. 5 - Distribuição em frações (%) dos principais constituintes do grão de soja (GUNSTONE, 2002)

Componentes	Fração	Proteína	Óleo	Cinzas	Carboídratos
Semente inteira	100	40,3	21,0	4,9	33,9
Polpa	90,3	42,8	22,8	5,0	29,4
Casca	7,3	8,8	1,0	4,3	85,9
Hipocotiledon	2,4	40,8	11,4	4,4	43,4

Quase todas as frações do grão de soja possuem aplicação comercial. A parte protéica do grão de soja pode ser destinada à produção de farelo de soja, de extrema importância no setor alimentício. Já o óleo recuperado do grão de soja, denominado óleo cru de soja, possui diversas classes de lipídeos. Dentre esses lipídeos, encontram-se tri-, di- e monoacilgliceróis, ácidos graxos livres e lipídeos polares, como os fosfolipídios. O óleo de soja também possui uma quantidade considerável de matéria insaponificável, incluindo tocoferóis e hidrocarbonetos, como o esqualeno. Traços de metais também podem ser encontrados. Com o refino desse óleo, as concentrações médias de seus constituintes variam drasticamente, conforme a Tabela 2.6 (GUNSTONE, 2002).

Tabela 2. 6 - Composição do óleo de soja cru e refinado (GUNSTONE, 2002)

Componentes	Óleo cru	Óleo refinado
Triacilglicerol (%)	95-97	>99
Fosfolipídios (%)	1,5-2,5	0,004 – 0,045
Matéria Insaponificável (%)	1,6	0,3
Fitosteróis (%)	0,33	0,13
Tocoferóis (%)	0,15-0,21	0,11-0,18
Hidrocarbonetos (%)	0,014	0,01
Ácidos Graxos Livres (%)	0,3-0,7	<0,05
Traços de metais		
Ferro	1-3	0,1-0,3
Cobre	0,03 – 0.05	0,02 – 0,06

2.6.1 - Triglicerídeos e Ácidos Graxos

Os principais constituintes do óleo de soja são os triglicerídeos, que influenciam as propriedades do óleo e, por isso, sua composição exata deve ser determinada. Usualmente, são encontrados no óleo de soja os ácidos graxos mostrados na Tabela 2.7, além dos correspondentes triglicerídeos (GUNSTONE, 2002). A descrição desses ácidos se refere ao número de carbonos e ao número de insaturações em cada um deles. O ácido mirístico, por

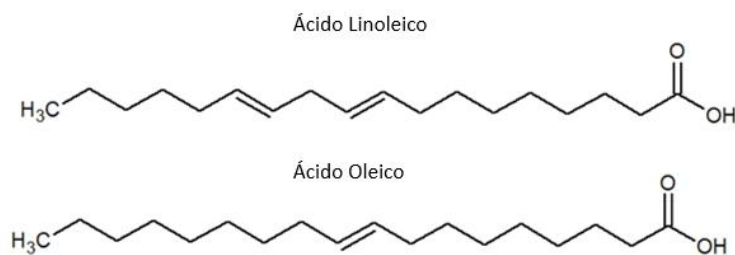
exemplo, apresenta 14 carbonos em sua estrutura e não possui ligações insaturadas, enquanto que o ácido palmitoléico possui 16 carbonos e uma insaturação.

Tabela 2. 7 - Principais ácidos graxos presentes no óleo de soja (GUNSTONE, 2002)

Ácido Graxo	Descrição	Quantidade (%)
Mirístico	14:0	0,1
Palmístico	16:0	11,0
Palmitoleico	16:1	0,1
Esteárico	18:0	4,0
Oleico	18:1	23,4
Linoleico	18:2	53,2
Linolênico	18:3	7,8
Araquídico	20:0	0,3
Behênico	22:0	0,1

A partir da Tabela 2.7, observa-se que os ácidos graxos majoritários presentes no óleo de soja são os ácidos oleico e linoleico. Esses dois ácidos, ilustrados na Figura 2.6, são ácidos graxos insaturados e estão envolvidos na arquitetura e funcionamento das membranas celulares, desempenhando um papel importante em diversos processos biológicos (CHOQUE et al., 2014).

Figura 2. 6 - Estrutura Química dos ácidos linoleico e oleico, principais triglicerídeos do óleo de soja.



2.6.2 - Fosfolípidios

Outra classe importante de constituintes do óleo de soja são os fosfolípidios, que possuem porção hidrofóbica e porção hidrofílica. Os fosfolípidios, como sugerido pelo próprio nome, são derivados de lipídeos que possuem fósforo em sua composição, mais conhecidos como gomas. Essas gomas precisam ser removidas do óleo, com destinação energética, visto que, quando submetidas ao aquecimento, estão relacionadas a uma maior formação de fumaça e alterações no ponto de *flash*, ou seja, na primeira temperatura em que há o desprendimento de compostos voláteis (ADEKUNLE et al., 2016). Outro fator essencial para a remoção dos fosfolípidios é a formação de emulsão nas etapas posteriores, dificultando a separação e o rendimento do processo.

Além disso, a remoção de fosfolípidios é vantajosa, visto que são os principais constituintes da lecitina de soja. A lecitina de soja pode ter sua composição química alterada com o objetivo de alterar suas propriedades emulsificantes e aumentar sua dispersão em sistemas aquosos. Esses fosfolípidios podem sofrer hidrólise ácida, básica ou enzimática para a obtenção de melhores propriedades hidrofílicas e emulsificantes ou podem ser acetilados (GUNSTONE, 2002).

As lecitinas, que incluem os fosfolípidios, são também compostas por triglicerídeos, glicolipídeos, além de carboidratos, pigmentos, carotenoides e alguns outros microcompostos. Elas são obtidas através de oleaginosas, como a soja, ou de ovo cru. Os principais fosfolípidios presentes na lecitina são fosfatidilcolina, fosfatidiletanolamina e o fosfatidilinositol. Devido à presença dos fosfolípidios, possuindo uma parte hidrofóbica e outra hidrofílica, a lecitina possui propriedades tensoativas, podendo ser aplicada na indústria de alimentos, principalmente para formação de emulsificantes, reduzindo a tensão superficial de líquidos e estabilizantes, além de ser um surfactante não tóxico. Sua aplicação na indústria alimentícia é reconhecida pelas agências reguladoras americana e europeia (ADITIVOS INGREDIENTES, 2016; MERTINS et al., 2008)

Exemplos da aplicação da lecitina de soja são como estabilizante ou emulsificante no mercado de bebidas, além de aplicação no chantilly e também em cremes vegetais como emulsificante. A lecitina também pode ser utilizada para melhorar as características de queijos macios, quando utilizada antes da coagulação (ADITIVOS INGREDIENTES, 2016). Existem inúmeras aplicações desse produto nessas indústrias, levando a concluir sobre a importância de comercialização desse produto originado da soja.

2.6.3 - Matéria Insaponificável

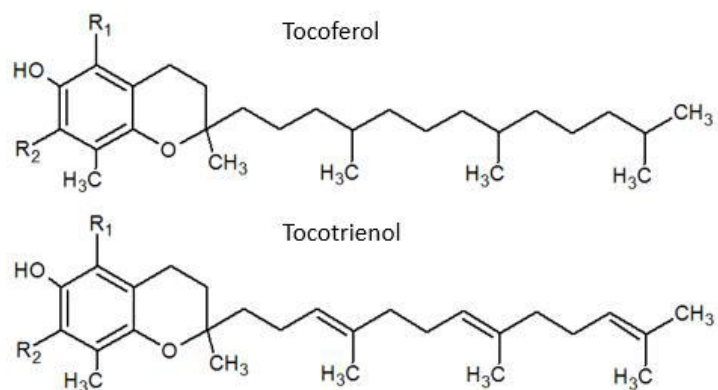
Dentre os constituintes de matéria insaponificável, encontram-se os tocoferóis, esteróis e hidrocarbonetos. A Tabela 2.8 resume a composição do óleo de soja em relação aos principais tocoferóis e esteróis.

Tabela 2. 8 - Material insaponificável no óleo de soja (GUNSTONE, 2002)

Componente	Composição (%)
Insaponificável	33,0
Total Tocoferol	11,1
α Tocoferol	0,9
Total Esterol	18,0
Sigamesterol	4,4

Tocoferóis, geralmente, são compostos minoritários na maioria dos óleos vegetais. Eles são antioxidantes naturais com diversos graus de efetividade. Existem 4 tipos de tocoferóis: α / β / γ / δ tocoferóis (GUNSTONE, 2002). Os tocoferóis são de grande importância por estarem presentes na composição da vitamina E e a sua designação α / β / γ / δ varia de acordo com os grupamentos R1 e R2 acoplados na molécula representada na Figura 2.7 (GUINAZ et al., 2009).

Figura 2. 7 - Principais Constituintes da Vitamina E (Adaptado de Guinaz et al. (2009))



A concentração dos isômeros varia de acordo com o procedimento de obtenção do óleo, sendo os mais comuns a prensagem e a extração com solvente. A Tabela 2.9 mostra que há maior quantidade de tocoferóis disponíveis quando o óleo é extraído com a utilização de um solvente, quando comparada à obtenção do óleo por prensagem (GUNSTONE, 2002).

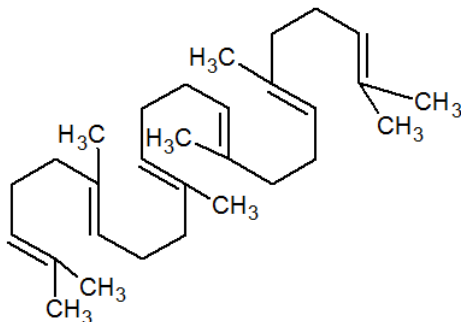
Tabela 2. 9 - Teor de tocoferóis no óleo prensado e óleo extraído com hexano (GUNSTONE, 2002)

Componentes	Concentração no Óleo de soja prensado	Concentração no Óleo de soja extraído com solventes
Total Tocopherol (ppm)	1257	1370
α Tocopherol (%)	9,3	10,5
β Tocopherol (%)	1,2	1,2
γ Tocopherol (%)	62,8	63,5
δ Tocopherol (%)	26,7	25,0

Além do tocoferol, lecitina e demais compostos já citados, também há a presença de esqualeno (Figura 2.8) no grão de soja. O esqualeno pode ser utilizado como suplemento para animais, reduzindo os níveis de colesteróis e triglicerídeos. Já em humanos, ele não reduz o colesterol, mas pode ser associado a drogas que possuem esse efeito, potencializando a sua

ação. Há relatos da utilização de esqualeno em tratamentos relacionados ao câncer (GUNES, 2013).

Figura 2. 8 - Fórmula Química do Esqualeno



Todos esses compostos de interesse podem ser recuperados durante o processo de obtenção e refino do óleo de soja, que será discutido no próximo tópico.

2.7 – Processo de obtenção do biodiesel a partir do óleo de soja

2.7.1 - Preparo do grão de soja

Uma das principais aplicações do óleo de soja produzido é a obtenção de biodiesel, com características equiparáveis ao diesel petroquímico. Conforme visto anteriormente, o biodiesel precisa apresentar determinadas características e propriedades para ter sua comercialização autorizada, conforme agências reguladoras de cada país. As propriedades do biodiesel final são fortemente influenciadas pelas propriedades do grão de soja utilizado. Dessa forma, é importante que as condições de armazenamento e preparo do grão de soja sejam controladas, possibilitando que todas as propriedades sejam preservadas e que o produto final não tenha sua qualidade afetada.

A etapa de armazenamento do grão de soja pode durar até um ano e, como resultado, suas propriedades físicas e bioquímicas são afetadas, o que pode impactar nas características do biodiesel conforme supracitado. Essas condições afetam o rendimento e qualidade do biodiesel e o teor de água é um dos fatores que mais apresenta interferência, pois quanto mais

água estiver disponível, menos estável é o produto e mais chances de ser afetado pela ação de microrganismos que podem prejudicar o desempenho (CORADI et al., 2018).

Durante a etapa de armazenamento, a umidade deve ser controlada, garantindo que seja sempre inferior a 13%. Além disso, a acidez deve ser controlada e deve ser evitado contato com itens que causem alterações sensoriais, por exemplo, condições que levem a formação de peróxidos (MANDARINO; ROESSING; HIRAKURI, 2015). O controle rigoroso das condições ambientes durante o período de armazenamento e o processo de secagem também são de grande importância, pois assim se evita o desenvolvimento de fungos e insetos, que podem degradar o grão e elevar as perdas operacionais (LIMA et al., 2013).

Antes do encaminhamento para armazenamento na indústria, é necessária a etapa de pré-limpeza, garantindo a remoção de impurezas maiores, reduzindo o espaço industrial utilizado. Essa etapa é seguida do descascamento, no qual as polpas são separadas das cascas através de descascadores. Nessa fase, as cascas são quebradas por batedores ou facas giratórias. A separação ocorre tanto por peneiras vibratórias, quanto por insuflação de ar. Elas podem ser utilizadas para geração de vapor ou calor, em caldeiras (MANDARINO; ROESSING; HIRAKURI, 2015).

Segundo Medeiros (2018), outra possível utilização da casca do grão de soja é a incorporação na alimentação de animais. A casca do grão de soja, apesar de ser altamente fibrosa, é digestível devido à presença de pectina na sua parede celular. Sua incorporação na ração animal também seria vantajosa devido à manutenção do pH ruminal, ou seja, o pH de uma parte do estômago dos animais, apesar de ser restrita a um limite controlado.

Uma aplicação menos usual da casca do grão de soja é sua utilização na produção de etanol. As cascas possuem um teor considerável de carboidratos, além da proteína presente, e esses carboidratos podem ser convertidos em etanol. No entanto, das três possíveis aplicações para a casca, a mais comum é a destinação para ração animal e isso se deve, provavelmente, ao volume demandado pela grande criação de animais brasileira, além dos custos com processamento (KOC; ABDULLAH; FERREIDOUNI, 2011).

De acordo com Cheng e Wang (2017), se os grãos estiverem muito secos, com menos de 10% de umidade, eles são facilmente pulverizados e formam excesso de partículas finas. Por outro lado, o excesso de umidade faz com que a casca fique muito difícil de ser removida. Ainda de acordo com esses autores, o processo de condicionamento ocorre posteriormente ao descascamento. No condicionamento, os grãos quebrados são aquecidos a 71 °C, garantindo o ajuste de umidade.

De acordo com Mandarino (2001), a polpa é separada em duas metades e sofre um aquecimento durante o condicionamento. Os tecidos e paredes de células são rompidos durante as etapas de trituração e laminação. Com isso, a distância entre o centro do grão e sua superfície é reduzida e a área de saída do óleo aumenta, facilitando as etapas posteriores. Essa etapa é realizada através de rolos de aço, na maior velocidade possível, pois a desintegração ocasiona a ativação de enzimas celulares, e prejudicam as características do óleo, torta ou farelo obtidos, pois podem conduzir à degradação dos mesmos e gerar produtos que alterem suas características sensoriais.

Com o intuito de romper as paredes celulares, é realizado o cozimento, que auxilia a saída do óleo. Os cozedores são equipamentos com quatro ou cinco bandejas uma acima da outra, que são aquecidas com vapor. O aquecimento pode ocorrer de maneira indireta, utilizando para isso a camisa do cozedor, ou direta, com introdução de vapor na parte interna. A introdução de vapor dentro do cozedor umedece o material e possibilita rápida elevação de temperatura, indo de 70 °C a 105 °C. Na bandeja mais baixa, a última, os flocos são secos e em seguida prensados (MANDARINO; ROESSING; HIRAKURI, 2015).

O ajuste de umidade dos flocos, o rompimento das paredes celulares e o aumento da permeabilidade das membranas permite a saída do óleo do grão. Além disso, essas condições reduzem sua viscosidade e tensão superficial, facilitando a sua extração, reduzindo a produção de ácidos graxos livres e o teor de enxofre, uma vez que coagula e desnatura proteínas e inativa muitas das enzimas lipolíticas. O cozimento também contribui para a redução da afinidade do óleo e as partículas do grão (sólido) (MANDARINO; ROESSING; HIRAKURI, 2015).

Há também relatos de utilização de pré-tratamento enzimático antecedendo a etapa de extração, com o objetivo de aumentar a quantidade de óleo recuperado. Essa etapa pode ocorrer com via hidrólise multienzimática, que proporciona o rompimento das estruturas celulares que armazenam o óleo. O rendimento de óleo obtido com pré-tratamento enzimático é superior ao obtido com técnicas usuais. A principal justificativa para esse resultado é a redução da integridade dos tecidos, aumentando a permeabilidade dessas estruturas ao óleo, contribuindo para a obtenção de maiores coeficientes de difusão para a extração (GRASSO et al., 2012).

2.7.2 - Extração do óleo de soja

Após o preparo, ocorre o procedimento de extração. A extração do óleo bruto pode ocorrer por meio mecânico em prensas contínuas, seguido de extração com solventes orgânicos, sendo este chamado de Processo Misto. O material que sai da prensa é chamado de torta e essa torta é extraída com solvente orgânico, que recupera o óleo ainda presente na torta (MANDARINO; ROESSING; HIRAKURI, 2015).

No processo de extração, os grãos entram na prensa contínua, chamadas de *expeller*, através de um eixo alimentador, ilustrado na Figura 2.9. A prensa é constituída de um cesto com barras de aço retangulares. Nesse tipo de prensa, é possível ajustar o espaçamento das barras. Isso torna possível permitir a saída do óleo e atuar como filtro para partículas da torta. No centro, há uma rosca, que, ao girar, promove a movimentação do material e o comprime. Um cone na saída regula a pressão (MANDARINO; ROESSING; HIRAKURI, 2015). Uma vantagem desse sistema é que permite a separação do óleo e da farinha (SNT, 2018).

Figura 2. 9 - Representação de Prensa Contínua – Tipo Expeller (SNT, 2018)



Outra alternativa é o processo de extração com solvente orgânico. Esse processo é o mais utilizado para a extração de óleos vegetais, devido ao seu baixo custo e alta eficiência quando comparado a outros solventes. Além disso, o hexano, principal solvente utilizado para extração de óleo, possui alta aplicação por ser pouco corrosivo e vaporizar em temperatura relativamente baixa, reduzindo os custos energéticos (KOC; ABDULLAH; FEREIDOUNI, 2011).

A extração do óleo ocorre no equipamento chamado extrator. Durante a extração, ocorre a formação de um leito que é imerso nas micelas, compostas de óleo misturado com hexano. O hexano passa pelas micelas com o objetivo de carregar o óleo presente nelas. Dessa forma, o princípio da operação é a obtenção de equilíbrios sucessivos entre a concentração de óleo dentro e fora do sólido. Como consequência, ao longo desse processo, a concentração de óleo no hexano aumenta e a concentração de hexano nos grãos também (ROQUE et al., 2015).

O fator que mais influencia a velocidade de extração do óleo é o equilíbrio óleo – solvente – micela. Para facilitar o processo de difusão devem ser avaliados parâmetros como a espessura do floco, temperatura perto ao ponto de ebulição do solvente e o teor de água do material (MANDARINO; ROESSING; HIRAKURI, 2015).

A extração utilizando solvente pode ser contínua ou semi-contínua. Na extração semi-contínua, utiliza-se três até seis extratores. Eles estão acoplados a tanques com telas nas suas partes inferiores. O solvente e o material engordurado são colocados em contracorrente nos extratores. Nesse processo, o rendimento costuma ser pequeno e há necessidade de mais mão de obra operacional (MANDARINO; ROESSING, 2001).

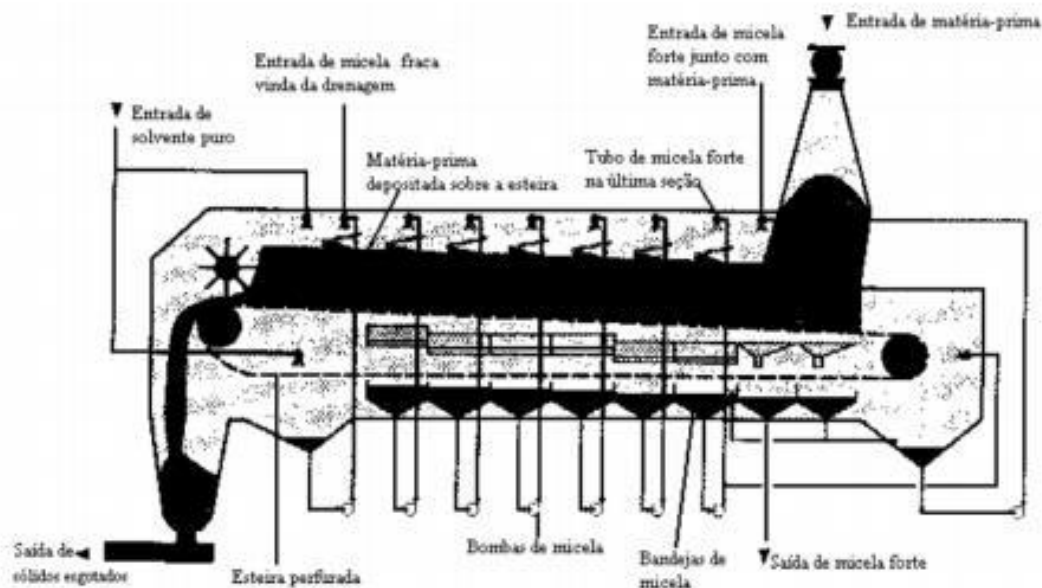
Por fim, no procedimento de extração contínua com hexano, existem alguns métodos utilizados industrialmente, sendo eles: CODIC, LURGI, MIAG, SMET, ROTOCEL. A seguir esses métodos serão detalhados e comparados.

O “CODIC” são roscas inclinadas. O início da rosca é alargado e a torta obtida na pré-prensagem é banhada com solvente, ocorrendo a transferência por movimento circular para o próximo extrator. A rotação dos extratores pode ser variável ou efetua-se a passagem da micela através da força da gravidade. Esse sistema é simples, barato e pouca mão de obra empregada quando comparado ao semi-contínuo. A desvantagem é a presença de finos em quantidade excessiva, devido ao elevado tempo de contato entre a torta e a micela (MANDARINO; ROESSING; HIRAKURI, 2015).

O sistema “LURGI”, por sua vez, trata-se de uma esteira horizontal equipada com semicanecas, movimentando-se independentemente de uma tela em movimento circular. Uma válvula rotativa realiza o controle do abastecimento das canecas que, no fim da esteira, continuam o percurso. O conteúdo cai e retorna. O solvente e a micela são injetados na esteira superior e tela inferior, respectivamente, permitindo que a extração seja completa. O material extraído é entregue na saída e, em seguida, conduzido para os secadores ou dessolventizador. O extrator contínuo “MIAG” se difere apenas por utilizar canecas inteiras e não semicanecas (MANDARINO; ROESSING; HIRAKURI, 2015).

Posteriormente, a empresa “SMET” elaborou extratores com correia transportadora horizontal, como ilustrado na Figura 2.10. Esse tipo de extrator representou um avanço para a obtenção de extratores contínuos de percolação. Nesse tipo de extrator, a matéria-prima é carregada nesta esteira enquanto é lavada por vários distribuidores de micela, formando, assim, fluxos em contracorrente cruzados. Após percolar pelo leito, as micelas são coletadas em badejas, localizadas abaixo desse transportador (THOMAS, 2003).

Figura 2. 10 - Extrator tipo De Smet (THOMAS, 2003)

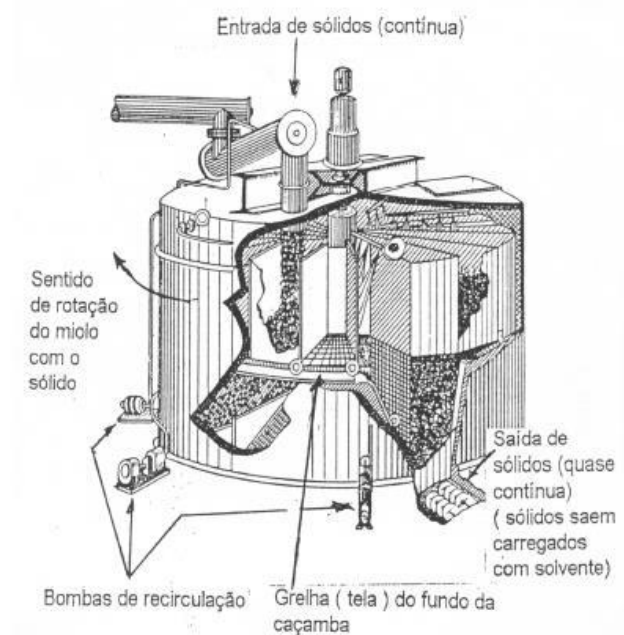


Em extrações que ocorrem em extratores do tipo SMET, Almeida et al. (2010) estudaram os coeficientes de equilíbrio da extração para diversas condições operacionais desse extrator em esteira, considerando recirculação da micela e hexano como solvente. Pelo uso de um modelo matemático obtido por diferenças finitas, com poucos desvios em relação aos dados experimentais, concluiu-se que a localização no extrator e suas dimensões influenciam na concentração da micela. Dessa forma, esses aspectos devem ser considerados durante o projeto desses extratores, assim como porosidade, solubilidade e outras propriedades físico-químicas do óleo, micela e solventes envolvidos no processo.

Já o extrator do tipo ROTOCEL, representado na Figura 2.11, utiliza tanto o método de percolação quanto o método de fluxo em contra corrente cruzado e conta com uma carcaça

cilíndrica em eixo vertical e nessa carcaça estão fixos os vagões que se movem ao redor do eixo. A capacidade de operação pode variar entre 100 e 2000 toneladas por dia. Ele possui velocidade regulável de rotação entre 35 e 75 rpm. O carregamento dos vagões ocorre por uma rosca em tubo horizontal e, através de um mecanismo de retenção, é obtido na saída da rosca um selo do próprio material que impede que o vapor de solvente passe para outras partes da empresa. Para descarga desses vagões, abre-se a tampa do vagão e seu conteúdo cai em um dispositivo destinado à descarga. Já a descarga do farelo é processada através de dispositivos reguláveis, permitindo que haja, em todas as situações, um selo, conforme explicado. Enquanto isso, o material a ser extraído recebe o solvente, que é lançado em forma de aspersão. A micela com concentração de até 35% é direcionada para a destilação (THOMAS, 2003).

Figura 2. 11 - Modelo de Extrator Tipo ROTOCEL (THOMAS, 2003)



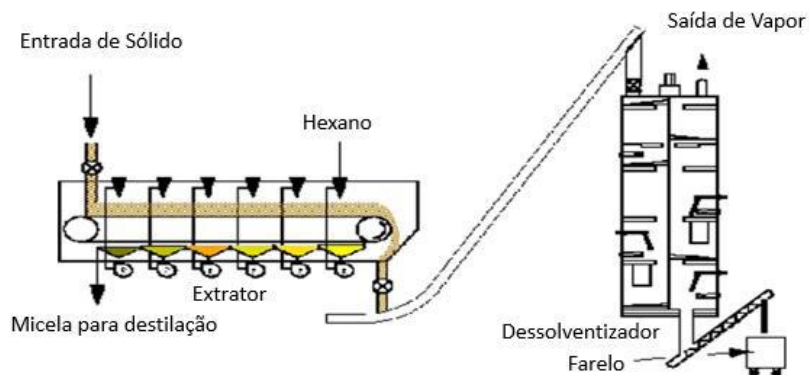
2.7.3 - Recuperação de óleo e hexano

Após a extração, deve ocorrer a recuperação do solvente hexano aplicado durante a extração. Para isso processos que objetivem recuperar o solvente precisam ser aplicados, entre eles “evaporação, destilação, dessolventização e tostagem” (ROTTA, 2015). Com o objetivo

de separar o solvente e o óleo, é realizada a destilação. E a dessolventização objetiva remover resíduos de solvente pelo uso de água (vapor) (ROQUE et al., 2015; ROTTA, 2015).

Após a extração, a micela é submetida ao procedimento de filtração e ocorre a transferência para um destilador contínuo, e o óleo e solvente são separados por aquecimento a vácuo (temperatura entre 70 e 90 °C). É possível chegar em torno de 5% de solvente na micela e o hexano residual pode ser destilado através da insuflação de vapor direto (MANDARINO; ROESSING; HIRAKURI, 2015). Nesse processo ocorre a formação do farelo de soja. A Figura 2.12 exemplifica um extrator do tipo SMET acoplado a um dessolventizador da mesma marca, ilustrando a operação com hexano.

Figura 2. 12 - Exemplo de Extrator SMET acoplado ao destilador (Adaptado de (BURGHART; EVRARD; INDUSTRIEL, 2019)



O farelo de soja obtido possui destinação alimentícia devido ao seu alto teor protéico e, por isso, deve haver um processamento térmico para retirar substâncias que causam sabores indesejáveis e fatores antinutricionais, como tripsina, lectinas e fitohemaglutininas (MANDARINO; ROESSING; HIRAKURI, 2015; OLIVEIRA, 1995). Para isso, é realizado um processo que combina a evaporação do solvente e cocção úmida, através de um dessolventizador – tostador. Esse equipamento possui sete estágios, com o vapor entrando direto no segundo, e é utilizado no farelo no terceiro estágio (MANDARINO; ROESSING; HIRAKURI, 2015).

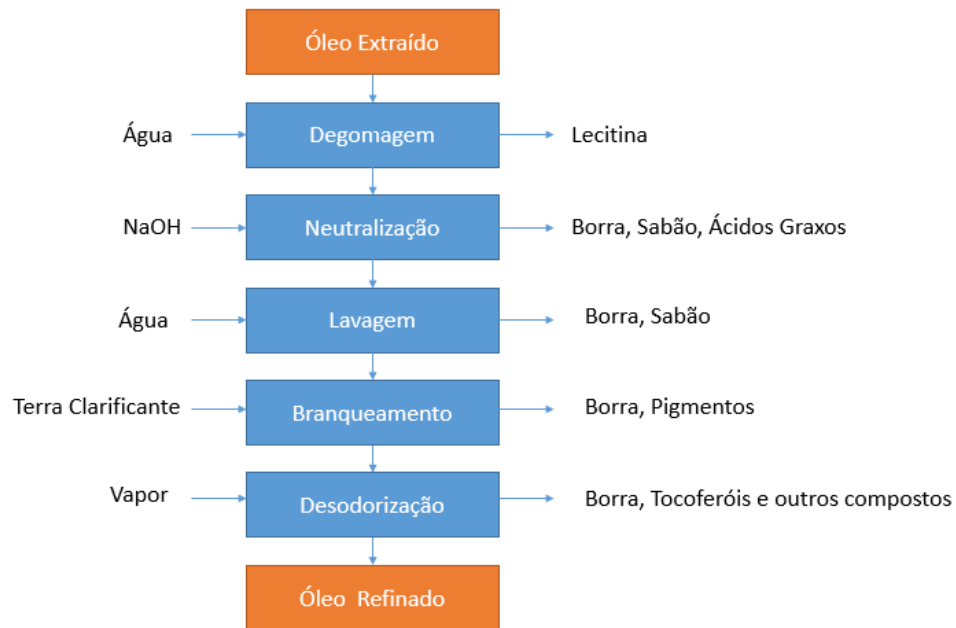
Os dois primeiros estágios eliminam quase totalmente o hexano do farelo, mas ele adquire um alto teor de umidade (entre 18 e 20%). Logo, posteriormente, o farelo é tostado, reduzindo o teor de umidade ao limite de interesse. O farelo fica no tostador por uma hora e o aquecimento nos estágios varia entre 85 a 115 °C. Esses aparelhos (com altura de 10 metros) conseguem tostar até 1000 toneladas de farelo por dia. O produto deve ser guardado em silos, com umidade de, no máximo, 12% (MANDARINO; ROESSING; HIRAKURI, 2015).

A dessolventização da micela e do farelo é responsável por remover o solvente aplicado na remoção do óleo. Ocorre uma perda de hexano devido à mistura incondensável dos vapores e o ar. A recuperação de solvente ocorre através de compressores de frio ou colunas de absorção em óleo mineral, visto que o hexano é mais solúvel no óleo. Os gases, que são incondensáveis, entram por baixo da coluna e o solvente é absorvido pelo óleo em contracorrente com o mesmo (MANDARINO; ROESSING; HIRAKURI, 2015).

2.7.4 - Refino do Óleo de Soja

Uma vez que o óleo de soja foi obtido, ele pode ser submetido a diversos procedimentos para transformar o óleo bruto em um produto utilizado também no ramo alimentar, de modo a auxiliar a atribuição de valor comercial a esse processo. Para a obtenção de um produto para o setor alimentício, o óleo bruto deve ser refinado, processo que contempla a deslecitinização (ou degomagem), neutralização, branqueamento e desodorização (OLIVEIRA, 1995), conforme resumido na Figura 2.13.

Figura 2. 13 - Esquema de Refino de Óleo



Durante a primeira etapa, a degomagem, ocorre a remoção de fosfolípidios (gomas) do óleo de soja, aumentando a sua estabilidade física e facilitando as etapas posteriores do refino. Esses fosfolípidios, quando hidratáveis, são facilmente removidos apenas pela adição de água. Quando ocorre a hidrólise enzimática desses fosfolípidios, eles se tornam fosfolípidios não hidratáveis (NHP) e não podem ser removidos pela adição de água. Geralmente, a formação de NHP ocorre devido a condições ruins de armazenamento e preparo do grão, como, por exemplo, o excesso de umidade. Caso a qualidade do óleo seja boa, 90% dos fosfolípidios serão hidratáveis (GUNSTONE, 2002).

O processo de degomagem pode ocorrer em batelada ou contínuo. No procedimento em batelada, a água é adicionada em mesma porcentagem (1 a 3%) que os fosfolípidios, aquecida a 70 °C e agitada por 30 a 60 minutos, seguido de centrifugação (GUNSTONE, 2002). As gomas com 50% de umidade são secas a vácuo entre 70 e 80 °C (MANDARINO; ROESSING; HIRAKURI, 2015). Como resultado, o produto obtido nessa etapa geralmente consiste em uma mistura de fosfatídeos, óleo, umidade e outros compostos em frações minoritárias. Para remoção dos fosfatídeos não hidratáveis, caso estejam presentes em grandes

quantidades, deve ocorrer uma segunda etapa de degomagem utilizando ácido fosfórico ou cítrico (BENITES, 2008).

Após o procedimento de degomagem, deve haver a neutralização desse óleo através de soluções alcalinas, como, por exemplo, hidróxido de sódio ou carbonato de sódio. Essa etapa também pode ser chamada de refino cáustico ou desacidificação. A neutralização ocorre na região em que há contato entre o óleo e a solução alcalina. Nesse processo, ocorre a formação de sabão, que também adsorve pigmentos e os fosfatídeos não hidratáveis. Dessa forma, após esse processo, há a necessidade de realização de centrifugação, que facilita a separação do sabão formado e do óleo (GUNSTONE, 2002; MANDARINO; ROESSING; HIRAKURI, 2015).

Há o processo contínuo, mais moderno, e o processo descontínuo, mais antigo e que não está mais em uso, além do método Zenith, que realiza a adição de óleo à solução aquosa (MANDARINO; ROESSING; HIRAKURI, 2015). Nesse trabalho, será explicado o método contínuo por ser o mais aplicado no Brasil. A maioria das indústrias utilizam contínuo, que por demorar menos e ter menos perdas.

No método contínuo, após a mistura entre o óleo e a solução, ocorre separação por centrifugação, obtendo-se um óleo mais puro. Esse processo foi desenvolvido nos Estados Unidos em 1933. A principal vantagem da neutralização utilizando centrífuga no processo contínuo, apesar de seu custo, é que não há muita modificação do padrão de produto obtido, uma vez que os ajustes operacionais não são alterados por operadores e a qualidade do óleo que entra na centrífuga deve seguir padrões estabelecidos (SEIP, 1965).

Esse método contínuo convencional consiste na adição de soda cáustica a 35 °C, com o auxílio de uma bomba, seguida de agitação e aquecimento a 80 °C. Em seguida, essa mistura seria transferida para uma centrífuga (SEIP, 1965).

Uma vez que o óleo foi neutralizado, ele é lavado com porções de 10% a 20% de água aquecida (80 °C a 90 °C) e centrifugado, removendo o sabão residual. Devido à formação de borra e sabão, pode haver a perda de triglicerídeos ocasionada pelo arraste de óleo neutro pela

borra e pela saponificação (MANDARINO; ROESSING; HIRAKURI, 2015). O procedimento de lavagem faz com que a água, posteriormente separada, fique com um teor residual de óleo de 2,5% (PRADO et al., 2014).

Toda a borra que foi produzida durante o processamento e refino do óleo pode ser aproveitada para a extração de tocoferol, lecitina e óleo residual. Existe até mesmo a possibilidade de produção de combustível a partir dessa borra (VILLARDI et al., 2016). Após essa extração, essa borra pode ser aplicada na produção de sabão, após um procedimento de acidificação (MANDARINO; ROESSING; HIRAKURI, 2015).

O óleo neutro seco pode ser submetido à etapa de branqueamento, onde é possível obter uma borra com diversos compostos que podem ser extraídos, incluindo pigmentos (MANDARINO; ROESSING; HIRAKURI, 2015). Esse processo é importante, pois, além de remover pigmentos, possibilita a quebra de peróxidos, produtos primários de oxidação, em compostos de peso molecular mais baixo. Esses compostos de peso molecular mais baixo podem ser eliminados, em uma etapa conhecida como desodorização (GUNSTONE, 2002).

Durante a etapa de branqueamento, os pigmentos são adsorvidos em terras clarificantes, ativadas (preparadas a partir de silicato de alumínio) ou naturais, em proporção variante, por 20 a 30 minutos. As terras naturais possuem menor poder clarificante, são mais baratas e retem uma quantidade inferior de óleo (MANDARINO; ROESSING; HIRAKURI, 2015).

No Brasil, o branqueamento descontínuo é majoritariamente realizado. Entretanto, existem indústrias esmagadoras que adotaram o método contínuo, que utiliza óleo aquecido na forma de uma suspensão a 10%. A mistura passa pelo branqueador por 20 minutos e depois é direcionada a um filtro prensa, sendo o filtro prensa mais usual o filtro de quadros e placas. É possível também combinar essa etapa com o uso de temperatura, reduzindo a quantidade de terra clarificante necessária para obtenção da especificação final. O resíduo que fica no filtro possui um teor de óleo de 50%. Esse teor pode ser reduzido através da insuflação de vapor

direto e ar comprimido, mas isso gera um óleo de baixa qualidade e gera problemas para o filtro prensa (MANDARINO; ROESSING; HIRAKURI, 2015).

A última etapa de refino é a desodorização, para remover sabores e odores, removendo compostos produzidos durante a armazenagem e processamento, como “aldeídos, cetonas, ácidos graxos oxidados, produtos de decomposição de proteínas, carotenóides, esteróis, fosfatídeos e outros” (MANDARINO; ROESSING; HIRAKURI, 2015). Também são removidas as substâncias naturais presentes no óleo, como, por exemplo, “hidrocarbonetos insaturados e ácidos graxos de cadeia curta e média, ácidos graxos livres e peróxidos” (MANDARINO; ROESSING; HIRAKURI, 2015).

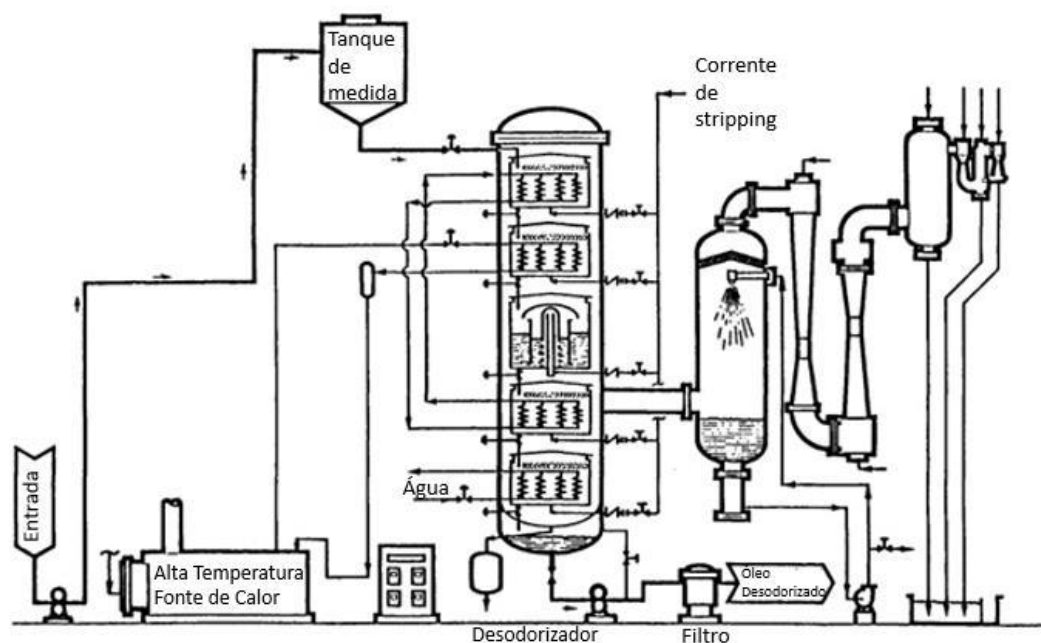
Na etapa de desodorização, em uma coluna de esgotamento é feita injeção de vapor a baixa pressão (LOPES, 2008). Além disso, a temperatura deste processo deve ser alta o suficiente para vaporizar componentes que conferem odores indesejáveis (LOPES, 2008) ou alteram as exigências organolépticas do produto (BUCZENKO; DE OLIVEIRA; VON MEIEN, 2014).

Esse processo pode ocorrer de maneira descontínua, semicontínua ou contínua. O método mais utilizado industrialmente, tanto para médio quanto para grande porte, para a desodorização é o semicontínuo, utilizando o aparelho tipo Girdler. O aparelho é composto por um cilindro de aço carbono, com 5 bandejas verticais no seu interior. Essas bandejas de aço inoxidável são apoiadas em elementos de ferro e o óleo retido dentro delas possui a mesma pressão em qualquer ponto. Há um espaço vazio entre as bandejas e cilindro, evitando que o ar externo toque o óleo (LOPES, 2008).

Em cada bandeja desse desodorizador, há um sistema de válvulas no fundo, que atua na descarga do óleo retido para a próxima bandeja. O aquecimento e a injeção de vapor direto nas bandejas ocorrem por serpentinas e/ou trocadores de calor. Durante o funcionamento, o primeiro estágio é carregado até completar a carga, que é aquecida com vapor d'água até 180 °C. Ao ser descarregada para o segundo estágio, é aquecida por fluido térmico, e a temperatura aumenta até 260 °C. E, a operação se repete após o estágio ficar vazio, existindo dois estágios

carregados. No terceiro estágio, ocorre a destilação da carga acima da temperatura determinada e, ao ficar carregado, descarrega no primeiro e o processo se repete até o quinto estágio. No quinto estágio, o óleo sofre resfriamento para ser filtrado (LOPES, 2008). Esse equipamento está respresentado na Figura 2.14.

Figura 2. 14 - Representação do equipamento de Girdler de desodorização semicontínua (Adaptado de Zehnder (1995))



Na desodorização, há a formação de uma borra rica principalmente em tocoferol e ácidos graxos. O Destilado da Desodorização do Óleo de Soja (DDOS) é rico, principalmente, em ácidos graxos livres, esteróis, além dos hidrocarbonetos, com potencial de produção de vitamina E (BENITES, 2008). Conforme apresentado no trabalho anterior (BENITES, 2008), o DDOS é apontado como produtor de Vitamina E, pois é barato e está presente no mercado brasileiro, sua composição é de cerca de 10% de tocoferóis (HIROTA et al., 2003) .

Tanto os ácidos graxos residuais da borra, quanto o óleo que é desodorizado, podem ser utilizados para a produção de biodiesel. No entanto, os ácidos graxos precisam ser submetidos ao processo de catálise ácida para a produção de biodiesel, devido à possibilidade

de formação de sabão com o catalisador alcalino convencional (VILLARDI et al., 2017b). No presente trabalho, será considerado que apenas o óleo refinado será destinado à produção de combustível.

É válido ressaltar que o processo de refino completo geralmente ocorre apenas para a obtenção de óleo com destinação alimentícia. No entanto, devido à possibilidade de recuperação de correntes com alto valor agregado, torna-se interessante acoplar essas etapas ao processo de obtenção de óleo para produção de biodiesel. Além disso, caso essas etapas não fossem cumpridas, poderiam permanecer substâncias no óleo de soja que prejudicariam as características do biodiesel obtido e etapas seguintes do processo. Um exemplo disso são os fosfolipídios, que conforme citado anteriormente, provocam a formação de fumaça quando o óleo é aquecido e podem formar emulsões nas demais etapas, caso não sejam removidos. Portanto, as etapas de refino são interessantes por aumentar a receita, através dos produtos de alto valor agregado gerados, e por garantir uma melhor qualidade do biodiesel produzido.

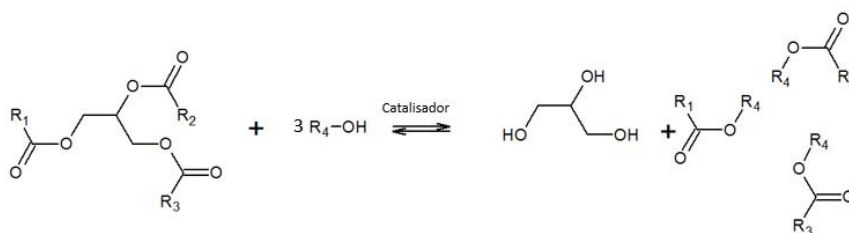
2.7.5 - Produção de biodiesel a partir do óleo de soja

Existem alguns processos químicos e bioquímicos que permitem a obtenção do biodiesel a partir do óleo de soja. A seguir serão explicados os principais processos.

2.7.5.1 - Processo de Transesterificação

De acordo com as referências consultadas em Rotta (2015), a transesterificação de triglicerídeos, esquematizado na Figura 2.15, é a forma mais tradicional, aplicada em diversos países, de obtenção de biodiesel. Nesta reação, o triglicerídeo, que pode ter como origem óleo vegetal ou gordura animal, com uso de catalisador, reage com um álcool de baixa massa molecular, normalmente metanol, e forma o biodiesel e o glicerol, que é seu subproduto (ROTTA, 2015).

Figura 2. 15 - Reação de Transesterificação de um Triacilglicerideo (Adaptado de Geris et al. (2007))



As etapas aplicadas anteriormente ao preparo da matéria-prima objetivam controlar a umidade e acidez, que serão posteriormente necessários para o sucesso da reação (ROTTA, 2015). A conversão do triacilglicerídeo a uma mistura de ésteres, estequiometricamente, requer 3 mols de álcool para cada mol de triglicerídeo e, industrialmente, é usado excesso de álcool para aumentar a produção de ésteres por deslocamento do equilíbrio e para facilitar a separação do principal subproduto formado (glicerol). Usualmente é adotada uma razão molar álcool:óleo de 6:1 (FREEDMAN; BUTTERFIELD; PRYDE, 1986; FREEDMAN; PRYDE; MOUNTS, 1981).

Na maioria dos países, o álcool utilizado é o metanol, sobretudo devido à disponibilidade limitada do etanol derivado da biomassa e do conseqüente preço mais acessível do metanol, produto de origem fóssil. No entanto, o Brasil, devido às condições geográficas, possui uma grande extensão territorial que permite a obtenção do bioetanol com maior facilidade. Além desse ponto, existem outras vantagens e desvantagens, resumidos na Tabela 2.10, que precisam ser discutidas para definição de qual reagente será utilizado (SOUZA, 2011). Outra vantagem que faz do metanol uma opção interessante é permitir uma

separação mais fácil do glicerol, em relação ao que ocorre quando o etanol é utilizado (ABREU, 2013).

Tabela 2. 10 - Comparativo entre utilização de etanol e metanol (SOUZA, 2011)

Vantagens Metanol	Vantagens Etanol	Desvantagens Metanol	Desvantagens Etanol
Consumido 45% menos que o Etanol.	Produção alcooleira consolidada no Brasil.	Tradicionalmente produto de origem fóssil.	Os ésteres etílicos possuem maior afinidade à glicerina, dificultando a separação.
Metade do Preço do Etanol.	Biodiesel tem maior número de cetano e lubricidade.	Tóxico.	Possui azeotropia com a água e requer mais energia para desidratar e investimentos com equipamentos.
Mais reativo.	Se for de origem de biomassa, 100% renovável.	Maior risco de incêndios.	Para uma mesma produtividade, rota metílica requer equipamentos com $\frac{1}{4}$ do volume.
Para uma mesma taxa de conversão, menor tempo é necessário.	Gera mais economia de divisas.	Transporte controlado pela Polícia Federal.	Dependendo do preço da matéria-prima, o custo pode ser 100% maior que o metílico.
Consome 20% do vapor da rota etílica, e consome menos da metade da eletricidade.	Não é tóxico.	Brasil tem baixa capacidade de produção de Metanol.	
Menor volume de equipamentos.	Menor risco de incêndios.		

Essa reação ocorre com agitação, onde o álcool anidro e o catalisador são misturados, que é normalmente o hidróxido de sódio na catálise básica. Finalizada esta etapa, óleo vegetal é adicionado e o reator é aquecido entre 60 °C e 70 °C (ROTTA, 2015).

Além do catalisador básico comumente utilizado, esse procedimento pode ser realizado com catalisadores ácidos, enzimáticos e catalisadores químicos heterogêneos. Os catalisadores básicos podem ser “hidróxidos de metais alcalinos, carbonatos e alcóxidos de metais alcalinos”, por exemplo. A literatura relata que os catalisadores KOH e NaOH fornecem maior rendimento e seletividade. Já catalisadores básicos não iônicos possuem como grande vantagem a baixa formação de subprodutos como sabões. Já os catalisadores ácidos que podem ser aplicados são Ácido sulfúrico, ácidos sulfônicos e ácido clorídrico (GERIS et al., 2007).

Existe também a possibilidade de utilização de enzimas como catalisadores, apesar dos maiores tempos reacionais utilizados (MAGALHÃES, 2014; YOUNG; PESSOA; QUEIROZ, 2015). A catálise enzimática pode ocorrer com enzimas imobilizadas ou não. As enzimas mais utilizadas são as lipases (GERIS et al., 2007). O principal custo relacionado a esta catálise é a imobilização da lipase e, quando utilizadas de forma imobilizada, podem ser consideradas catalisadores heterogêneos. No entanto, a etapa de purificação do biodiesel obtido apresenta custos menores, visto que é mais fácil separá-lo do meio reacional utilizado. Existem duas alternativas para minimização das despesas desse processo. A primeira delas é aumentar a atividade específica da lipase, sendo necessária uma menor quantidade de enzima para a produção de mais biodiesel. Já a segunda alternativa seria aumentar o reuso da enzima. Essas alternativas ainda não possuem aplicação industrial difundida (ZHAO et al., 2015).

Uma última classe de catalisadores utilizados são os catalisadores químicos heterogêneos. Esses catalisadores foram aplicados nessas reações com o intuito de diminuir a energia consumida e os custos envolvendo a separação dos catalisadores homogêneos dos produtos e subprodutos gerados. O emprego desses materiais reduz também os custos

relacionados à neutralização e lavagem do biodiesel. No entanto, as principais desvantagens são o maior tempo de reação necessário e a redução do rendimento do produto (ATADASHI; AROUA; AZIZ, 2011).

Um dos principais desafios nesse processo é obter um catalisador com rendimento satisfatório e que atenda aos critérios de resistência ao envenenamento e à lixiviação de componentes ativos (SERIO et al., 2008). Um catalisador químico heterogêneo com aplicação promissora é a classe suportada em CaO. Uma das suas principais vantagens é sua baixa solubilidade em metanol e seu baixo custo de obtenção. No entanto, a possibilidade de reuso desses catalisadores é questionada devido à redução de atividade catalítica ocasionada pela deposição de matéria orgânica. Esse processo faz com que o cálcio seja lixiviado e fique no biodiesel em concentração superior à concentração permitida na legislação (MARINKOVI et al., 2016). Logo, mais estudos são necessários para desenvolvimento de catalisadores heterogêneos para aplicação industrial.

Considerando o processo tradicional de catálise homogênea básica, a corrente de saída do reator contém os produtos da reação e o excesso dos reagentes e para separação deve haver um processo de separação do biodiesel e da glicerina, que pode ser por gravidade ou centrifugação, conforme apresentado em trabalho anterior (ROTTA, 2015). A purificação é feita por evaporação e elimina constituintes voláteis. A destilação a vácuo remove impurezas. O excesso de álcool não reagido é recuperado através de um condensador após a evaporação e, em seguida destilado, removendo percentuais de água restantes (ROTTA, 2015).

A separação que ocorre após a saída do reator é crucial, pois caso seja ineficiente pode aumentar os custos do refino dos derivados dos produtos obtidos. A pureza do biodiesel deve respeitar algumas especificações, como exigido pela Resolução ANP n° 30/2016 e n° 45/2014.

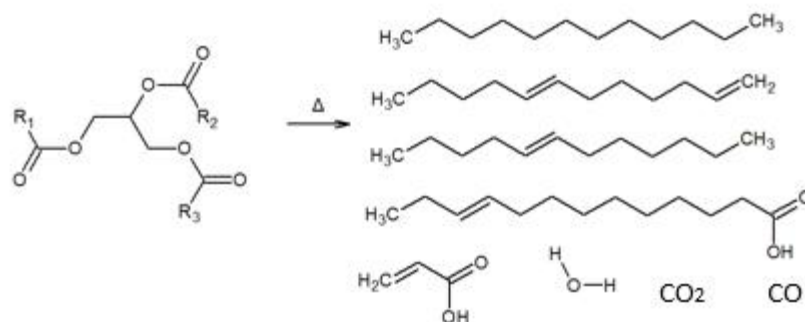
O biodiesel obtido precisa ser lavado e seco para garantir que a quantidade de água esteja dentro das especificações da legislação local. Nessa etapa, além de água, são removidos gliceróis livres, excesso de álcool e resíduos de catalisador. Além disso, a água adicionada facilita a neutralização do catalisador não reagido e viabiliza a remoção imediata de possíveis

sais formados. Essa lavagem tradicionalmente pode ocorrer com água destilada, com ácidos ou éteres. No entanto, de acordo com estudos econômicos, nesses processos há um consumo excessivo de tempo, energia, além da problemática gerada pelo efluente de água gerado. Esses problemas podem ser minimizados com a utilização de membranas para separação e purificação do biodiesel. No entanto, a utilização de membranas em escala industrial ainda precisa ser desenvolvida (ATADASHI; AROUA; AZIZ, 2011).

2.7.5.2 - Processo de Craqueamento Térmico

Conforme relatado em Caixeta (2009), de acordo com os dados obtidos em Suarez (2006), o processo de craqueamento térmico, em temperaturas maiores que 350 °C, provoca a clivagem de moléculas de óleos vegetais. Nesse processo, o uso de catalisador é opcional. Os produtos, ilustrados na Figura 2.16, são uma mistura de diversos compostos de propriedades físico-químicas parecidas com o diesel, além de ácido propiônico, monóxido de carbono, dióxido de carbono e água. Esses compostos oxigenados formados são uma das desvantagens desse processo (CAIXETA, 2009).

Figura 2. 16 - Obtenção de biodiesel através do Craqueamento Térmico de um triglicerídeo
(Adaptado de Caixeta (2009))

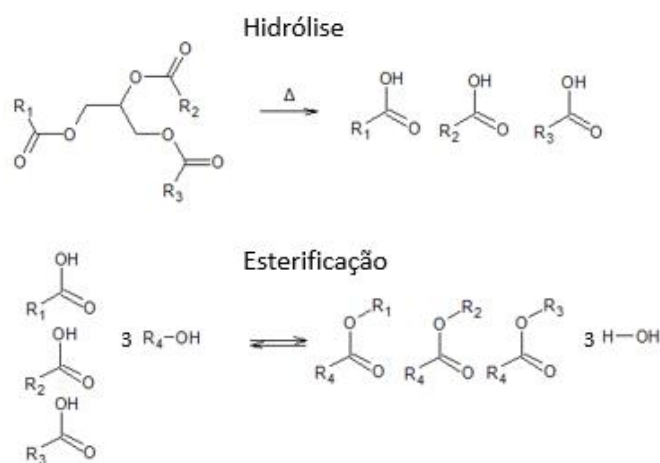


A mistura obtida não se enquadra na definição de biodiesel apresentada pela ANP por não ter sido produzido através de transesterificação e esterificação e por não ser constituído de alquilésteres de ácidos carboxílicos. No entanto, tal processo merece destaque por gerar uma mistura de compostos com características semelhantes ao diesel petroquímico.

2.7.5.3 - Processo de Esterificação

A esterificação é uma reação entre um ácido orgânico e um álcool para produzir um éster, havendo a substituição de uma hidroxila oriunda de um ácido orgânico por um radical alcoxila do álcool e gerando, conseqüentemente, a eliminação de uma molécula de água, conforme Figura 2.17 (CAIXETA, 2009).

Figura 2. 17 - Obtenção de biodiesel através da Esterificação de Triglicerídeos (Adaptado de Caixeta (2009))



Utilizando como matéria-prima triglicerídeos, é fundamental uma reação de hidrólise antes da esterificação. A estequiometria dessa reação é de 1:1 (molar). O subproduto da reação de esterificação é a água, o que é vantajoso ambientalmente quando comparado às reações que produzem glicerina (CAIXETA, 2009).

A principal aplicação da esterificação é a produção de biodiesel a partir de matérias-primas ácidas, como a borra de soja ou o destilado de desodorização do óleo de soja, ou para o tratamento de matérias-primas com alto teor de ácidos graxos livres. Dessa forma, a esterificação apresenta o benefício de poder ser aplicada para uma gama mais ampla de matérias-primas de mais baixo custo, representando uma possível solução para os atuais

problemas enfrentados com o custo de matérias-primas convencionais (VILLARDI et al., 2017b, 2017a).

2.8 – Processos de Produção avaliados na Literatura

Devido à competitividade do óleo de soja com a indústria de alimentos e ao alto custo do óleo de soja destinado para a produção de biocombustíveis, a produção de biodiesel requer subsídios para garantia de sua viabilidade econômica. Um dos principais motivos dessa inviabilidade é o alto custo da matéria-prima, principalmente do óleo de soja. Diante deste fato, muitos autores destinaram seus estudos a analisar economicamente alternativas para preços mais competitivos e menores custos na produção do biodiesel de soja.

Zhang et al. (2003) avaliaram e compararam economicamente a produção de 8000 ton/ano de biodiesel a partir de óleo virgem e óleo de cozinha residual em processos de catálise básica e ácida, totalizando quatro diferentes cenários. Durante o estudo realizado com catálise básica, os resultados indicaram que, apesar do óleo de cozinha residual ser uma matéria-prima mais barata do que o óleo virgem, foram necessários mais equipamentos e equipamentos mais caros. Isso ocorreu pois, por se tratar de um óleo já utilizado, havia um alto teor de ácidos graxos livres, que precisavam ser removidos para evitar que o rendimento da catálise básica fosse prejudicado devido a reações de saponificação, fazendo com que uma etapa de pré-tratamento fosse necessária. Já o cenário de catálise ácida, utilizando óleo de cozinha residual, requereu um menor número de equipamentos, mas uma maior quantidade de metanol foi utilizada. Dessa maneira, os equipamentos precisaram ser maiores, afetando seu custo. A catálise ácida também requer que mais equipamentos sejam construídos com aço inoxidável, aumentando também seu custo.

Go et al. (2012) compararam os custos da transesterificação catalisada por bases e por enzima, utilizando o Software SuperPro. Foram comparados três cenários: processo de catálise homogênea básica utilizando metanol e óleo de soja (I), processo enzimático utilizando lipases com até 10 ciclos (II), e processo híbrido contemplando produção química de biodiesel e produção enzimática de glicerol carbonato (III). O processo tradicional (I)

apresentou menores investimentos iniciais, sendo quase 10 mil dólares mais barato que as demais alternativas, que tiveram custos em torno de 26 mil dólares, representando até 48% de economia. Além disso, o primeiro processo apresentou os menores custos operacionais, tendo custos inferiores a 10% dos custos dos outros processos. No segundo processo, a etapa de purificação e separação do biodiesel obtido é facilitada, apesar de ser necessária uma destilação para remoção de metanol do produto final. O processo II necessitou da menor temperatura reacional (30 °C), consumiu maior quantidade de metanol e teve o maior rendimento de biodiesel. E, no último processo avaliado, a conversão de glicerol em glicerol carbonato, produto de alto valor comercial, foi adotada como uma alternativa para o excesso de glicerol produzido industrialmente e também foi considerado o reciclo da enzima. Como conclusão observa-se que o processo enzimático eleva os custos do processo devido ao alto custo de enzima e condições necessárias para trabalhar com a mesma. No entanto, no sistema híbrido, as receitas geradas pela comercialização do glicerol carbonato elevaram os lucros do processo e permitiram que o tempo de retorno do investimento, por exemplo, fosse reduzido pela metade, quando compara-se o primeiro e o terceiro processos.

A grande importância do estudo apresentado anteriormente é a possibilidade de geração de receitas através de outros produtos, além do biodiesel, tais como glicerol carbonato. Essa receita auxilia a viabilizar economicamente um empreendimento. Em relação aos custos com matérias-primas, para a produção de biodiesel, a principal parcela costuma corresponder ao preço do grão de soja ou do seu óleo. No entanto, quando a tecnologia enzimática é empregada, o custo relativo às enzimas exerce uma contribuição importante quando comparado ao custo do grão de soja. Assim, o preço do biodiesel passa a sofrer forte influência do preço desses dois insumos (YOUNG; PESSOA; QUEIROZ, 2015).

Haas et al. (2006) avaliaram o impacto do preço de venda da glicerina e do custo da matéria-prima no custo do biodiesel produzido por catálise homogênea básica. Através de simulação em Aspen, o autor obteve uma relação linear e inversamente proporcional entre o preço de venda do glicerol e o custo de produção do biodiesel. Já o preço de aquisição da matéria-prima, conforme esperado, exerceu grande influência no custo de produção do

biodiesel, podendo, inclusive, apenas por sua variação, tornar a venda do biocombustível inviável. Esse estudo ressalta a dependência e influência do preço do grão no produto final.

Conforme visto, existem diversos estudos que procuram avaliar a viabilidade da produção do biodiesel a partir do óleo de soja. Essas análises contemplam variações de preços de matérias-primas, mudanças processuais, modificações nos preços dos produtos vendidos, além da possibilidade de vender outros sub e co-produtos para geração de receita extra. Neste contexto, o presente trabalho reunirá todas as possibilidades com o intuito de obter uma biorrefinaria de soja com o objetivo principal de comercialização de biodiesel economicamente viável.

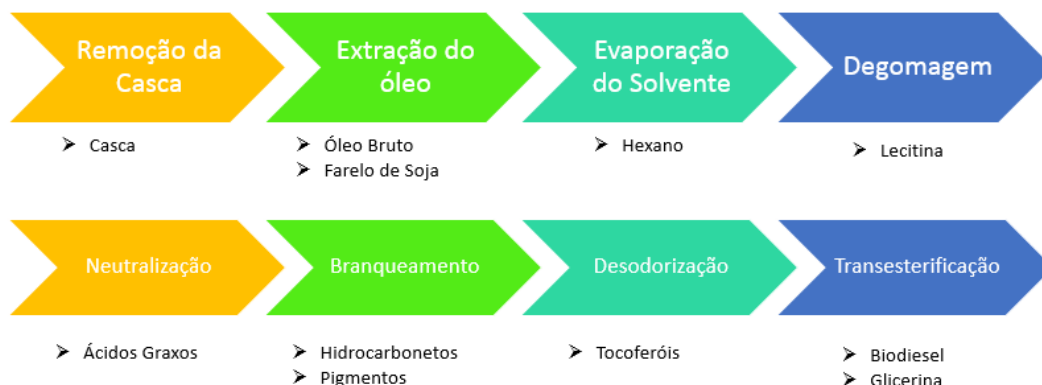
Processo Integrado

3.1 - Integração das etapas

Muitos autores avaliaram alternativas para viabilizar o processo de transesterificação do óleo de soja para a produção de biodiesel. No entanto, há um grande potencial de redução dos custos de produção de biodiesel nas etapas anteriores à transesterificação. Desde o descascamento do grão, extração do óleo e refino, existe a possibilidade de recuperação e comercialização de diversas correntes, contendo produtos de interesse econômico, que não foram consideradas nas análises previamente apresentadas. Com isso, a comercialização desses produtos adicionais pode ser considerada alternativa para viabilizar economicamente a produção de biodiesel a partir do grão de soja, sem a necessidade de subsídios governamentais.

Na literatura já constam alguns estudos avaliando os principais derivados que poderiam ser obtidos no processo. A Figura 3.1 mostra, sob um aspecto geral, as correntes de interesse que podem ser recuperadas desde a extração do grão de soja até a obtenção do óleo refinado. Dentre os produtos mencionados, destacam-se o farelo de soja, a lecitina de soja, sabão, tocoferol e o óleo de soja, que pode ter destinação alimentícia ou para a produção de biocombustível (VIANNA; XAVIER; HENRIQUE, 1999). Caso esse óleo de soja seja direcionado para a produção de biodiesel, ainda é possível obter a glicerina.

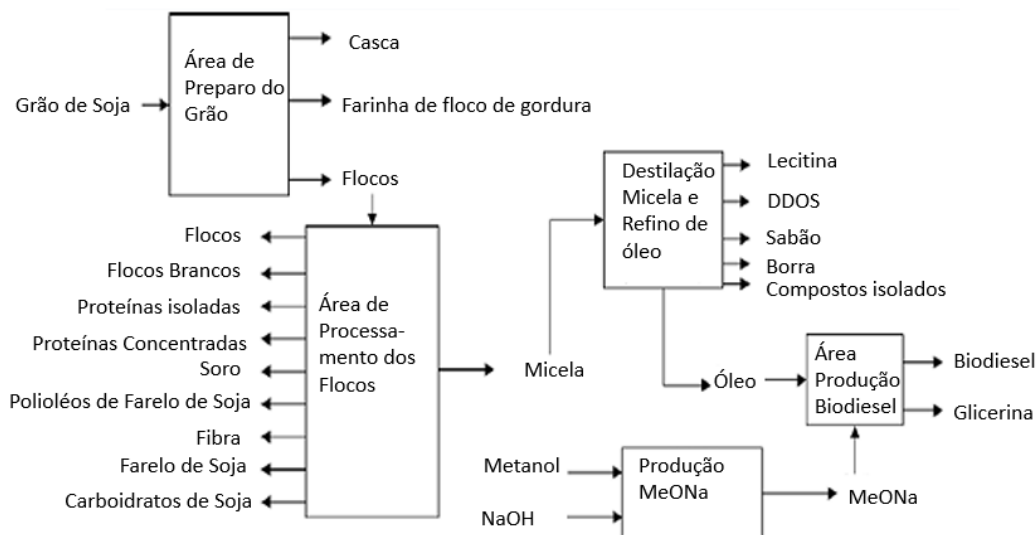
Figura 3. 1 - Resumo das principais correntes de interesse obtidas/ reutilizadas a partir do grão de soja



Esse processo integrado, que aproveita os resíduos e correntes gerados, pode ser enquadrado na classificação de biorrefinaria (ALVIM et al., 2014). Uma avaliação técnica de uma biorrefinaria semelhante foi realizada por Granjo, Duarte e Oliveira (2015) através de simulações no Software Aspen Plus. As etapas de obtenção, refino e transesterificação avaliadas em conjunto mostraram o potencial da avaliação integrada e permitiram a identificação da possibilidade de integração de correntes de água e energia, resultando num menor custo do biodiesel produzido.

A continuação desse trabalho, focando a integração energética para redução do custo de utilidades, conduziu ao projeto otimizado da rede de trocadores de calores de uma biorrefinaria integrada contemplando seis áreas de processo, sendo elas: preparo dos grãos, extração do óleo, destilação da micela, refino do óleo de soja, produção do metóxido de sódio e produção de biodiesel via catálise básica homogênea, conforme resumido na Figura 3.2 (GRANJO; DUARTE; OLIVEIRA, 2017).

Figura 3. 2 - Diagrama de blocos global de uma biorrefinaria de soja (Adaptado de Granjo; Duarte; Oliveira (2017))



Nesses trabalhos (GRANJO; DUARTE; OLIVEIRA, 2015, 2017), os principais objetivos foram a avaliação de como a integração energética e de correntes de água poderiam diminuir os custos do processo e atingir o cenário ideal de integração. Dessa forma, o presente trabalho se difere dos trabalhos anteriores por possuir um olhar mais específico para os balanços de massa e análise econômica da biorrefinaria, considerando o cenário do sudeste brasileiro.

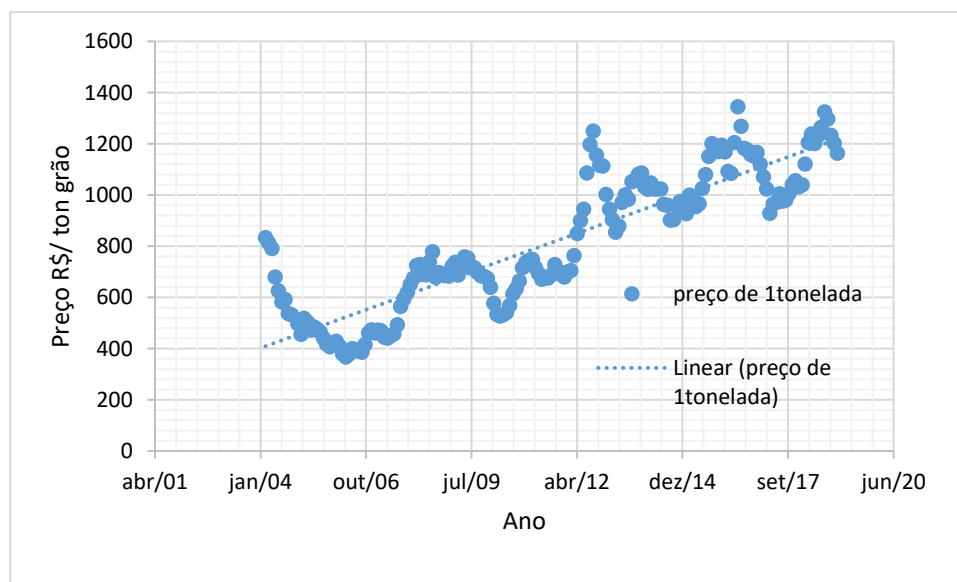
3.2 - Insumos e Produtos da Biorrefinaria

Conforme visto nos capítulos anteriores, há uma infinidade de produtos que podem ser obtidos na biorefinaria de soja. A seguir, serão detalhados os principais aspectos comerciais dos produtos e insumos gerados / utilizados por essa biorrefinaria. Para todos os custos calculados pelos sites de exportação e importação nacional, o preço utilizado foi o dólar *Free On Board*, e como base de conversão utilizou-se R\$ 3,70/ dólar.

- Grão de Soja

De acordo com dados de Maio de 2018, o consumo interno de grão de soja no Brasil foi de 59,0 milhões de toneladas e o país foi responsável pela exportação de 68,1 milhões de toneladas, correspondendo a aproximadamente US\$ 25,7 bilhões (EMBRAPA, 2018). A Figura 3.3 apresenta os preços do grão de soja comercializado nos últimos anos no cenário nacional (AGROLINK, 2020). É possível notar a flutuação dos valores e a tendência de crescimento dos mesmos. Devido à modificação ao longo dos anos, o valor considerado no presente estudo como preço da tonelada do grão de soja foi R\$ 1.200,00, que corresponde ao preço médio de comercialização do último ano dentro do Brasil.

Figura 3. 3 - Preços da tonelada do grão de soja no Brasil (Elaborado a partir de dados do Agrolink (2020))



- Hexano

O hexano é o principal solvente utilizado para extração do óleo de soja e, dessa forma, o preço desse item pode influenciar fortemente a viabilidade da biorrefinaria. No Brasil, a maior produtora nacional de hexano é a Petrobras, que é responsável por suprir parte da demanda da indústria alimentícia e, em consequência, a de biodiesel também. Os responsáveis pela precificação do mesmo são as distribuidoras (PETROBRAS, 2019).

O preço de compra do hexano foi determinado de acordo com o preço médio de importação, no ano de 2018, de acordo com a média da Base de Dados governamental para a região sudeste, sendo equivalente a R\$ 157.404,00/ ton (COMEX STAT, 2019). Foi considerado o preço de importação, pois nas bases oficiais consideradas não há dados sobre preço de exportação desse item.

- Metanol

De acordo com relatórios de comércio exterior divulgados pela ANP, o Brasil é um importador de metanol e não exporta nenhuma quantidade do mesmo, indicando que todo o metanol produzido aqui é consumido, além do consumo do metanol importado (AZAMBUJA et al., 2018). O metanol possui um custo relativamente baixo nos países onde a produção de biocombustíveis é bem estabelecida. Adotou-se como preço do Metanol o preço de importação, no ano de 2018, de acordo com a média da Base de Dados do governo para a região sudeste, sendo equivalente a R\$ 64.750,00/ tonelada (COMEX STAT, 2019).

- NaOH

O NaOH é uma base utilizada por diversos setores da indústria química e que possui ampla produção nacional. O valor de comercialização considerado do mesmo, considerando 96% de pureza, foi R\$ 2.500,00 / tonelada, considerando o preço médio de fornecedores na região sudeste (TYWH, 2019). Neste caso, não foi considerado o preço observado nas referências de precificação oficiais, pois os valores apresentaram muitas discrepâncias em relação aos preços observados em sites de diversos fornecedores nacionais para indústrias.

- Água

O preço da água possui variações de acordo com a localização no Brasil. Dessa forma, observou-se através de um estudo do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento que a região sudeste é beneficiada pelo preço da água, devido à sua localização geográfica. O custo da água considerado foi de R\$ 2 /m³ (SNIS, 2019).

- Terras Diatomáceas

Terras Diatomáceas possuem como principal constituinte o dióxido de silício. Elas são aplicadas no setor agrícola em controle de pragas. É possível adquirir este material por um valor em torno de R\$ 33,90 para cada 200 g, ou seja, R\$ 169.500,00/ tonelada (CONSTANZO, 2019).

- Casca de Soja

A casca de soja inteira, um dos subprodutos da produção de óleo a partir do grão de soja, é comercializada pelos agricultores para incorporação na ração alimentar ou para queima. Sua comercialização é usualmente realizada em sacos de 12 kg e o preço varia entre 13 e 14 reais (MFRURAL, 2019). Dessa forma, o preço do saco adotado para esse estudo foi de R\$ 13,50 por saco de 12 kg, ou seja, R\$ 1.125,00/ tonelada. Neste caso, não foi considerado o preço das referências oficiais, tais como média de vendas do Brasil, pois os códigos da Nomenclatura Comum do Mercosul (NCM) especificam cascas e resíduos, mas não proveniente necessariamente da soja. Dessa forma, adotou-se o valor de um site que comercializa esses produtos de pequenos e médios agricultores.

- Farelo de Soja

O Farelo de Soja é um dos principais produtos associados à cadeia produtiva da soja, principalmente devido ao seu teor protéico. Dessa forma, sua exportação, de acordo com dados atualizados em maio de 2018, foi de 14,2 milhões de toneladas ou U\$ 5,0 bilhões (EMBRAPA, 2018). Adotou-se como preço do Farelo de Soja a média do preço de exportação, no ano de 2018, de acordo com a média da Base de dados oficial do governo para a região sudeste, sendo equivalente a R\$ 2.633,00 / tonelada (COMEX STAT, 2019).

- Fosfolipídios

A lecitina de soja, que possui 35% de fosfolipídios e é gerada na etapa de degomagem do óleo de soja, pode ser comercializada com o intuito de aumentar as receitas dessa indústria. De acordo com a Zona Cerealista (2019), 200 gramas de lecitina de soja estão sendo

comercializados atualmente por R\$ 32,99, isto é, R\$ 164.950,00/ tonelada. Nesse caso, como a comercialização não é realizada na forma pura dos fosfolipídios e, sim, na forma de lecitina, não foram utilizados preços oficiais, pois a seção de lecitinas da NCM também inclui outros fosfoaminolipídeos não encontrados na soja, que poderiam causar distorção nos preços.

- Tocoferóis

Os Tocoferóis, utilizados para a produção de Vitamina E, possuem um valor de mercado elevado, que permite a sua utilização como fonte de receitas para plantas industriais. Adotou-se como preço dos Tocoferóis o preço de exportação, no ano de 2018, de acordo com a média da Base de Dados do Governo Federal para a região sudeste, sendo equivalente a R\$141.216,00/ tonelada (COMEX STAT, 2019).

- Biodiesel

O preço de comercialização do biodiesel está fortemente relacionado com as características históricas e momentâneas do mercado. Existe o preço calculado pelas usinas e o preço calculado pela ANP, que é utilizado para os leilões de biodiesel. Não está disponibilizado o mecanismo de formação desse preço, mas é certo que o preço estabelecido considera a produção de soja e seu custo, pois, apesar do leilão da ANP não fixar a matéria-prima que será utilizada, é notável que a principal matéria-prima e maior influência na precificação seja a soja. Dessa forma, é muito difícil prever um preço de venda do biodiesel. Portanto, o valor adotado será o preço praticado no último leilão da ANP realizado em 2018, correspondendo a R\$ 2,43/ litro (BIODIESELBR, 2010, 2018). Esse valor é consistente com o valor apresentado pela ANP em seu último anuário estatístico para o preço médio do leilão de 2017 de R\$ 2,40/ litro, sendo equivalente a R\$ 2.794,00/ tonelada (ANP, 2018a).

Neste caso, não foram adotados os preços disponíveis nas bases de exportação e importação governamentais, pois os preços referentes ao NCM do Biodiesel apresentados foram muito distintos do valor considerado nos leilões da ANP. Portanto, optou-se pela utilização dos preços dos leilões.

- Glicerina

A glicerina é um dos sub-produtos mais conhecidos da produção de biodiesel por sua grande quantidade gerada e dificuldade de destinação de toda a sua produção. O preço médio de comercialização da glicerina, pureza de 85%, é de R\$ 1.000,00 por tonelada (ABREU, 2013).

Como o Brasil é um grande produtor de glicerina, devido às altas quantidades fabricadas junto ao biodiesel, também foi verificado o preço médio de exportação da glicerina no ano de 2018. No entanto, o valor médio para a glicerina estava muito superior, considerando as bases de dados governamentais, ao valor do biodiesel adotado nos leilões da ANP, o que é inconsistente, visto que a glicerina é um subproduto da produção de biodiesel e sua produção em excesso representa uma problemática no Brasil. Além disso, seu valor agregado é inferior. Dessa forma, considerou-se o valor de R\$ 1.000,00 / tonelada citado anteriormente.

- Esqualeno

Esqualeno é um dos hidrocarbonetos de maior importância no óleo de soja e possui importantes aplicações farmacêuticas. Sua obtenção e comercialização a partir dessa fonte é importante, pois substitui a fonte tradicional, que é o fígado de tubarão. O litro desse produto custa atualmente R\$ 6.109,00 (SIGMA ALDRICH, 2019). Assim, o preço seria R\$ 7.120.046,62 / tonelada. Neste caso, não foi encontrado um NCM específico para este item que permitisse a procura do preço em fontes tabeladas pelo governo brasileiro.

- Ácido Graxo

Os ácidos graxos isolados do óleo ou borra de soja também podem ser comercializados. Em 2018, o preço médio de importação da mistura de ácidos, de acordo com a média da Base de Dados oficial para a região sudeste do Brasil, equivaleu a R\$ 5.346,00 / tonelada (COMEX STAT, 2019).

A Tabela 3.1 resume todos os preços adotados.

Tabela 3. 1 – Resumo dos preços adotados em R\$/ tonelada

Descrição	Preço Base (R\$) / tonelada
Hexano	157.404,00
Grão de Soja	1.200,00
Água	2,00
Terra Diatomáceas	169.500,00
Metanol	64.750,00
NaOH	2.500,00
Casca de Soja	1.125,00
Farelo de Soja	2.633,00
Fosfolipídios	164.950,00
Tocoferóis	141.216,00
Biodiesel	2.794,00
Hidrocarbonetos (Esqualeno)	7.120.046,62
Glicerina	1.000,00
Ácido Graxo	5.346,00

3.3 - Empresas de Produção Integrada no Brasil

Conforme discutido no item 3.2, muitos produtos gerados ao longo do processo possuem valor superior ao do biodiesel. Em consequência, a estratégia de integração das etapas e comercialização das correntes de maior valor agregado já são adotadas em algumas indústrias. No Brasil, por exemplo, existem algumas empresas que produzem o biodiesel a partir do grão de soja e utilizam o conceito de integração do processo para tentar diminuir os custos de produção desse biocombustível.

Um exemplo de empresa 100% brasileira que integra as etapas de produção do biodiesel partindo do grão de soja é a Granol. A Granol produz e comercializa grãos, farelos e óleos vegetais, além do biodiesel para consumidores em todo o mundo. Ela atua nas etapas de armazenamento do grão, comercialização de farelo de soja, lecitina, glicerina bidestilada e chega a uma produção de biodiesel de até 887.000 m³ por ano. A estratégia adotada para

obtenção de lucros é justamente o acréscimo de valor por meio do aproveitamento dos subprodutos, derivados e o biocombustível (GRANOL, 2018).

A Oleoplan, responsável por 10% da produção nacional de biodiesel, é uma empresa que, em uma de suas vertentes, atua no processamento da soja e produção do biodiesel. Além dos tradicionais produtos da biorrefinaria de soja comercializados, essa empresa se destaca por também comercializar fertilizantes e defensivos agrícolas a prazo ou por permuta do grão de soja. Uma estratégia adotada pela empresa para garantir o seu desempenho é a fixação dos preços trabalhados, principalmente do defensivo agrícola, para dar uma segurança ao consumidor, agricultor, e conseguir se fixar no mercado (OLEOPLAN, 2018).

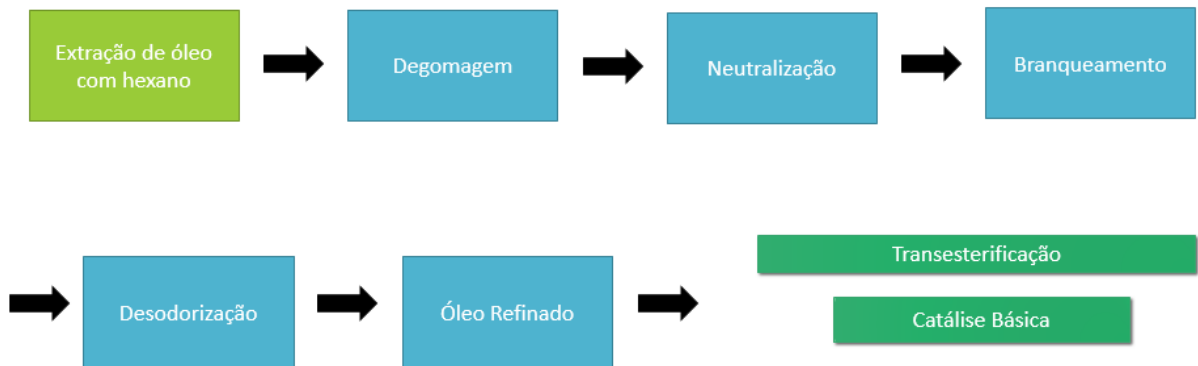
O Grupo Caramuru Alimentos, fundado em 1964, trabalha com soja, milho, girassol e canola e processa uma capacidade de 1.910.000 toneladas de soja por ano. No comércio interno, seu principal produto é o farelo de soja. Além disso, a empresa se diferencia por comercializar também derivados dos produtos, como proteínas texturizadas de soja. Com relação ao grão de soja, os principais produtos comercializados são lecitina, farelo de soja, óleo degomado, biodiesel, destilado de óleo, óleo refinado, melão de soja, ácidos graxos e glicerina (CARAMURU, 2019).

3.4 - Definições do Processo

Ao aplicar o conceito de biorrefinaria explorado pelas empresas e artigos citados anteriormente e ao considerar a comercialização de itens com diferentes importâncias mercadológicas, há uma série de definições tecnológicas que devem ser realizadas para o desenvolvimento de um código que permita simular essa planta e analisá-la economicamente.

No presente trabalho, utilizando o conceito de biorrefinaria e as informações disponibilizadas durante a revisão bibliográfica, foram propostas etapas, que estão resumidas na Figura 3.4. Essas etapas são utilizadas na construção de um programa computacional, utilizando o software GNU Octave, que permite o cálculo do balanço de massa de todas as etapas do processo e que indica a viabilidade econômica da planta, baseando-se em critérios econômicos que serão discutidos nos próximos Capítulos.

Figura 3. 4 - Diagrama de blocos do Processo adotado



A primeira etapa do processo integrado consiste na extração do óleo com a casca previamente separada. A casca, proveniente do grão de soja, será comercializada para inclusão na ração alimentícia de animais ruminantes. A casca corresponde a 7,3% do grão de soja, 90,3% é a polpa e 22,8% da polpa é óleo vegetal (GUNSTONE, 2002).

Na extração do óleo de soja, a utilização de prensas puramente mecânicas não é recomendada, visto que o teor de óleo no grão de soja é considerado pequeno (ANTONIASSI; FREITAS, 2019). Assim, o processo mais adequado é a extração por solvente hexano, não elevando significativamente os custos operacionais. Dessa forma, industrialmente, adota-se a extração contínua utilizando hexano, como discutido no Capítulo 02. A unidade de extração contínua é, usualmente, composta por cinco diferentes etapas: “extrator, dessolventizador – tostador, secador – resfriador, destilação e recuperação dos gases industriais” (OLIVEIRA, 1995). A micela, por sua vez, é transferida para um destilador, para a separação do óleo. Já o hexano residual é destilado para recuperação e redução dos custos com solvente. Nesse processo, obtém-se farelo de soja e o óleo de soja bruto.

O hexano é um solvente volátil que causa diversos problemas ao meio ambiente e aos operadores. O limite de emissão para a atmosfera adotado é de 0,8 kg de hexano / tonelada de óleo, respeitando regulamentações internacionais, devendo o excedente ser recirculado para o processo (ROQUE, 2015). A razão entre a massa de solvente e a massa de sólidos (grão sem a casca) no extrator é importante para a qualidade da extração. Uma pequena quantidade de

solvente resulta numa extração ineficiente, enquanto que uma relação elevada ocasiona um maior percentual de hexano na micela. Para o grão de soja, essa relação deve ser mantida entre 0,9 e 1,0 (ROQUE, 2015). O valor adotado para a relação entre hexano e grão de soja foi o máximo da faixa estabelecida, sendo, portanto, igual a 1,0.

A próxima etapa é a degomagem realizada no óleo de soja bruto utilizando água a 60 °C numa quantidade equivalente a aproximadamente 3% da massa de óleo tratada (GUNSTONE, 2002; MANDARINO; ROESSING; HIRAKURI, 2015). Nesse caso, haverá a remoção de parte dos fosfatídeos hidratáveis, que constituirão 90% dos fosfatídeos totais (GUNSTONE, 2002). Uma das correntes de saída consistirá na lecitina de soja, que possui em sua composição 35% de fosfolipídios e 50% de triglicerídeos (ADITIVOS INGREDIENTES, 2016).

Na etapa de neutralização, o óleo degomado será neutralizado com a utilização de NaOH a 65 °C, a uma concentração, aproximadamente, de 1,2% do teor de óleo. Ocorre a formação de sabão e a remoção de ácidos, os pigmentos são adsorvidos no sabão formado e esse óleo é lavado para remoção de sabão residual, com 20% de água, auxiliando a remoção dos 10% de fosfolipídios não hidratáveis que não haviam sido eliminados (MANDARINO; ROESSING; HIRAKURI, 2015).

Em seguida, ocorre o processo de branqueamento, utilizando terras clarificantes em uma proporção de 0,30%. O valor adotado considera a média da faixa proposta, devido às atuais tecnologias desenvolvidas. A mistura branqueada é direcionada ao filtro prensa e o resíduo do filtro tem um teor de óleo variável, mas que apresenta valores próximos a 50%. Esse teor pode ser reduzido, mas pode reduzir também a qualidade do óleo e gerar problemas operacionais (MANDARINO; ROESSING; HIRAKURI, 2015).

A última etapa do refino é a desodorização, que permite que os compostos voláteis sejam extraídos, compondo o DDOS, a partir do qual o tocoferol é obtido. Esse componente pode ser comercializado sob a forma de vitamina E. A principal consideração realizada nessa

etapa é que 10% do DDOS é tocoferol e o restante foi considerado como ácidos graxos livres ainda não removidos (HIROTA et al., 2003).

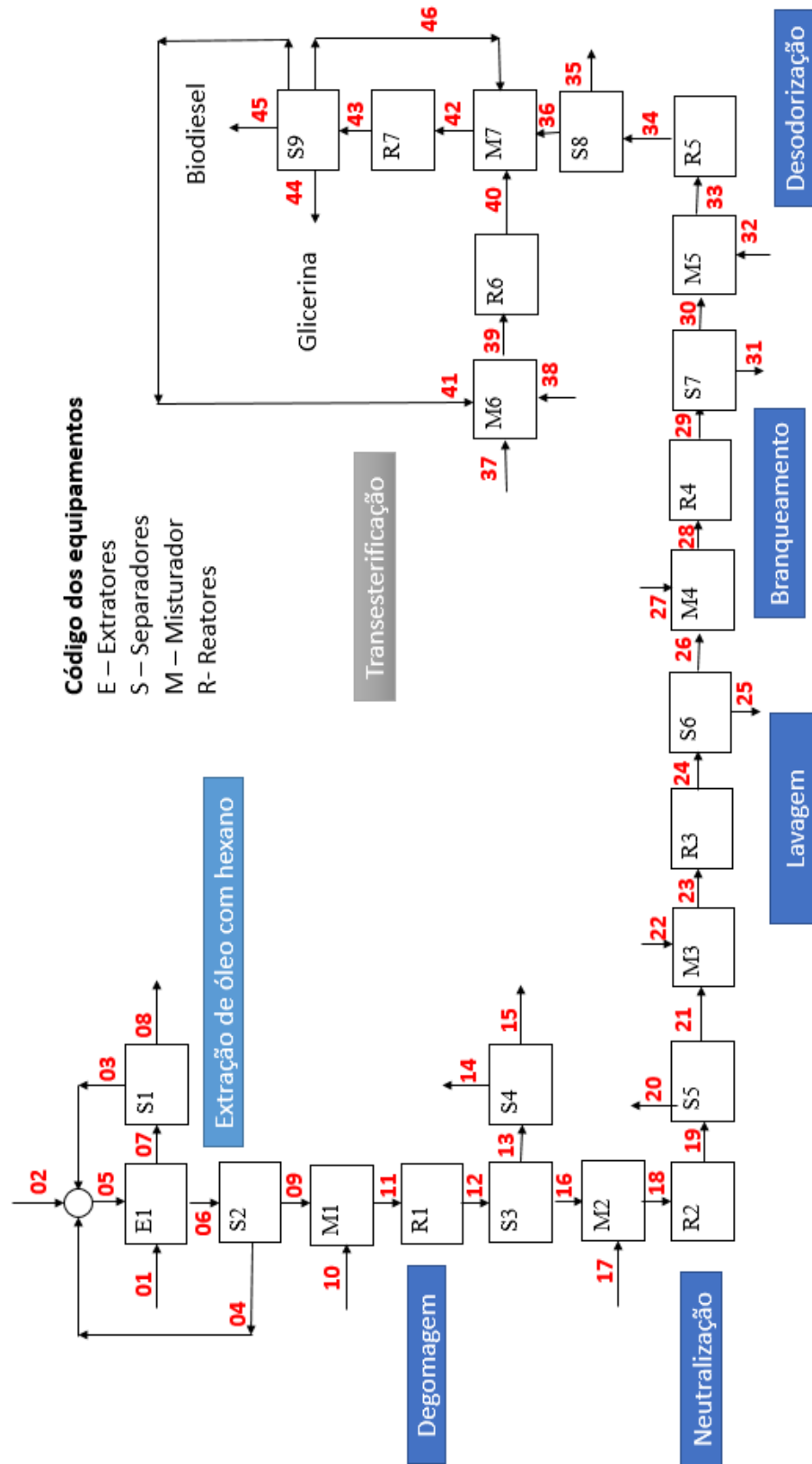
Com o óleo refinado, considera-se a ocorrência da transesterificação com metanol, utilizando catalisador básico (NaOH). Esse processo foi escolhido por ser o processo mais aplicado industrialmente (NASREEN et al., 2018). Além de biodiesel, há a formação de glicerina, devendo haver, portanto, a separação, purificação e secagem desses dois produtos. A conversão considerada para essa reação será de 90%, de acordo com a média observada nos trabalhos da literatura (SILVA et al., 2013).

Os dados citados neste capítulo, além das caracterizações de óleo e grão descritas no Capítulo 02, foram utilizados como informações necessárias para os cálculos implementados em GNU Octave, conforme descrito anteriormente na Seção 3.3.

3.5 - Estrutura de Cálculo

Utilizando as informações disponibilizadas, é possível definir uma estrutura de cálculo, que permitirá obter, a partir de um código implementado no *software* GNU Octave, as quantidades e características (composição) de cada uma das correntes envolvidas no processo. A Figura 3.5 apresenta de uma forma ampla toda a numeração utilizada para elaboração dos balanços de massa da biorrefinaria. A partir dessa definição, todos os cálculos são realizados utilizando os dados apresentados nos Capítulos 2 e 3 desse trabalho.

Figura 3.5 - Estrutura de Cálculo do Processo



A Tabela 3.2 descreve as principais informações das correntes ilustradas na estrutura de cálculo, Figura 3.5, e também de correntes que não aparecem explicitamente na estrutura, mas que são fundamentais nos cálculos realizados no GNU Octave. A última coluna da Tabela 3.2 indica se as quantidades calculadas naquela corrente foram consideradas matérias-primas, sendo um dos constituintes dos custos do processo, produtos responsáveis pela geração de receitas ou apenas um intermediário utilizado durante o cálculo.

Tabela 3. 2 - Descrição das correntes da estrutura de cálculo

Corrente	Descrição	Classificação
01	Grão de Soja descascado	Matéria-Prima
02	Make up de hexano	Matéria-Prima
03	Hexano recuperado do farelo	Intermediário
04	Hexano recuperado da micela	Intermediário
05	Hexano que entra para a extração	Intermediário
06	Óleo e hexano	Intermediário
07	Hexano e parte protéica	Intermediário
08	Farelo	Produto
09	Óleo para ser degomado com água	Intermediário
10	Água	Matéria-Prima
11	Óleo e água	Intermediário
12	Óleo e água	Intermediário
13	Fração aquosa contendo fosfatídeos hidratáveis	Intermediário
14	Fosfatídeos hidratáveis removidos	Produto
15	Corrente aquosa impura	Rejeito
16	Óleo para ser neutralizado	Intermediário
17	NaOH	Matéria-Prima
18	Óleo + NaOH	Intermediário
19	Óleo neutralizado + fração aquosa	Intermediário
20	Borra com ácidos graxos	Produto
21	Óleo neutralizado	Intermediário
22	Água para lavagem	Matéria-Prima
23	Água e óleo	Intermediário
24	Água e óleo	Intermediário
25	Água	Rejeito
26	Óleo	Intermediário

27	Terra	Matéria-Prima
28	Terra e óleo	Intermediário
29	Terra e óleo	Intermediário
30	Óleo branqueado	Intermediário
31	Terra com borra	Produto
32	Vapor	Matéria-Prima
33	Óleo branqueado e vapor	Intermediário
34	Óleo desodorizado com tocoferóis	Intermediário
35	Tocoferóis	Produto
36	Óleo desodorizado	Intermediário
37	Make-up Metanol	Matéria-Prima
38	Make-up NaOH	Matéria-Prima
39	Metanol e NaOH	Intermediário
40	Metanol e NaOH	Intermediário
41	Metanol e NaOH não consumidos	Intermediário
42	Metanol, NaOH e óleo	Intermediário
43	Metanol, NaOH e óleo	Intermediário
44	Glicerina	Produto
45	Biodiesel	Produto
46	Óleo recirculado	Intermediário

3.6 - Capacidade Total da Planta

Com o intuito de realizar as avaliações econômicas e determinar a viabilidade da planta, foi adotada uma metodologia para determinação da capacidade total da planta em função da produção de biodiesel.

Em abril de 2016, a ANP divulgou projeções para o cenário brasileiro em 2030. A ANP prevê uma demanda para esse ano de 93,6 bilhões de litros de diesel B. Em 2019, há a previsão de se chegar a 15% de biodiesel no diesel, havendo, portanto, a incorporação de 14,04 bilhões de litros de biodiesel no mercado brasileiro (APROBIO; UBRABIO; ABIOVE, 2016). Assim, considerando que, em 2017, o Sudeste representou 8% da produção de biodiesel nacional, a quantidade de $1,12 \times 10^6$ m³ de biodiesel por ano será a demanda projetada para o Sudeste em 2030. O valor de 8% de produção de biodiesel pelo Sudeste em relação ao Brasil também corresponde à média de produção a partir do ano de 2012. Antes de 2012, a produção era

proporcionalmente muito superior, correspondendo a quase 20% da produção nacional, e esses valores poderiam levar a uma análise equivocada dos dados, conduzindo a uma planta superdimensionada, causando prejuízos. A Tabela 3.3. resume os dados dos últimos anos (ANP, 2018a).

Tabela 3. 3 - Dados de produção anual (m³) de biodiesel no Brasil e no Sudeste (Dados obtidos em ANP (2018a))

	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Brasil	1167128	1608448	2386399	2672760	2717483	2917488	3419838	3937269	3801339	4291294
Sudeste	185594	284774	420328	379410	255733	261373	270891	295436	254259	334058
% Sudeste	16%	18%	18%	14%	9%	9%	8%	8%	7%	8%

Logo, considerando uma planta que seja capaz de suprir a demanda projetada para o Sudeste em 2030, a planta deverá produzir 141,82 m³/h. Considerando a densidade média do biodiesel 869,6 kg/m³ a 30 °C, a produção horária dessa planta deve ser de 123,3 ton/h (CAVALCANTE, 2010) . Assim, a produção dessa planta seria de 976 mil toneladas de biodiesel por ano. Em um ano, considerar-se-ão 7920 horas de operação para o presente estudo, este valor foi adotado por representar, aproximadamente, 330 dias de produção. A Tabela 3.4 apresenta então a capacidade necessária para atender à demanda total do Sudeste:

Tabela 3. 4 - Capacidade necessária para o Sudeste

Capacidade Anual de Biodiesel	Unidade
1123	Mil m ³ /ano
976	Mil ton/ano

No entanto, atualmente, no Sudeste, já ocorre a produção anual de 334,1 mil m³ (ANP, 2018a). Dessa forma, para que a planta não opere com uma capacidade excedente à necessária, a capacidade anual máxima de operação da planta será de 789,1 mil m³. Com essa capacidade somada à produção anual da região Sudeste, a demanda projetada será suprida. Nessa capacidade de 789,1 mil m³, a vazão de biodiesel produzida será de 99,63 m³ /h, ou 86,64 ton/h, correspondente a 686,2 mil ton/ano, conforme a Tabela 3.5.

Tabela 3. 5 - Capacidade projetada para a planta

Capacidade Anual	Unidade
789,1	Mil m ³ /ano
686,2	Mil ton/ano

O cenário estudado não considera o surgimento de outras plantas com esse mesmo propósito no período. Essa premissa pode ser considerada válida, visto que, caso essas plantas sejam criadas, os indícios seriam de que a economia brasileira estaria melhorando. Como consequência, o consumo de biodiesel seria mais elevado do que o previsto. Dessa forma, essas novas empresas não consideradas poderiam suprir uma demanda não prevista.

Outro questionamento sobre o critério adotado para a definição da capacidade máxima da planta seria que os cálculos realizados se baseiam na produção e não na capacidade produtiva. Atualmente, a comercialização de biodiesel no Brasil é realizada sob demanda compulsória, na forma de leilões. Logo, caso a demanda aumente, uma falha seria não prever o aumento da produção dessas plantas já existentes. Em contrapartida, essa falha pode ser relativizada se for considerada a obsolescência de plantas antigas e o surgimento de problemas devido ao tempo em que ficaram paradas, inviabilizando sua operação em capacidade máxima.

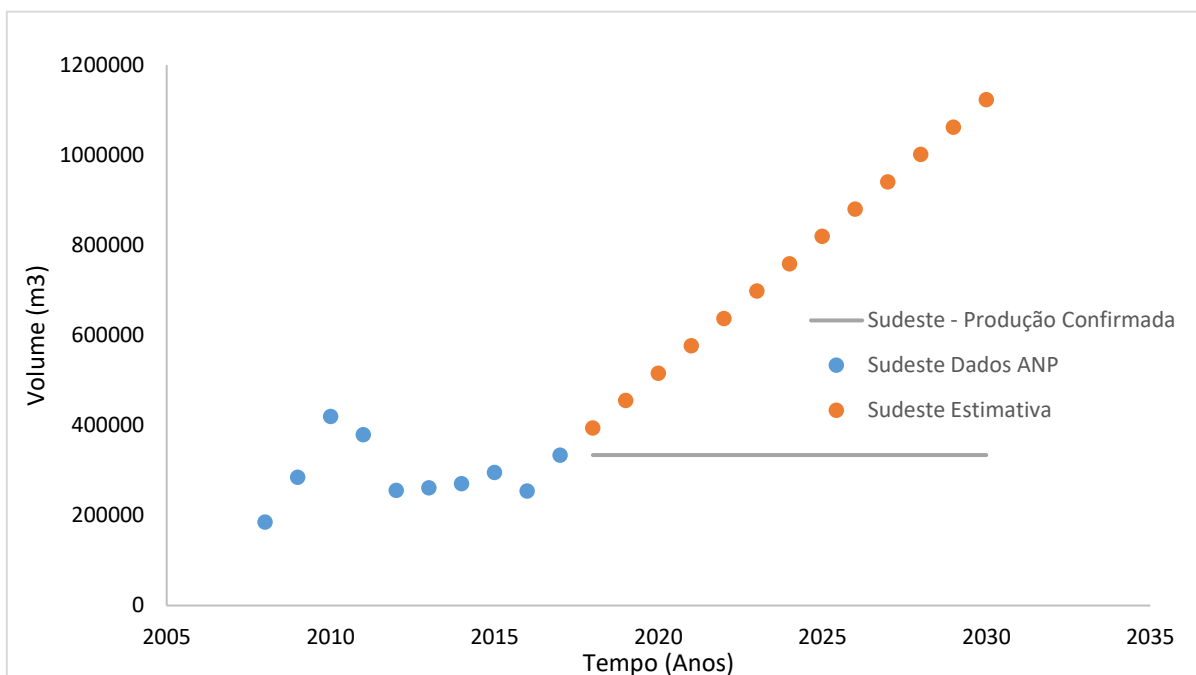
3.7 - Capacidade Operacional da Planta em Função da Demanda

Conforme definido anteriormente, a capacidade máxima da planta projetada será de 686,2 mil toneladas, ou 789,1 mil m³ de biodiesel por ano, de forma a atender à projeção de demanda para o Sudeste em 2030. No entanto, a sua capacidade de operação poderá variar conforme a demanda de biodiesel durante os anos, influenciando, portanto, os cálculos que serão realizados nos capítulos seguintes.

Considerando que o crescimento da demanda até o ano de 2030 para o sudeste ocorrerá de forma linear, pode ser proposto o seguinte gráfico, Figura 3.6, que resume os dados de

produção nos últimos anos e onde assume-se projeção linear de produção de biodiesel até 2030.

Figura 3. 6 - Produção de Biodiesel (m³) confirmada e estimada do Sudeste (Elaboração própria a partir de ANP (2018a) e APROBIO; UBRABIO; ABIOVE (2016))



A partir desse gráfico, pode-se considerar que todo o excedente da produção será atendido pela planta projetada até o ano de 2030. A partir de 2030, a produção considera pela planta será a mesma. Dessa maneira, a capacidade da planta durante seus anos de operação, considerando que os três primeiros anos seriam destinados à construção, será dada da seguinte forma (Tabela 3.6):

Tabela 3. 6 - Capacidade de produção de biodiesel da planta e quantidade de grão de soja utilizada

Ano	Capacidade de Produção da planta (m ³ /ano)	Quantidade de Grão de Soja Utilizada (ton/ano)
2019-2021	Em construção	0
2022	303.500	1.589.450
2023	364.200	1.907.341
2024	424.900	2.225.232
2025	485.600	2.543.118
2026	546.300	2.861.014
2027	607.000	3.178.901
2028	667.700	3.496.790
2029	728.400	3.814.677
2030-2041	789.100	4.132.566

Tendo definido a capacidade da planta, resta agora definir o modelo econômico que realiza os cálculos de viabilidade do empreendimento. Esse é o assunto do próximo capítulo.

Análise Econômica

4.1 – Dados Econômicos do Processo

Para realizar a análise econômica da biorrefinaria de soja, foi adotada a metodologia descrita por Silla (2003) e Turton et al. (2009).

4.1.1 – Investimento Inicial

O primeiro custo que deve ser calculado é o investimento inicial, que são os custos que envolvem a compra e instalação de equipamentos, tanto na área direta quanto indireta do processo avaliado. O investimento inicial pode ser classificado em cinco categorias, Tabela 4.1, de acordo com a precisão das informações utilizadas para esse cálculo.

Tabela 4. 1 - Classificações das estimativas de investimento (Elaborado a partir do livro de Turton et al. (2009), baseado em Marques (2018))

Classificação	Informações Utilizadas	Documentos Necessários	Propósito
Ordem de Magnitude (V)	Informações de custos de plantas industriais que já foram construídas. Esse valor deve ser ajustado pela escala, ano e local.	Diagrama de Blocos	Estudo de Factibilidade
Estudo (IV)	Parte de uma lista com todos os equipamentos, estimando seus custos. A partir disso, estima-se o custo da planta estudada.	Fluxograma de Processo	Estudo Conceitual
Design Preliminar (III)	Análise mais detalhada que “estudo” e requer dados de tubulação, instrumentação, equipamentos e rede elétrica, etc.	Fluxograma de Processo, acrescido de esboços de equipamentos e informações adicionais	Controle e Autorização Orçamentária

Definitivo (II)	Exigência de especificações preliminares em todos os equipamentos, utilidades, instrumentação e outros.	Fluxograma Final, acrescido de esboços de todos os equipamentos	Início da Fase de Licitação
Detalhado (I)	Há a exigência de diagramas de engenharia completos, cotações de equipamentos. É a última etapa antes da construção	Diagrama Final, balanços de utilidades e diagramas completos de infraestrutura da planta	Confirmação da Licitação

Cada uma das diferentes classificações conduz a diferentes níveis de definição do projeto. A análise econômica presente nesse trabalho se trata de um estudo de factibilidade da proposta de integração das etapas de obtenção do biodiesel de soja, permitindo que trabalhos posteriores avaliem em níveis de maior precisão o projeto. Para isso, utilizou-se uma estrutura de cálculo que se assemelha a um diagrama de blocos e a análise se enquadra na classificação Ordem de Magnitude (V). A partir da definição da classe em que o estudo é realizado, é possível obter uma estimativa da precisão e acurácia do projeto. A Tabela 4.2 resume o nível de definição e o nível de acurácia estimada (em relação à classe I) da análise.

Tabela 4. 2 - Classificação das estimativas de Custo de Investimento (Elaborado a partir do livro de Turton et al. (2009), baseado em Marques (2018))

Classificação	Nível de definição ou de conclusão do projeto	Acurácia estimada em relação à classe I
Ordem de Magnitude (V)	0 a 2%	4 a 20
Estudo (IV)	1 a 15%	3 a 12
Design Preliminar (III)	10 a 40%	2 a 6
Definitivo (II)	30 a 70%	1 a 3
Detalhado (I)	50 a 100 %	1

Os valores obtidos de plantas industriais com tecnologias semelhantes de estudos já existentes para a Classe V precisam ser ajustados através da escala, Equação (1). Para isso pode ser utilizada a regra de 6/10 de Simpson. Por essa regra, o preço da nova instalação (Ca) é dado através do custo da instalação base (Cb) e da capacidade da nova instalação (Aa) e da base (Ab). Além disso, n é o coeficiente adotado, que, para a regra de 6/10 de Simpson, é 0,6. Esse índice é considerado adequado quando se trata da correção do preço de um processo e não de um simples equipamento (TURTON et al., 2009).

$$Ca = \frac{Cb}{Ab^n} \times Aa^n \quad (1)$$

Além das correções envolvendo a modificação da vazão das plantas, é necessário realizar correções referentes ao ano de operação e à localidade. O efeito do tempo é calculado a partir da relação entre índices de custo, conforme a Equação 2, entre o ano em que está sendo realizado o estudo (Ia) e o ano em que foi coletado o dado (Ib). Esses índices são tabelados por revistas internacionais de Engenharia Química, considerando as variações econômicas. Novamente, o custo no ano atual (Ca) é atualizado utilizando-se o custo do ano base (Cb). A influência exercida pela localidade é análoga à influência do tempo (TURTON et al., 2009).

$$Ca = \frac{Cb}{Ib} \times Ia \quad (2)$$

Dessa forma, para cálculo do Investimento Fixo, somatório dos custos de todos os equipamentos e custos adjacentes, representado na Equação 03, foram coletados diferentes dados da literatura em diferentes anos e capacidades distintas. No caso deste trabalho, por se

tratar de uma integração de processos, foram somados os custos de plantas industriais de mesma tecnologia. Após padronização de todos os dados, foi realizada uma média aritmética para o custo de investimento em cada uma das etapas (Extração, Refino e Transesterificação).

$$\text{Investimento Fixo}(IF) = \sum Ca \quad (3)$$

A partir do Investimento Fixo, pode ser também calculado o Custo de Capital Fixo, dado pelo somatório do investimento fixo, custo de terra e custo de desenvolvimento da terra, conforme a Equação 4. No entanto, como o custo de terra e custo de desenvolvimento são insignificantes perto do investimento fixo, esse valor é comumente considerado igual ao investimento fixo apenas (SILLA, 2003). Em outras literaturas, o Custo de Capital Fixo e o Investimento Fixo são inclusive tratados como sinônimos.

$$\begin{aligned} \text{Custo de Capital Fixo (CCF)} & \quad (4) \\ & = \text{Investimento fixo}(IF) + \text{Custo de terra} \\ & + \text{Custo de desenvolvimento} \end{aligned}$$

A Tabela 4.3 contempla um resumo das referências e principais informações implementadas em GNU Octave para confecção do presente trabalho. Todos os dados de capacidade que estavam em função da quantidade de óleo refinado, óleo cru ou biodiesel foram convertidos para a quantidade de grão de soja equivalente. A quantidade de grão de soja equivalente foi calculada entre a relação de grão de soja com as demais correntes calculadas no balanço de massa do programa.

Tabela 4. 3 - Dados de Investimento implementados em GNU Octave

Etapa	Capacidade (Ton soja/ ano)	Ano Base	Custo (R\$)	Fonte
Extração	15.387	1995	2.083.500,00	(OLIVEIRA, 1995)
Extração	4.217.621	2012	806.162,34	(CHENG; ROSENTRATER, 2017)
Extração	200.000	2015	18.814.500,00	(CHENG, 2017)
Refino	15.387	1995	902.500,00	(OLIVEIRA, 1995)
Transesterificação	201.410	2006	41.987.600,00	(HAAS et al., 2006)
Tranesterificação	201.410	2008	4.343.800,00	(YOU et al., 2008)
Tranesterificação	47.960	2008	5.106.000,00	(WEST; POSARAC; ELLIS, 2008)

4.1.2 – Custo de Produção

O próximo custo a ser calculado é o custo de produção. O custo de produção de um processo pode ser dividido em três parcelas. A primeira delas é o custo direto de produção, que representa as despesas operacionais que variam com a produção. Além disso, existem os custos indiretos, que não variam com a capacidade produtiva. Eles incluem taxas, seguros, depreciação e outros custos que são cobrados até mesmo quando a planta não está em operação. Por fim, as despesas gerais, uma parcela necessária para manter as atividades da empresa, incluindo administração, vendas, finanças, pesquisas e etc (SILLA, 2003). Dessa forma, o custo de produção pode ser dado pela Equação 5:

$$\begin{aligned}
 \text{Custo de Produção (CP)} & \quad (5) \\
 & = \text{Custos Diretos} + \text{Custos Indiretos} \\
 & + \text{Custos Gerais}
 \end{aligned}$$

A avaliação de cada um desses custos ao longo dos anos, juntamente à análise das receitas, permite tirar conclusões sobre a viabilidade econômica do empreendimento. Para realização dessas análises, é essencial o conhecimento ou estimativa dos seguintes custos:

Capital de Investimento Fixo, Custo de Operação com Trabalhadores, Custo de Utilidades, Custo de Tratamento de água e Custo de Matérias-Primas.

Esses custos de produção podem ser resumidos conforme a Tabela 4.4:

Tabela 4. 4 - Resumo dos Custos de Produção (Elaborado a partir de Silla (2003) e Turton et al. (2009), baseado em Marques (2018))

Custo	Descrição
1. Diretos (Cdir)	Variam com a capacidade de produção.
Matéria Prima (Cmp)	Custo dos materiais utilizados no processo.
Tratamento de Rejeitos (Ctr)	Tratamentos necessários para proteção ambiental.
Utilidades (Cut)	Gás, eletricidade, vapor, água fervida, gases inertes, refrigeração.
Custos de Operação (Cop)	Custos de pessoal necessário para operação das plantas.
Custos de Supervisão (Csup)	Custos administrativos, de engenharia e de pessoal de suporte.
Taxas de Laboratório (Clab)	Custos de rotina e testes de laboratório, requeridos para manutenção da qualidade da produção.
Patentes e Royalties (Croy)	Custos de utilização de patentes e tecnologias licenciadas.
Custo de Manutenção (Cmat)	Custos para manutenção operacional da planta.
2. Indiretos (Cind)	Fatores que não são afetados pelo nível de produção.
Depreciação (Cdep)	Custos associados com a planta física. Despesas com a operação legalizada.
Taxas locais e seguros (Ctx)	Custos associados com as taxas locais, seguro de responsabilidade. São baseados na localização da planta

e severidade do processo. Neste caso, também foram considerados custos de empacotamento e estoque.

3. Despesas Gerais (Cgeral)	Custos associados com a gerência, administração, mas sem relação direta com o processo de produção.
Custos Administrativos (Cadm)	Custos para administração. Inclui salários, construções e outras atividades relacionadas.
Pesquisa e desenvolvimento (Cpd)	Custos de atividades de pesquisa relacionadas ao processo e produto. Inclui salários e fundos de pesquisa relacionados a equipamentos e fornecimento.
Custos de Marketing (Cmark)	Custos relacionados à divulgação do produto.
Custos de Financiamento (Cfin)	Custos envolvendo os financiamentos necessários.

Na Tabela 4.4, observa-se que dentre os custos contemplados há o custo de financiamento. Um projeto de investimento objetiva criar valor para uma empresa. Mas, para isso, ele necessita de recursos, que podem ser obtidos de diversas maneiras, como financiamento interno através da retenção de lucros, financiamento externo via dívida com capital de terceiros, financiamento externo através de instrumentos híbridos com dívida e capital próprio (REGO et al., 2010).

Silla (2003) e Turton et al. (2009) propuseram algumas correlações básicas para cálculo dos custos listados na Tabela 4.4. No entanto, antes de apresentar essas correlações é necessário introduzir o conceito de capital de giro. Nesse caso, será adotado como 20% do custo de capital fixo, que contempla o investimento fixo, de acordo com a Equação 6.

$$\text{Capital de Giro (CG)} = 0,20 \times \text{Custo Capital Fixo (CCF)} \quad (6)$$

O capital de giro pode ser considerado um recurso para equilíbrio dos recebimentos e pagamentos de curto prazo. Também chamado de capital circulante líquido ou capital de giro

líquido, ele também pode ser calculado pela diferença entre os ativos e passivos circulantes de uma empresa (REGO et al., 2010).

4.1.2.1. Cálculo dos Custos Diretos

Os principais custos diretos envolvem matéria-prima, custos de utilidades (eletricidade, combustíveis, vapor, água de refrigeração), além de Custos de Tratamento de Rejeitos, Custos de Operação, Custos de Supervisão, Taxas de laboratório, Taxas de patentes e Royalties e Custos de Manutenção. A seguir será detalhada a metodologia utilizada para cálculo desses custos, bem como sua implementação em GNU Octave.

- Cálculo de Custo de Matéria-Prima (C_{mp})

O Custo de Matéria Prima é dado pela Equação 7:

$$C_{mp} = \sum P_{mp} \times M_{MP} \quad (7)$$

onde P_{mp} é o preço de um determinado insumo e M_{MP} é a quantidade daquele insumo utilizado durante um ano. A quantidade de insumo utilizada é obtida através do balanço de massa calculado pelo programa. O resumo dos preços das principais matérias-primas consideradas no programa e as referências utilizadas estão disponíveis na Tabela 4.5.

Tabela 4. 5 - Resumo dos preços das matérias-primas

Descrição	Preço em Reais por Tonelada	Fonte
Hexano	157.404,00	(COMEX STAT, 2019)
Grão de Soja	1.200,00	(AGROLINK, 2020)
Água	2,00	(SNIS, 2019)
Terra Diatomácea	169.500,00	(CONSTANZO, 2019)
Metanol	64.750,00	(COMEX STAT, 2019)
NaOH	2.500,00	(TYWH, 2019)

○ Cálculo de Custo de Tratamento de Rejeitos (Ctr)

A Lei Federal nº 12.305/2010, em seu art. 3º, inc. X, define o gerenciamento de resíduos e rejeitos sólidos como o “conjunto de ações exercidas, direta ou indiretamente, nas etapas de coleta, transporte, transbordo, tratamento e destinação final ambientalmente adequada dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos” (CASA CIVIL, 2010). A borra gerada no processamento do grão e óleo de soja pode ser classificada como um resíduo sólido, conquanto possui aplicação. Após esgotadas as possibilidades de reaproveitamento, a mesma passa a ser classificada como um rejeito.

De acordo com um levantamento realizado por Altoe e Voese (2013), há um custo de R\$ 80,00 por tonelada para o transporte da borra, seguido de um custo de R\$ 40,00 por tonelada para o tratamento da mesma. A quantidade de borra produzida na planta integrada com aproveitamento de correntes é muito inferior à de um processo que não considere o aproveitamento das correntes para gerar produtos de maior valor agregado. Portanto, nesse caso, a quantidade de borra foi considerada desprezível no custo com tratamento de rejeitos, uma vez que a mesma seria aproveitada para a produção de itens com maior valor agregado.

○ Cálculo de Custo de Utilidades (Cut)

O Custo de Utilidades contempla os custos de água, eletricidade, combustível, vapor, refrigeração e outros. Por se tratar de um estudo de Classe V, as estimativas dos custos de utilidades foram calculadas através de estimativas para extração e refino disponibilizadas pela

EMBRAPA, em função do nível de produção da planta. Nas duas primeiras etapas, considerou-se como custo de utilidades US\$ 25,27 por tonelada de grão (MANDARINO; ROESSING; HIRAKURI, 2015).

Já para a etapa de transesterificação foram utilizados dados disponibilizados na literatura (ENCARNAÇÃO, 2008). Para a obtenção de 100 mil toneladas de biodiesel, o custo seria de R\$ 1.445 milhões de reais e, como 100 mil toneladas de biodiesel correspondem a aproximadamente 625 mil toneladas de grão, obtem-se que o custo de utilidades para uma tonelada de grão é de R\$ 2.312,00.

Em todos os casos, os valores de utilidade obtidos foram ajustados para o nível de produção desejado na planta no programa implementado.

- Custo de Operação com Trabalhadores (Cop)

O Custo de Operação envolvendo a mão de obra de trabalhadores também foi calculado a partir de estimativas disponibilizadas pela EMBRAPA. De acordo com os dados coletados pela EMBRAPA para a indústria nacional, o custo de mão de obra no refino e na extração correspondem a, respectivamente, US\$ 3,65 por tonelada de grão e US\$ 2,56 por tonelada de grão (MANDARINO; ROESSING; HIRAKURI, 2015).

Para o custo de mão de obra operacional na unidade de transesterificação, adotou-se, novamente, dados da literatura. De acordo com os dados obtidos, o custo de mão de obra para a transesterificação de uma tonelada de óleo refinado seria de R\$ 1,92 (BRONDANI et al., 2013). Logo, para uma tonelada de grão de soja o custo seria de R\$ 0,34, utilizando, para isso, as proporções entre o grão de soja e o óleo refinado obtido, calculados por balanço de massa.

- Custos de Supervisão (Csup)

Os Custos de Supervisão (Csup) podem ser calculados a partir do Custo de Operação com Trabalhadores (Cop), através da Equação 8 (SILLA, 2003):

$$C_{sup} = 0,20 \times C_{op} \quad (8)$$

- Manutenção da Planta (C_{mat})

Gastos com manutenção incluem gastos com material, mão de obra e supervisão. Esses custos aumentam com o tempo de vida da planta e variam de 3 a 6% do Custo de Capital Fixo por ano, conforme apresentado na Equação 9. Usualmente se usa 4.5% do valor (SILLA, 2003).

$$C_{mat} = 0,045 \times C_{cf} \quad (9)$$

- Custos de Laboratório (C_{lab})

Uma boa correlação para custos de laboratório (C_{lab}) é obtida através do custo de mão de obra (C_{op}), apresentado na Equação 10 (TURTON et al., 2009).

$$C_{lab} = 0,15 \times C_{op} \quad (10)$$

- Custos de Royalties e Patentes (C_{roy})

Os custos com patentes e Royalties se limitam a 3% do custo total de produção (CP), Equação 11 (TURTON et al., 2009).

$$C_{roy} = 0,03 \times CP \quad (11)$$

4.1.2.2. Cálculo dos Custos Indiretos

Conforme explicado em tópicos anteriores, os custos indiretos são aqueles que não variam de acordo com a quantidade que é produzida naquele momento. Eles variam apenas em função das despesas iniciais das plantas ou da capacidade total da planta.

- Custo de Depreciação (Cdep)

O Custo de Depreciação apresenta diferentes significados na literatura, tais como um custo de operação, um subsídio fiscal, um meio de construir um fundo para financiar a substituição de plantas e uma medida do valor em queda. O valor de uma planta diminuirá com o tempo devido a problemas técnicos e obsolescência. Em certo sentido, uma fábrica será consumida para fabricar um produto e a depreciação determina a contribuição do custo do equipamento para o custo de produção, conforme a Equação 12 (SILLA, 2003):

$$C_{dep} = (1 - fs) \times \frac{\text{Custo de Capital Depreciável}}{\text{Vida Útil da Planta}} \quad (12)$$

onde fs é adotado como um fator de 5% e todo o investimento fixo pode ser considerado depreciável, exceto o custo de terra (Marques, 2018). A vida útil da planta considerada foi de 20 anos, além dos 3 anos de construção da mesma.

- Custos de Taxas Locais e Seguros (Ctax)

A Tabela 4.6 resume cada parcela que deve ser considerada para o cálculo dos demais custos indiretos, através das Equações 13 a 15 (SILLA, 2003).

Tabela 4. 6 - Cálculo dos Custos Indiretos (Adaptado de Silla (2003) e Turton et Al. (2009))

Descrição	Procedimento de Cálculo	
Imposto de Propriedade (IP)	$IP = 0,02 \times Ccf$	(13)
Seguro (S)	$S = 0,01 \times Ccf$	(14)
Empacotamento e Estocagem (Cops)	$Cops = 0,60 \times (Cop + Csup + Cmat)$	(15)

E C_{tax} é dado pela Equação 16.

$$C_{tax} = IP + S + Cops \quad (16)$$

4.1.2.3. Cálculo das Despesas Gerais

Custos gerais (C_{geral}) estão associados com o gerenciamento das plantas, incluindo administração, marketing, finanças e toda a parte gerencial restante da planta. A Tabela 4.7 resume o procedimento de cálculo, das Equações 17 a 20, de cada um dos componentes dos custos gerais citados, sendo o Custo Geral dado pelo somatório dessas parcelas (SILLA, 2003).

Tabela 4. 7 - Cálculo dos Custos Gerais (Adaptado de Silla (2003) e Turton et Al. (2009))

Descrição	Procedimento de Cálculo	
Administrativo (Cadm)	$Cadm = 0,25 \times Cops$	(17)
Marketing (Cmark)	$Cmark = 0,135 \times CP$	(18)
Financiamento (Cfin)	$Cfin = i \times (Ccf + Cgiro)$	(19)
Pesquisa e Desenvolvimento (Cpd)	$Cpd = 0,0575 \times CP$	(20)

No entanto, observa-se que para realizar o procedimento de cálculo há a dependência de CP, Custo Total de Produção, que é um valor que só é obtido pelo somatório dos custos diretos, indiretos e gerais. Dessa forma, será adotado que os custos gerais de produção correspondem a 2,5% da receita do mesmo ano (PERLINGEIRO, 2005).

4.2 - Fluxo de Caixa e Premissas na Avaliação Econômica

O Método de Fluxo de Caixa Descontado é o método mais utilizado para análise de investimentos, dependendo da projeção dos fluxos, da estimativa de valor residual e da determinação da taxa de desconto. A análise de fluxo de caixa utiliza a definição de fluxo financeiro, que surge a partir do fato de que uma empresa precisa realizar o pagamento de diversas contas, como as matérias-primas, e pode receber dinheiro de contas, provenientes dos produtos vendidos (REGO et al., 2010).

Os componentes do Fluxo de Caixa são o investimento inicial, fluxo de caixa operacionais e fluxo de caixa residual. O investimento inicial, geralmente localizado no ano

zero, contempla o investimento no ativo, despesas de instalação e variação do capital circulante líquido. O fluxo de caixa operacional é uma função direta das receitas e custos. O fluxo de caixa residual é aquele que considera a incidência do imposto de renda, que ocorre ao final do projeto, em função de sua liquidação. E a perpetuidade é o componente que considera a vida útil do projeto (REGO et al., 2010).

Cheng (2017) propôs a seguinte metodologia para análise do fluxo de caixa de uma empresa do mesmo setor destinada à extração do óleo de soja. Essa metodologia será aplicada para a proposta completa de biorrefinaria integrada. A Figura 4.1 ilustra os termos que contribuem para a entrada e saída de dinheiro durante todas as etapas de implementação e operação do processo. Na análise de fluxo de caixa, são utilizados todos os dados calculados nas etapas anteriores.

Figura 4. 1 - Representação esquemática do fluxo de caixa (Adaptado de Cheng (2017))



Para uma abordagem mais completa de fluxo de caixa, os cálculos podem ser realizados conforme a Tabela 4.8, que apresenta o cálculo do fluxo de caixa global até o final da vida útil estabelecida para a planta, contemplando aspectos tributários da legislação brasileira. Essa metodologia foi adotada no presente trabalho.

Tabela 4. 8 - Representação do Fluxo de Caixa global (Adaptado de Rego et al. (2010))

Componente do Fluxo de Caixa Global
(+) Receita
(-) PIS/Cofins
(-) ICMS
(=) Receitas Líquidas
(-) Custo dos produtos vendidos
(=) Lucro Operacional Bruto
(-) Despesas administrativas
(-) Despesas comerciais
(-) Despesas Gerais
(=) Lucro Operacional
(-) Depreciação
(=) Lucro antes do Imposto de Renda
(-) Imposto de Renda
(=) Lucro Líquido
(+) Depreciação
(=) Fluxo de Caixa Operacional
(+/-) Investimentos ou desmobilizações de equipamentos
(+/-) Mudanças no Capital de Giro
(=) Fluxo de Caixa Global

O Cálculo das receitas desse fluxo de caixa foi realizado baseando-se na Equação 21:

$$Receita = \sum P_{produto} \times M_{produto} \quad (21)$$

onde $P_{produto}$ é o preço de venda de um determinado produto e $M_{produto}$ é a quantidade daquele produto que se espera ser obtida em um ano. A quantidade de produto gerada é obtida através do balanço de massa calculado pelo programa e os preços utilizados estão descritos na Tabela 4.9.

Tabela 4. 9 - Preço de venda dos produtos

Descrição	Preço em Reais por Tonelada	Fonte
Casca de Soja	1.125,00	(MFRURAL, 2019)
Farelo de Soja	2632,92	(COMEX STAT, 2019)
Fosfolipídios	164.950,00	(CEREALISTA, 2019)
Tocoferóis	141.216,00	(COMEX STAT, 2019)
Biodiesel	2.794,00	(BIODIESELBR, 2018)
Glicerina	1.000,00	(ABREU, 2013)
Ácido Graxo	5.346,22	(COMEX STAT, 2019)
Esqualeno	7.120.046,62	(SIGMA ALDRICH, 2019)

O imposto de Programa de Integração Social (PIS) e a Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social (COFINS) considerados, presentes na Tabela 4.8, foram de 1,65 e 7,6% sob o valor das vendas, descontados das contas naquele mesmo período (MORAES, 2016). Já o imposto sobre circulação de mercadorias e prestação de serviços (ICMS) levou em consideração a alíquota de 18% da receita indicada na Tabela 4.8 (CARDOSO, 2018). Para cálculo da depreciação, apenas o custo da terra não é considerado depreciável, porém o mesmo é desprezível. Foi considerado um imposto de renda de 25% sobre a receita tributável (FERRARI et al., 2010).

Na análise de fluxo de caixa, de acordo com Cheng (2017), também deve ser considerada a relação entre tempo e valor do dinheiro (TVM), visto que esse fator indica as flutuabilidades das condições econômicas, que ocorrem com a passagem do tempo. Portanto, é possível recalculer o capital no ano em que se deseja avaliar (FC_t), em função do capital no primeiro ano (FC_0), conforme a Equação 22.

$$FC_t = FC_0(1 + i)^t \quad (22)$$

A taxa, representada por i , adotada para a biorrefinaria avaliada foi de 25%. Esse valor foi adotado por ser semelhante a uma análise econômica de uma planta de biodiesel localizada no sudeste (DANTAS; FILHO; MENDES, 2016).

As outras premissas consideradas para a planta integrada foram de um período de construção de 3 anos, sendo um pouco superior ao período de 30 meses recomendado por Cheng (2017), devido à integração das 3 etapas. A vida útil assumida para a planta foi de 20 anos, sendo este o período máximo considerado por Turton et al. (2009).

O período de partida, consumindo capital de giro, duraria o primeiro ano de operação, e a depreciação seria de 20 anos em uma taxa de 5% do investimento fixo, usando o método linear (CHENG, 2017). Ainda de acordo com Cheng (2017), uma boa divisão dos investimentos iniciais seria 30%, 40% e 30% ao longo dos três anos de construção. No primeiro ano de operação, ou quarto ano considerando a construção, haveria a utilização do capital de giro.

Para o cálculo do fluxo de caixa residual previamente citado, pode ser utilizada a expressão da Equação 23. O valor obtido deve ser utilizado como uma entrada de recursos adicionada ao fluxo do ano seguinte, ao início da perpetuidade (REGO et al., 2010).

$$\text{Valor Residual} = \frac{\text{fluxo de caixa líquido}}{\text{custo de capital}} \quad (23)$$

É importante destacar que o Fluxo de Caixa calculado sofre influência direta da quantidade de produto que será produzida e da quantidade de matéria-prima utilizada. As

modificações nas vazões da planta causam alterações nos fluxos de caixa anuais, logo as vazões consideradas durante a análise de fluxo de caixa estão resumidas na Tabela 3.6 em função do ano.

4.3 - Critérios na Avaliação Econômica

Tanto a análise de Fluxo de Caixa, quanto os cálculos dos critérios econômicos são feitos por meio de rotinas implementadas no *software* GNU Octave. Os critérios adotados para realização da avaliação econômica são Valor Presente Líquido, Taxa Interna de Retorno e Período de Retorno do Investimento.

Com base nas receitas e lucros obtidos com o processo e utilizando o somatório de todos os fluxos de caixa durante os 20 anos de operação e 3 anos de construção, essa mesma correlação (TVM) pode ser utilizada para conversão da previsão de rentabilidade. Além disso, o TVM, Equação 24, é usado para estimar o Valor Presente líquido (VPL) ou *Net Present Value* (NPV), que também estima a rentabilidade. Um VPL positivo, calculado conforme a Equação 25, significa que o processo é lucrativo (CHENG, 2017).

$$FC_0 = \frac{FC_t}{(1+i)^t} = FC_t \times f_d \quad (24)$$

$$VPL = \sum_1^t FC_t f_d - Capital\ Investido \quad (25)$$

A fórmula de VPL apresenta resultados mais precisos se considerar o valor residual (VR), introduzido anteriormente, de acordo com a Equação 26. Nesses casos, n é o n-ésimo

período de análise, FC_T é o fluxo de caixa líquido na data t , I é o investimento inicial, i é a taxa mínima de atratividade (TMA). Serão avaliados diferentes cenários de taxa mínima de atratividade.

$$VPL = -I + \sum_1^t \frac{FC_T}{(1+i)^t} + \frac{VR}{(1+i)^n} \quad (26)$$

O Período de Retorno do Investimento (*Payback*) também é um importante parâmetro financeiro, que consiste no tempo necessário para que os somatórios de todos os fluxos de caixa, trazidos para o valor presente, totalizam zero. Esse parâmetro indica quando é possível recuperar todo o investimento inicial e o ideal é que ele seja o menor possível. Um bom critério para avaliação do Período de *Payback* é a comparação com o tempo de vida estimado para a planta (23 anos, considerando o tempo de construção). Se o Período de *Payback* for maior ou igual à vida útil projetada para a planta, o processo pode ser considerado inviável economicamente.

Existem duas formas de se determinar o Período de *Payback*. O Período de *Payback* simples considera apenas o tempo de retorno do capital investido e compara com um prazo pré-determinado. O método simples não considera o valor do dinheiro no tempo, não considera a distribuição do fluxo de caixa dentro do período de recuperação do investimento, não tem como ser avaliado com um padrão de rentabilidade e não considera o fluxo de caixa pós-recuperação, fazendo chegar a conclusões erradas sobre projetos de longa duração (REGO et al., 2010).

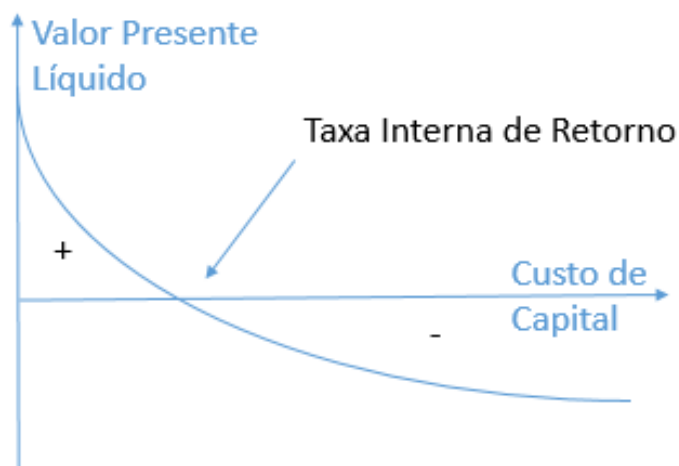
Por essa razão, é preferível que se adote o método de Período de *Payback* Descontado, que inclui a taxa de desconto e o conceito de valor do dinheiro no tempo, chegando ao valor presente líquido. Nesse método, consideram-se todos os elementos do fluxo de caixa utilizando uma taxa definida, trazendo o valor presente no ano zero (REGO et al., 2010).

Geralmente, utiliza-se o Período de *Payback* como um segundo filtro de análise como medida de risco de liquidez ou como um grau de risco do projeto.

Outro parâmetro comumente utilizado é a estimação da Taxa Interna de Retorno (TIR) ou *Internal Rate of Return*, indicador utilizado para descrever a taxa de juros na qual o VPL é nulo (REGO et al., 2010). Caso o TIR do processo seja superior à taxa de juros utilizada para estimativas de rentabilidade, o processo pode ser considerado rentável (CHENG, 2017). Uma representação desse cálculo está disponível na Figura 4.2.

Figura 4. 2 - Representação Valor Presente Líquido em função da taxa de desconto

(Adaptado de Rego et al. (2010))



Devido à variabilidade dos preços das matérias-primas e dos preços de comercialização dos produtos gerados, a avaliação das respostas de fluxo de caixa em função da variação desses valores pode ser utilizada para avaliar o valor presente líquido no final do projeto. O ideal é que seja obtido um valor presente líquido nulo com menores preços de venda dos produtos, indicando uma vantagem competitiva em relação aos concorrentes, e com maior preço de compra das matérias-primas, concluindo que mesmo com variações nos preços dos fornecedores o empreendimento permaneceria viável.

4.4 - Avaliação das Incertezas

Durante o presente trabalho, foram utilizados muitos dados de mercado para obtenção dos preços das matérias-primas e produtos, além de dados de investimentos já realizados para estimativas do investimento fixo. Dessa forma, a análise fica sujeita a muitas incertezas, que podem conduzir a conclusões errôneas sobre a viabilidade do processo.

Para análise das incertezas das variáveis identificadas, pode ser realizado um estudo de sensibilidade. Para esse estudo, pode ser avaliada a influência de um parâmetro, fonte de incerteza, no projeto para uma certa variação dos valores (PERLINGEIRO, 2005). A incerteza comumente adotada é de 1%, no entanto, como os preços utilizados podem variar muito ao longo dos anos e até mesmo entre fornecedores, será adotada uma variação mais conservativa (10%) para avaliação das incertezas.

Por exemplo, definindo o preço de venda do biodiesel como uma fonte de incerteza para o cálculo do parâmetro VPL pode-se definir a Equação 27 para a sensibilidade.

$$\text{Sensibilidade (VPL, Preço Biodiesel)} = \frac{VPL(\text{Máximo}) - VPL(\text{Mínimo})}{2 \times \text{Variação de Preço}} \times \frac{\text{Preço (Base)}}{VPL(\text{Base})} \quad (27)$$

Avaliando a sensibilidade dos parâmetros (VPL, TIR ou Período de *Payback* Descontado) para cada fonte de incerteza, é possível determinar quais valores apresentam maior influência no resultado obtido. Esses valores devem ser analisados com precaução para evitar conclusões erradas sobre a viabilidade do investimento e não conduzirem a ações de negócio errôneas. No presente trabalho, adotou-se que a sensibilidade seria avaliada utilizando apenas o parâmetro VPL.

As variáveis que foram consideradas fontes de incerteza foram os preços de compra de todas as matérias-primas e de venda de todos os produtos e sub-produtos. A Tabela 4.10 resume as fontes de incerteza e os valores mínimos e máximos que foram avaliados.

Tabela 4. 10 - Resumo do preço de compra / venda dos produtos

Descrição	Preço Base (R\$)	Preço Mínimo (R\$) 0.9*Base	Preço Máximo (R\$) 1.1*Base
Hexano	157.404,00	141.663,60	173.144,40
Grão de Soja	1.200,00	1.080,00	1.320,00
Água	2,00	1,80	2,20
Terra Diatomáceas	169.500,00	152.550,00	186.450,00
Metanol	64.750,00	58.275,00	71.225,00
NaOH	2.500,00	2.250,00	2.750,00
Casca de Soja	1.125,00	1.012,50	1.237,50
Farelo de Soja	2.633,00	2.369,70	2.896,30
Fosfolipídios	164.950,00	148.455,00	181.445,00
Tocoferóis	141.216,00	127.094,40	155.337,60
Biodiesel	2.794,00	2.514,60	3.073,40
Hidrocarbonetos (Esqualeno)	7.120.046,62	6.408.041,96	7.832.205,1
Glicerina	1.000,00	900,00	1.100,00
Ácido Graxo	5.346,00	4.811,40	5.880,60

Resultados e Discussão

5.1 – Cálculos do Balanço de Massa

A primeira etapa calculada pelo programa foi o balanço de massa. Para isso, foi utilizada a identificação das correntes apresentada na estrutura de cálculos, utilizada para a implementação do código no GNU Octave. A Tabela 5.1 apresenta a vazão mássica das correntes, em ton/h, da etapa de extração, durante os anos de operação da planta.

Tabela 5. 1 - Vazões mássicas (ton/h) das correntes durante a Extração

Corrente → Ano ↓	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1 – 3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	200,69	0,16	183,48	2,39	186,04	41,73	328,28	328,20	39,14
5	240,83	0,19	220,18	2,87	223,25	50,07	393,94	393,84	46,96
6	280,96	0,22	256,88	3,42	260,45	58,42	459,60	459,48	54,79
7	321,10	0,26	293,57	3,35	297,66	66,76	525,25	525,12	62,62
8	361,24	0,29	330,27	4,31	334,87	75,11	590,91	590,76	70,44
9	401,38	0,32	366,97	4,79	372,08	83,45	656,57	656,40	78,27
10	441,51	0,35	403,66	5,27	409,28	91,80	722,22	722,04	86,10
11	481,65	0,39	440,36	5,75	446,49	100,15	787,88	787,68	93,93
12- 23	521,79	0,42	477,05	6,23	483,70	108,49	853,53	853,32	101,75

Observa-se na Tabela 5.1 que nos 3 primeiros anos, os valores do balanço de massa são nulos. Isso ocorre porque, durante esses anos, ocorrerá a instalação da planta e, portanto, não haverá produção, geração de receitas e/ou despesas com consumo de matéria-prima. Durante os anos de operação da planta, a quantidade das correntes também sofre variação, visto que a vazão da planta estará variando de acordo com a projeção de demanda de consumo de biodiesel da região Sudeste. O mesmo perfil é observado nas Tabelas 5.2 até 5.4, que apresentam os resultados de balanço de massa das etapas seguintes. A Tabela 5.2 apresenta a

vazão mássica das correntes, em ton/h, das etapas desde o início do Refino, passando pela Degomagem e Neutralização, contemplando as correntes 10 até 21.

Tabela 5.2 - Vazões mássicas (ton/h) das correntes do início do Refino ao final da Neutralização

Corrente → Ano ↓	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1 – 3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	1,17	40,31	40,31	2,91	0,53	2,38	37,40	0,45	37,85	37,85	0,55	37,29
5	1,41	48,37	48,37	3,49	0,64	2,86	44,88	0,54	45,42	45,42	0,67	44,75
6	1,64	56,43	56,43	4,08	0,74	3,33	52,36	0,63	52,99	52,99	0,78	52,21
7	1,88	64,50	64,50	4,66	0,85	3,81	59,84	0,72	60,56	60,56	0,89	59,67
8	2,11	72,56	72,56	5,24	0,95	4,29	67,32	0,81	68,12	68,12	1,00	67,13
9	2,35	80,62	80,62	5,82	1,06	4,76	74,80	0,90	75,69	75,69	1,11	74,58
10	2,58	88,68	88,68	6,41	1,17	5,24	82,28	0,99	83,26	83,26	1,22	82,04
11	2,82	96,74	96,74	6,99	1,27	5,72	89,76	1,08	90,83	90,83	1,33	89,50
12- 23	3,05	104,8	104,8	7,57	1,38	6,19	97,24	1,17	98,40	98,40	1,44	96,96

Já a Tabela 5.3 apresenta a vazão mássica das correntes 22 até 31, em ton/h, representado os resultados das etapas de lavagem e branqueamento do Refino.

Tabela 5.3 - Vazões mássicas (ton/h) das correntes das etapas de Lavagem ao Branqueamento

Corrente → Ano ↓	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
1 – 3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	7,46	44,75	44,75	7,71	37,04	0,11	37,15	37,15	36,44	0,71
5	8,95	53,70	53,70	9,25	44,45	0,13	44,58	44,58	43,73	0,85
6	10,44	62,65	62,65	10,79	51,86	0,16	52,01	52,01	51,02	1,00
7	11,93	71,60	71,60	12,34	59,26	0,18	59,44	59,44	58,30	1,14
8	13,43	80,55	80,55	13,88	66,67	0,20	66,87	66,87	65,59	1,28
9	14,92	89,50	89,50	15,42	74,08	0,22	74,30	74,30	72,88	1,42
10	16,41	98,45	98,45	16,96	81,49	0,24	81,73	81,73	80,17	1,57
11	17,90	107,40	107,40	18,50	88,90	0,27	89,16	89,16	87,46	1,71
12- 23	19,39	116,35	116,35	20,05	96,31	0,29	96,59	96,59	94,74	1,85

A Tabela 5.4 referente ao balanço de massa resume os resultados obtidos através do programa implementado para a vazão das correntes 32 até 46, contemplando a desodorização até a transesterificação e separação dos produtos obtidos: glicerina e biodiesel. A corrente 32

não foi calculada por representar a entrada de vapor para o procedimento de desodorização. No entanto, como vapor é considerado uma utilidade, o seu custo foi calculado na etapa de cálculos de Custo de Utilidades.

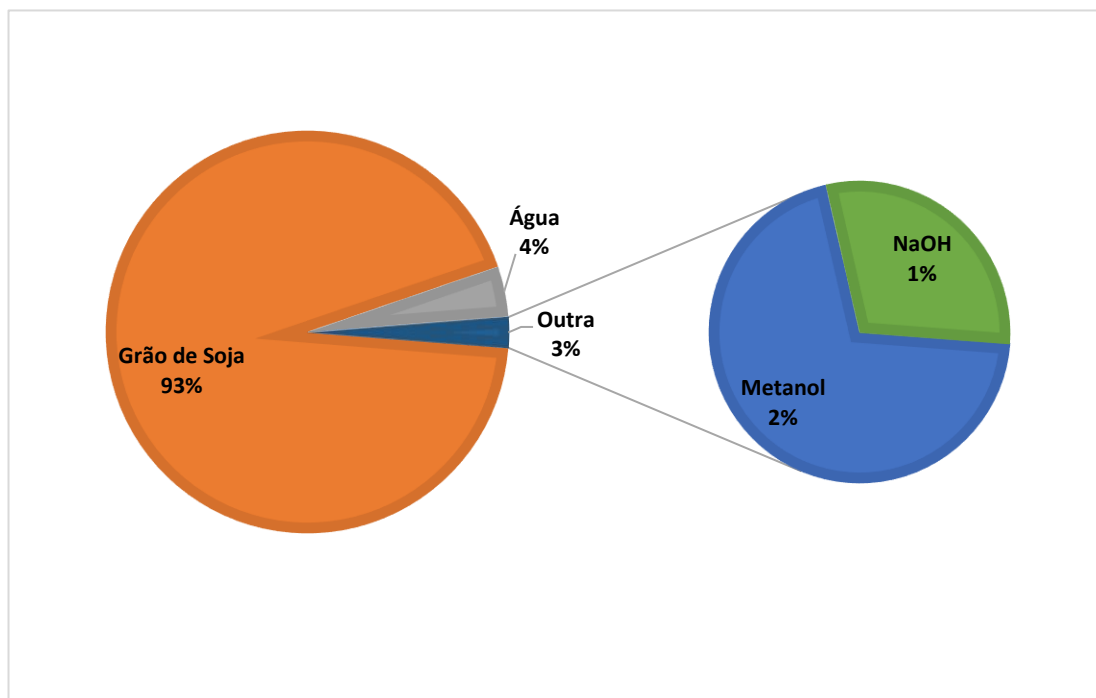
Tabela 5. 4 - Vazões mássicas (ton/h) das correntes do início do Refino ao final da Neutralização

Corrente → Ano ↓	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46
1 - 3	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	-	36,44	36,44	0,01	36,43	3,60	1,08	4,68	4,68	5,72	44,75	44,75	3,45	33,32	3,64
5	-	43,73	43,73	0,02	43,71	4,32	1,30	5,62	5,62	6,87	53,70	53,70	4,14	39,99	4,37
6	-	51,02	51,02	0,02	51,00	5,04	1,51	6,56	6,56	8,01	62,65	62,65	4,83	46,65	5,10
7	-	58,30	58,30	0,02	58,28	5,76	1,73	7,49	7,49	9,16	71,60	71,60	5,52	53,32	5,83
8	-	65,59	65,59	0,02	65,57	6,48	1,95	8,43	8,43	10,30	80,55	80,55	6,21	59,98	6,56
9	-	72,88	72,88	0,03	72,85	7,20	2,16	9,37	9,37	11,45	89,50	89,50	6,90	66,65	7,29
10	-	80,17	80,17	0,03	80,14	7,92	2,38	10,30	10,30	12,59	98,46	98,46	7,59	73,31	8,01
11	-	87,46	87,46	0,03	87,42	8,65	2,59	11,24	11,24	13,74	107,4	107,4	8,28	79,98	8,74
12- 23	-	94,74	94,74	0,03	94,71	9,37	2,81	12,18	12,18	14,88	116,3	116,3	8,97	86,64	9,47

A Tabela 3.1 apresentada anteriormente resume a identificação das correntes que foram utilizadas para o cálculo das matérias-primas e dos produtos gerados. Dessa forma, é possível realizar uma comparação entre a quantidade dos insumos utilizados e dos produtos gerados.

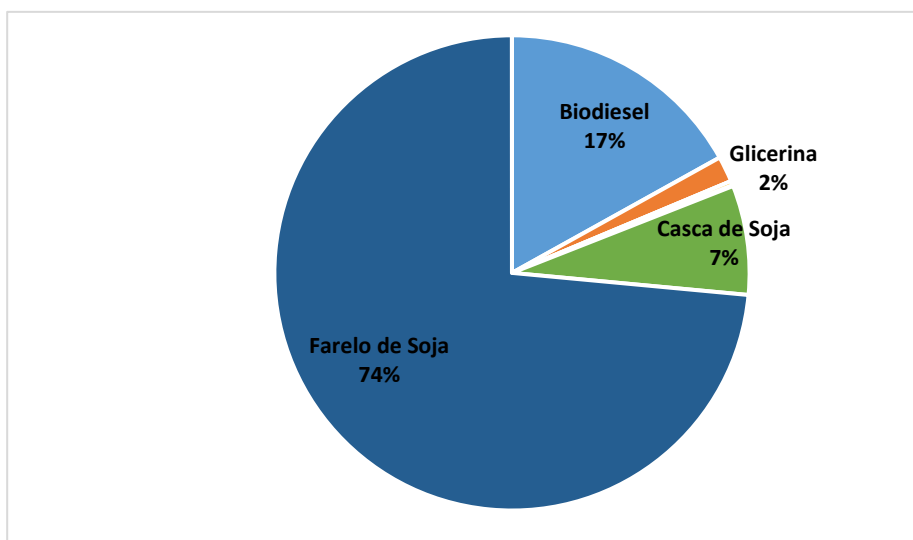
A Figura 5.1 compara as quantidades dos principais insumos utilizados nesse processo, em base mássica, sendo que o grão de soja e a água foram os insumos utilizados em maior quantidade. Hexano não é consumido em tão grande quantidade porque é recirculado para o processo.

Figura 5. 1 - Comparação das quantidades (em massa) de matéria-prima utilizada



A Figura 5.2, por sua vez, apresenta a comparação das quantidades dos produtos obtidos nessa etapa. O produto obtido em maior quantidade é o farelo de soja, seguido do biodiesel, da casca de soja e glicerina. Os outros produtos, embora em quantidade menor não aparecendo no gráfico de quantidades, possuem um valor agregado importante para viabilização da biorrefinaria, como será discutido nas próximas seções.

Figura 5. 2 - Comparação das quantidades de produtos gerados



5.2 – Cálculos de Investimento Inicial

A segunda etapa do programa implementado com o objetivo de determinar a viabilidade econômica da biorrefinaria de soja consistiu no cálculo do investimento inicial. O cálculo do investimento inicial das três etapas utilizou dados de processos semelhantes ao definido no presente trabalho disponíveis na literatura. Ao realizar todos os ajustes em relação ao local em que os dados foram obtidos, ano e vazão operacional da planta, pôde ser realizada uma média entre os custos. A Tabela 5.5 resume os custos de investimento inicial que foram considerados para cada etapa.

Tabela 5. 5 - Cálculos de Investimento Inicial das principais etapas da Biorrefinaria de Soja

Etapa	Custo	Representatividade
Extração	R\$ 84.923.410,51	26,0%
Refino	R\$ 38.531.300,01	11,8%
Transesterificação	R\$ 203.696.544,39	62,3%
Total	R\$ 327.151.254,91	100%

Conforme observado, a etapa que mais contribui para o investimento inicial na biorrefinaria é a etapa de transesterificação, correspondendo a 62,3% do investimento inicial. A etapa de extração representou um custo de 26,0% dos investimentos iniciais, enquanto a etapa de refino foi a que apresentou os menores custos, respondendo por apenas 11,8%.

Já era esperado que a extração apresentasse um custo superior ao refino, visto que durante a etapa de extração, que utiliza hexano, há a necessidade de consideração de fatores relacionados à segurança da planta, pois o solvente utilizado é altamente inflamável e o equipamento utilizado para realização desse procedimento possui alto investimento. Adicionalmente, a etapa de refino é basicamente constituída por misturadores. Apenas a desodorização exige um equipamento de maior sofisticação, conforme visto anteriormente, que poderia contribuir para um preço mais elevado.

Além disso, de acordo com os dados utilizados para esse cálculo, a etapa de Refino foi a única que foi calculada por apenas uma referência, devido aos poucos dados encontrados

com custos dessa etapa. Como consequência, há uma grande incerteza atrelada a esse valor, sendo importante ressaltar o nível de definição do presente trabalho. Conforme previamente discutido, esse trabalho pode ser definido como um estudo de factibilidade.

5.3 – Cálculo dos Custos Diretos, Indiretos e Gerais

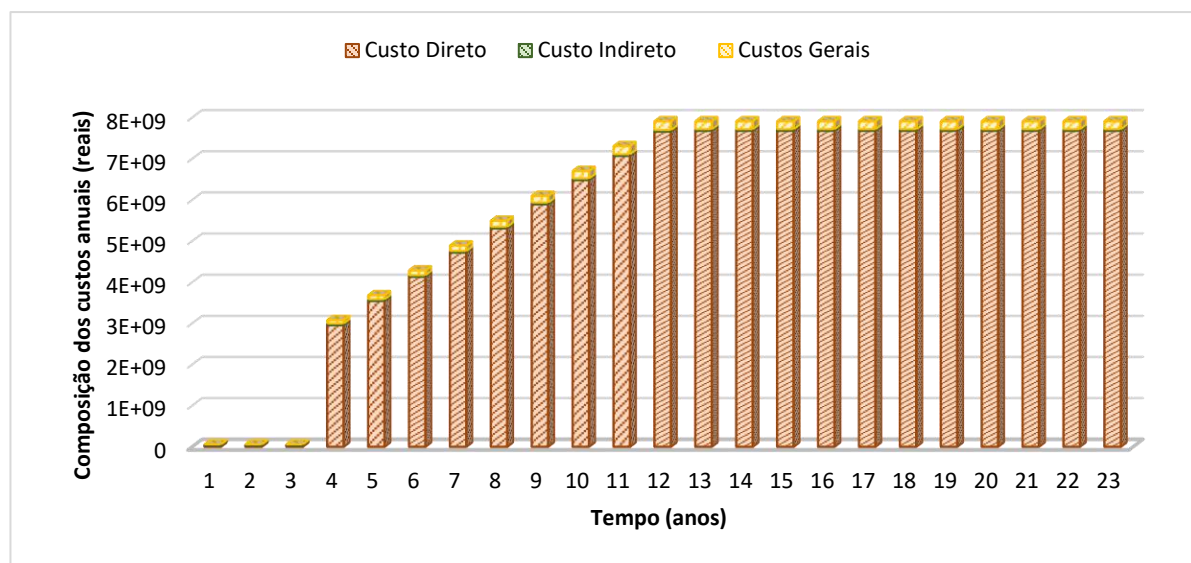
Além dos custos relacionados ao investimento inicial, também foram calculados os custos diretos, indiretos e gerais. Esses custos foram calculados utilizando o balanço de massa e as correlações descritas nos capítulos anteriores. A Tabela 5.6 apresenta as variações desses custos em função do ano considerado.

Tabela 5. 6 - Cálculo dos Custos Diretos, Indiretos e Gerais de acordo com o ano

Ano	Custo Direto	Custo Indireto	Custos Gerais	Custos Totais
1	R\$ 16.307.820	R\$ 38.145.306	R\$ 0	R\$ 54.453.126
2	R\$ 16.307.820	R\$ 38.145.306	R\$ 0	R\$ 54.453.126
3	R\$ 16.307.820	R\$ 38.145.306	R\$ 0	R\$ 54.453.126
4	R\$ 4.449.732.853	R\$ 38.145.306	R\$ 123.041.957	R\$ 4.610.920.116
5	R\$ 5.336.422.621	R\$ 38.145.306	R\$ 147.650.480	R\$ 5.522.218.408
6	R\$ 6.223.108.061	R\$ 38.145.306	R\$ 172.258.883	R\$ 6.433.512.250
7	R\$ 7.109.782.461	R\$ 38.145.306	R\$ 196.866.980	R\$ 7.344.794.748
8	R\$ 7.996.483.269	R\$ 38.145.306	R\$ 221.475.810	R\$ 8.256.104.385
9	R\$ 8.883.160.050	R\$ 38.145.306	R\$ 246.083.973	R\$ 9.167.389.330
10	R\$ 9.769.843.109	R\$ 38.145.306	R\$ 270.692.311	R\$ 10.078.680.725
11	R\$ 10.656.519.890	R\$ 38.145.306	R\$ 295.300.474	R\$ 10.989.965.670
12-23	R\$ 11.543.202.694	R\$ 38.145.306	R\$ 319.908.803	R\$ 11.901.256.804

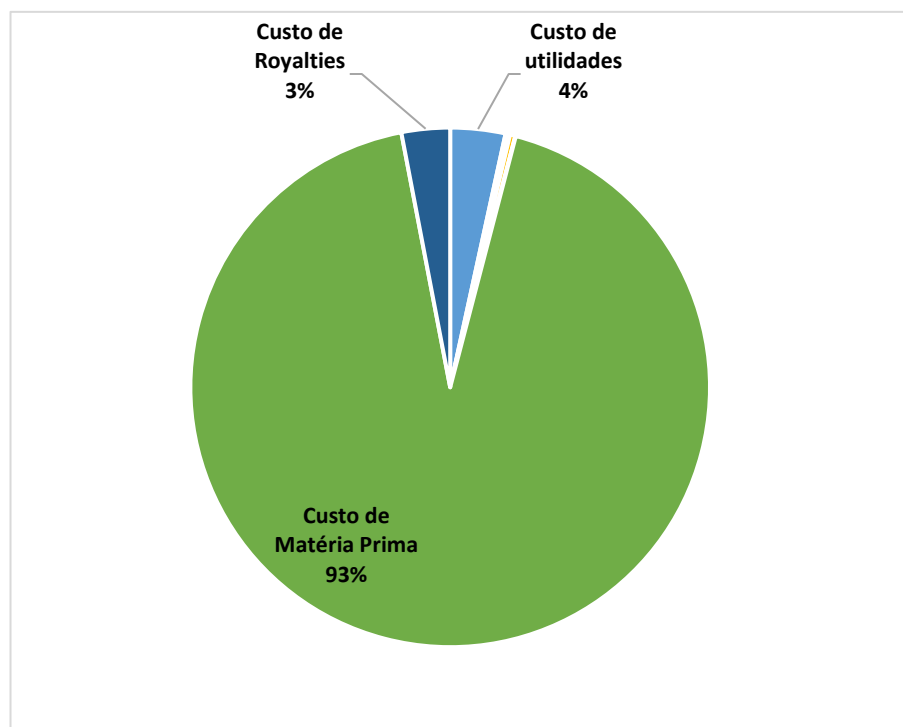
Comparando os custos gerais, diretos e indiretos, observa-se que nos anos de operação da planta o custo que mais exerce influência é o custo direto, conforme pode ser constatado na Figura 5.3. Além disso, como o custo indireto não varia com a vazão de operação, esse custo se mantém constante ao longo dos anos, enquanto o custo direto cresce expressivamente.

Figura 5. 3 - Representação dos Custos Diretos, Indiretos e Gerais ao longo dos anos



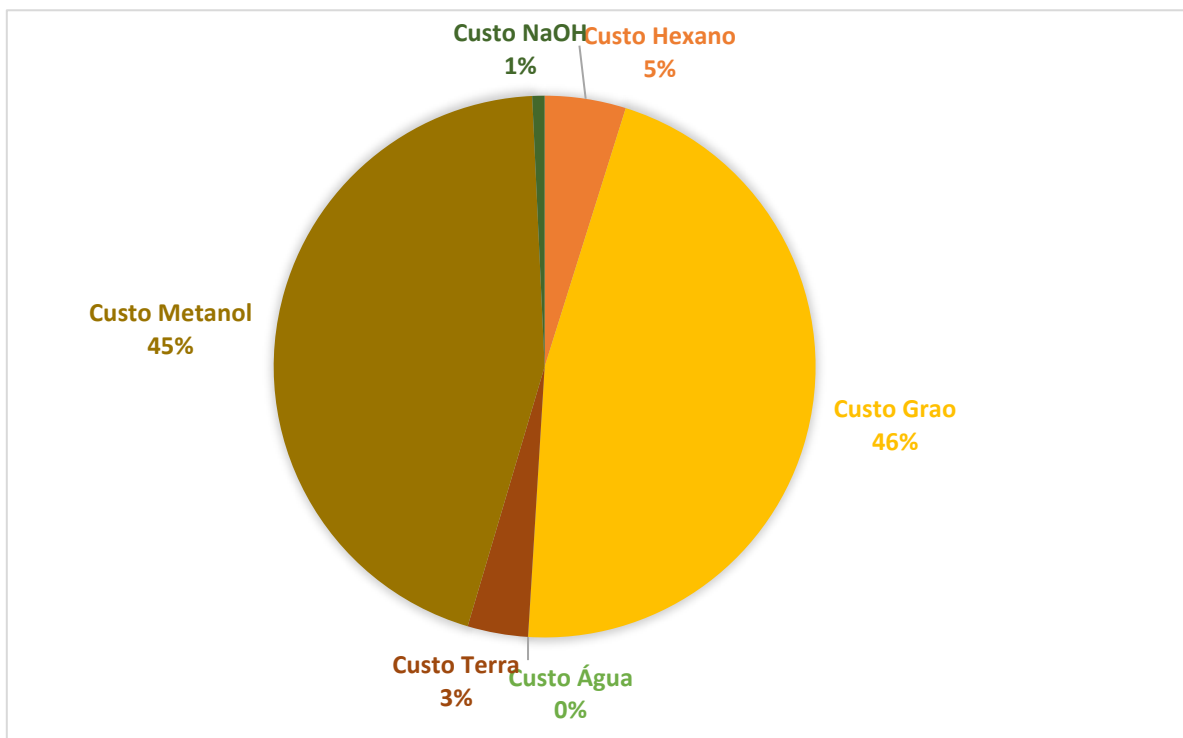
Dentre os custos diretos, podem ser destacados os custos com matéria-prima, representando 93% dos custos diretos totais, seguidos dos custos de utilidades, que representam 4% dos custos diretos, detalhados na Figura 5.4.

Figura 5. 4 - Detalhamentos dos Custos Diretos



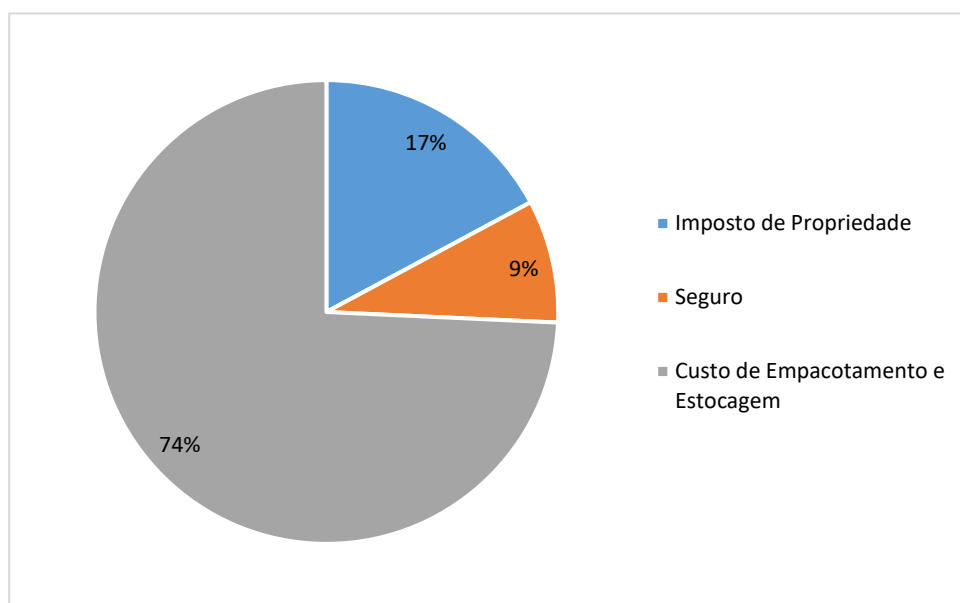
O custo com grão de soja representa 46% dos custos de matéria-prima, ilustrado na Figura 5.5, e 43% dos custos diretos totais. A importância do custo do grão de soja, por exemplo, tanto dentro dos custos de matéria-prima como nos custos diretos totais, e até mesmo considerando os custos indiretos e gerais, dão indícios da sensibilidade do estudo de fluxo de caixa e das demais etapas que serão analisadas ao preço desse insumo.

Figura 5.5 - Comparação dos custos das matérias- primas utilizadas



Dentre os custos indiretos, detalhados na Figura 5.6, todos os custos considerados representam influência significativa no valor total dos custos indiretos. No entanto, os custos que mais afetam são os custos de empacotamento e estocagem, representando 74% dos custos indiretos. O custo de depreciação, apesar de listado como um custo indireto, não foi considerado neste gráfico pois é levado em consideração em outra etapa do fluxo de caixa, conforme metodologia descrita na Tabela 4.8.

Figura 5. 6 - Detalhamento dos Custos Indiretos



5.4 – Cálculo das Receitas

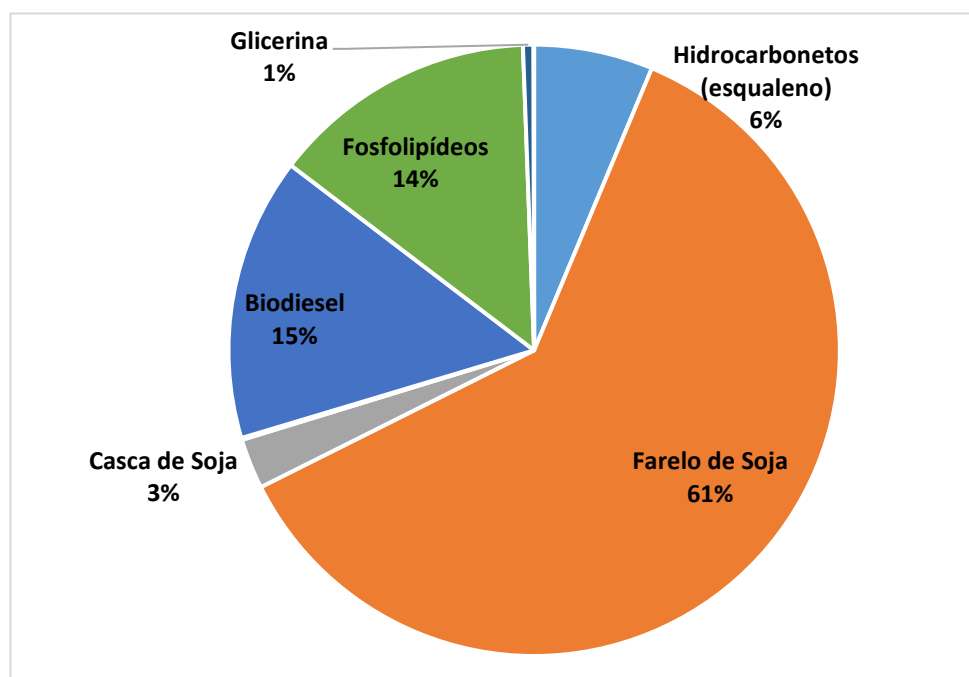
Conforme a vazão da planta é alterada ao longo dos anos, a quantidade dos produtos gerados também sofre alteração. Como resultado, a receita não é constante ao longo dos anos, de acordo com o exposto na Tabela 5.7.

Tabela 5. 7 - Variação da Receita da planta ao longo dos anos

Ano	Receitas
1	R\$ -
2	R\$ -
3	R\$ -
4	R\$ 4.921.678.263,75
5	R\$ 5.906.019.202,97
6	R\$ 6.890.355.336,31
7	R\$ 7.874.679.214,65
8	R\$ 8.859.032.408,87
9	R\$ 9.843.358.930,45
10	R\$ 10.827.692.420,55
11	R\$ 11.812.018.942,13
12-23	R\$ 12.796.352.150,23

Usualmente, quando as três etapas são avaliadas isoladamente, o principal co-produto associado ao grão de soja é o farelo de soja, e, na última etapa, o sub-produto da transesterificação é a glicerina. No entanto, ao observar a Figura 5.7, é possível verificar que os principais co-produtos que influenciam na receita não são mantidos totalmente os mesmos no processo integrado.

Figura 5. 7 - Detalhamento das Receitas



Primeiramente, é necessário destacar que a representatividade de cada produto na receita não é equivalente às quantidades produzidas simplesmente, devido à diferença de valor agregado entre eles. Assim, é possível observar produtos como glicerina tendo seu percentual na receita inferior aos hidrocarbonetos, que são produzidos em quantidade bem menor.

Apesar do interesse na destinação do óleo de soja para a produção de biodiesel, fica claro que o principal produto da biorrefinaria é o farelo de soja, que responde por 61% da receita total. É interessante notar também como outros produtos de menor destaque, como os fosfolípidos (14%), hidrocarbonetos (6%) a casca de soja (3%) também representam parcelas significativas da receita, enquanto produtos de maior valor agregado, como os tocoferóis, acabam tendo participação insignificante devido às baixíssimas vazões.

A contribuição da comercialização desses itens na receita exercerá forte influência na avaliação econômica que será realizada a seguir.

5.5 – Avaliação Econômica

O fluxo de caixa em cada um dos anos foi calculado conforme metodologia explicada na Tabela 4.8. A Tabela 5.8 resume dois cenários de fluxo de caixa, apenas comparação. No primeiro cenário, os dados de fluxo de caixa apresentados não consideram a desvalorização do dinheiro no tempo, devido à taxa mínima de atratividade nula adotada. E no segundo cenário, os resultados foram calculados utilizando uma taxa de 25%.

Tabela 5. 8 - Fluxo de Caixa ao longo dos anos e com diferentes TMA

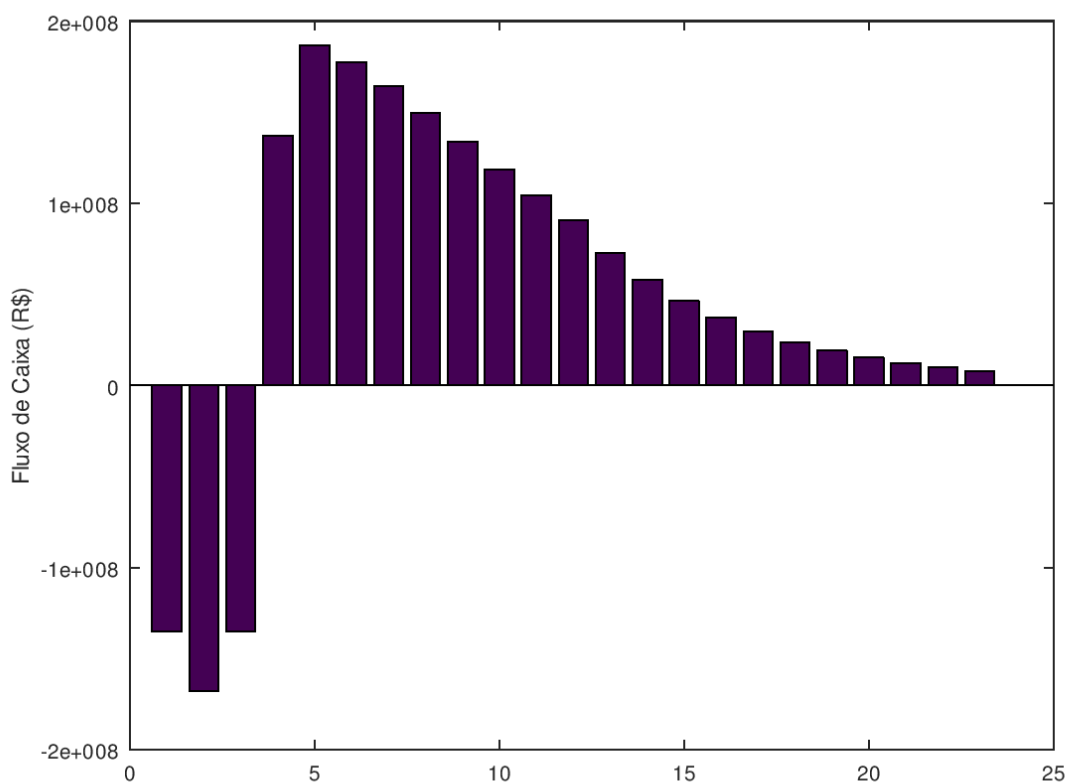
Ano	Fluxo de Caixa (TMA 0%)	Fluxo de Caixa (TMA 25%)
1	-R\$ 135.100.299,80	-R\$ 135.100.299,80
2	-R\$ 167.815.425,29	-R\$ 167.815.425,29
3	-R\$ 135.100.299,80	-R\$ 135.100.299,80
4	R\$ 171.523.281,33	R\$ 137.218.625,07
5	R\$ 291.735.517,65	R\$ 186.710.731,30
6	R\$ 346.517.235,53	R\$ 177.416.824,59
7	R\$ 401.298.271,37	R\$ 164.371.771,95
8	R\$ 456.080.938,74	R\$ 149.448.602,01
9	R\$ 510.862.121,69	R\$ 133.919.440,03
10	R\$ 565.643.692,46	R\$ 118.624.080,09
11	R\$ 675.206.430,48	R\$ 104.090.021,46
12	R\$ 675.206.430,48	R\$ 90.624.673,03
13	R\$ 675.206.430,48	R\$ 72.499.738,42
14	R\$ 675.206.430,48	R\$ 57.999.790,74
15	R\$ 675.206.430,48	R\$ 46.399.832,59
16	R\$ 675.206.430,48	R\$ 37.119.866,07
17	R\$ 675.206.430,48	R\$ 29.695.892,86
18	R\$ 675.206.430,48	R\$ 23.756.714,29
19	R\$ 675.206.430,48	R\$ 19.005.371,43
20	R\$ 675.206.430,48	R\$ 15.204.297,14
21	R\$ 675.206.430,48	R\$ 12.163.437,71
22	R\$ 675.206.430,48	R\$ 9.730.750,17
23	R\$ 675.206.430,48	R\$ 7.784.600,14
VPL	R\$ 11.083.328.630,15	R\$ 1.155.769.036,20

Na Tabela 5.8, é possível observar que, para a taxa zero, não há aumento do fluxo de caixa esperado dos anos 12 até 23, pois não há mudança na vazão da planta. Dessa forma,

avaliando a taxa de 25%, ocorre um aumento da desvalorização do dinheiro ao passar do tempo, fazendo com que o fluxo de caixa desses anos se reduza, apesar da produção da planta ser a mesma durante esse período. Nos anos anteriores, essa queda não é observada, pois a desvalorização do dinheiro é compensada pelo aumento da taxa de produção da planta, aumentando a geração de receita.

O somatório do fluxo de caixa, Figura 5.8, de todos os anos resulta no Valor Presente Líquido (VPL). Conforme observado, há a variação desse valor de acordo com a taxa adotada. No entanto, mesmo para a taxa de 25%, o VPL apresenta resultados positivos (R\$ 1.155.769.036), indicando uma avaliação positiva para a possibilidade de investimento no empreendimento estudado.

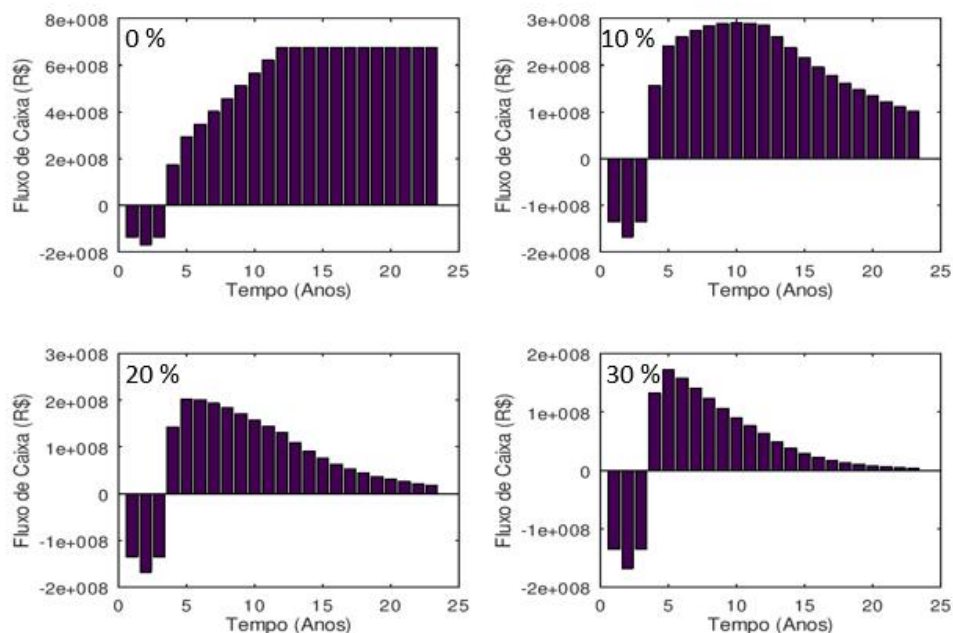
Figura 5.8 - Fluxo de Caixa ao longo dos anos com TMA 25%



O valor de TMA depende das condições adotadas durante o financiamento. Portanto, apesar de ter sido fixado um TMA de 25%, esse valor pode sofrer variações de acordo com as

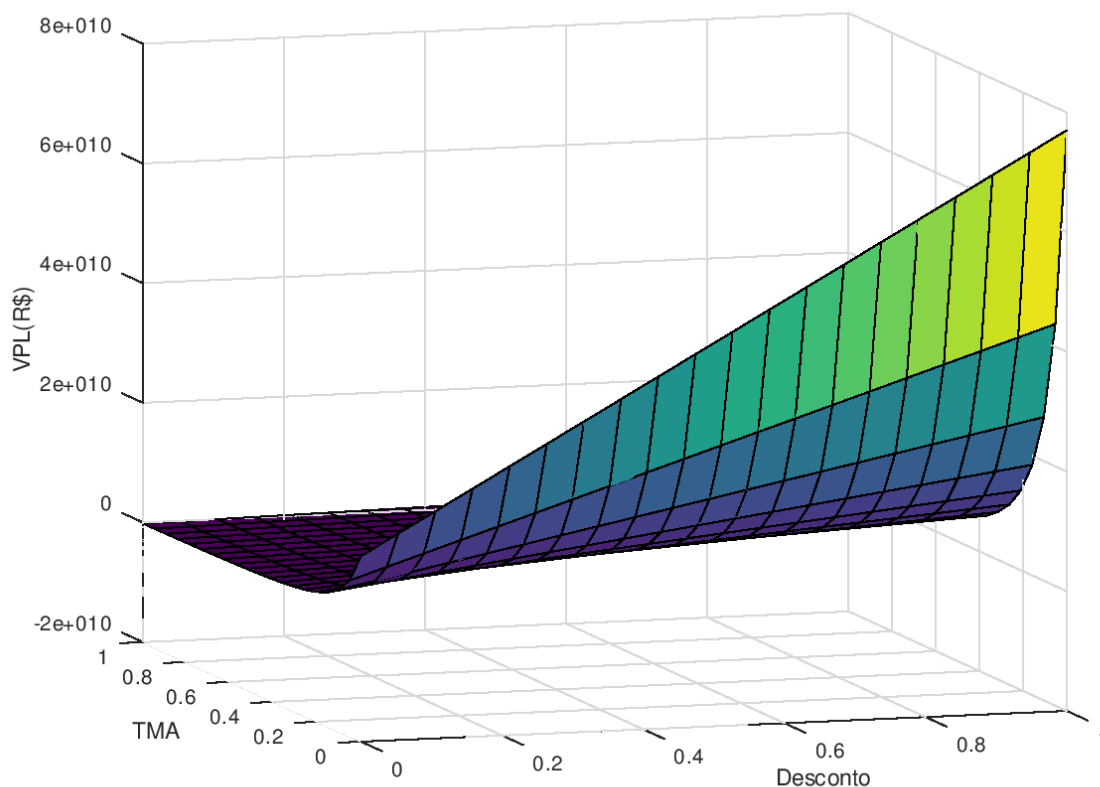
condições político - econômicas do país nos próximos anos. Por isso, é interessante observar a Figura 5.9, que ilustra a variação do fluxo de caixa, consequentemente afetando o VPL, em diferentes cenários de TMA.

Figura 5.9 - Fluxo de Caixa em diferentes Cenários de TMA (0, 10, 20 e 30%)



Além do TMA, há a possibilidade também de que descontos no valor do grão de soja, que poderiam ser conseguidos via políticas de incentivo comuns no Brasil hoje, causem alterações no VPL obtido. A Figura 5.10 ilustra a superfície obtida com diferentes cenários de avaliação de TMA e desconto no valor do grão. A partir dessa superfície, fica mais simples de ser identificado pelo investidor em quais condições o investimento será vantajoso ou não, de acordo com o cenário que ele pretende avaliar. É válido ressaltar que para obtenção desse resultado foi considerado apenas o desconto no valor do grão de soja, pois esse é o principal custo atrelado ao processo e, portanto, o que apresentaria maior influência no preço.

Figura 5. 10 - Superfície de Resposta de VPL variando TMA e Desconto do Grão de Soja



A partir do conhecimento do VPL em diferentes taxas é possível determinar a TIR. Para um empreendimento ser considerado viável economicamente, a TIR (ou seja, a taxa que gera VPL nulo) obtida deve ser superior à TMA considerada no empreendimento. No cenário estudado, valores de TIR acima de 25% indicam que o empreendimento é lucrativo. Como foi obtido um TIR de 50%, o empreendimento integrado é vantajoso em um cenário que não considera nenhum desconto no preço do grão de soja, reduzindo a necessidade de subsídios governamentais.

O último parâmetro econômico a ser avaliado será o Período de Payback Descontado, que também leva em consideração a Taxa Mínima de Atratividade adotada. O critério para a atratividade do investimento é que o tempo calculado seja inferior à vida útil da planta. Esse critério resultou que em 6 anos o retorno do investimento seria nulo e, a partir desse tempo, o

empreendimento começaria a dar lucro. O resultado indica também a viabilidade da planta uma vez que é menor do que o tempo de construção e operação da planta (23 anos).

No entanto, esses indicadores econômicos podem ser avaliados também desconsiderando a etapa de transterificação, pois, avaliando os custos de investimentos iniciais, foi possível observar que a transesterificação foi a etapa que mais acrescentou custos ao processo. Além disso, devido ao baixo preço de comercialização da glicerina e do biodiesel, foi possível observar que o principal produto que contribuiu para a viabilização da biorrefinaria foi o farelo de soja, pois além de possuir um alto valor agregado, é produzido em grandes quantidades. Assim, glicerina e biodiesel apresentam pouca contribuição para a receita.

Dessa forma, como a etapa de transterificação encarece o processo e seus produtos possuem baixo valor agregado, é esperado que os indicadores econômicos apresentem maiores resultados desconsiderando essa etapa e considerando apenas a comercialização do óleo de soja refinado. A Tabela 5.9 compara os indicadores econômicos da biorrefinaria mais complexa e do empreendimento apenas considerando a extração e o refino do óleo.

Tabela 5.9 – Comparação dos Parâmetros Econômicos

Parâmetros Econômicos	Biorrefinaria mais complexa	Desconsiderando Transesterificação
Tempo de Retorno	6 anos	3,2 anos
Taxa Interna de Retorno	0,5	1
Valor Presente Líquido	R\$ 1.155.769.036	R\$ 11.445.224.573

Os resultados mostraram que a transterificação prejudica os indicadores econômicos, conforme esperado. Desconsiderando a última etapa, o tempo de retorno é reduzido, aproximadamente, para a metade, sendo que de 3,2 anos, 3 anos são destinados a construção do empreendimento. Pelo critério da Taxa Interna de Retorno, observa-se que para qualquer TMA adotada o empreendimento é viável. Além disso, o valor presente líquido aumentou, aproximadamente, 10 vezes, ao final do 23º ano, considerando a TMA de 25%.

No entanto, o Biodiesel é o produto motivador do presente trabalho, principalmente, devido a sua crescente demanda no cenário nacional. E, apesar de prejudicar os indicadores econômicos da planta integrada, sua produção é fundamental para o desenvolvimento econômico brasileiro. Além disso, esses resultados reforçam informações apresentadas na introdução mostrando que há muito mais lucro para o empreendedor em comercializar o óleo de soja ao invés de destiná-lo para a produção de biodiesel.

No geral, todos os critérios econômicos considerados na avaliação econômica indicaram que seria lucrativo o investimento na biorrefinaria integrada. No entanto, conforme explicado no Capítulo 4, existem diversos fatores que podem afetar esses resultados, devido às suas incertezas. Por isso, na Seção 5.6 será realizada uma análise de Sensibilidade do empreendimento a essas incertezas.

5.6 – Análise de Sensibilidade

Foi realizado o cálculo de sensibilidade utilizando o indicador VPL para todos os valores considerados para despesas e receita da biorrefinaria integrada completa, conforme Tabela 5.10.

Tabela 5. 10 – Cálculo de Sensibilidade do VPL

Variável	Sensibilidade
Hexano	0,4377
Grão de Soja	4,1708
Água	0,0003
Terra	0,3262
Metanol	4,0394
NaOH	0,0662
Biodiesel	1,5252
Glicerina	0,0565
Tocoferol	0,0030
Fosfolipídios	1,4319
Ácidos Graxos	0,0103
Casca de Soja	0,2700
Farelo de Soja	6,2418
Hidrocarbonetos	0,6409

A partir desses resultados, observa-se as variáveis que mais apresentam influência no cálculo do VPL. A variável que possui maior valor de sensibilidade dentre as despesas é o preço do grão de soja. A forte sensibilidade às modificações no preço do grão de soja já era esperada, pois o grão de soja, mesmo com a integração das etapas, ainda permaneceu sendo o item de maior contribuição para os custos totais. Além disso, antes da integração, esse custo correspondia a 85% das despesas para a produção de biodiesel.

Já entre as receitas, os valores que proporcionam maior sensibilidade aos resultados são os valores considerados para comercialização do farelo de soja, biodiesel e fosfolipídios. Dessa forma, para definição de viabilidade econômica do projeto, esses valores devem ser definidos com maior precisão e considerando diferentes projeções futuras, evitando que conclusões erradas sejam obtidas devido à uma escolha errônea dos valores adotados.

Devido a forte influência observada do farelo de soja nas análises econômicas, é interessante ressaltar que esse estudo considera que haverá incorporação pelo mercado de todo o farelo de soja produzido ao longo dos anos de operação da planta. Assim, todo o farelo de soja será consumido. Dessa forma, não é considerado um cenário de oferta de farelo de soja superior a demanda, o que causaria um excesso de farelo no mercado e sua consequente desvalorização. Essa premissa faz sentido ao pensarmos que o farelo de soja possui destinação alimentícia. Portanto, com o crescimento da população ao longo dos anos, haverá o aumento da demanda por alimentos e, inclusive, pelo farelo.

Além disso, a biorrefinaria se mostrou praticamente insensível ao custo do NaOH e da água, pois seus preços são muito baixos. Os preços de venda da glicerina, tocoferóis e ácidos graxos também não apresentaram muita influência. Esses resultados são compatíveis com a composição da receita apresentada na Figura 5.7, pois glicerina, tocoferóis e ácidos graxos somados contribuíram pouco para a receita da planta e, portanto, a variação nos seus preços de comercialização não seria suficientemente relevante para desqualificação da análise econômica realizada.

Conclusão e Perspectivas

No presente trabalho, foi avaliada a integração econômica da extração do óleo de soja, do seu refino e da utilização do óleo refinado para a produção de biodiesel. Foi elaborado um programa, utilizando o *software* GNU Octave, que calculou todas as etapas do balanço de massa. Além disso, foram fornecidos ao programa dados que permitiram os cálculos de investimento, custos de utilidades e demais custos diretos, indiretos e gerais associados à operação da biorrefinaria.

Como consequência, foram obtidos os fluxos de caixa, além de dados de receitas e despesas. As informações sobre as despesas e custos de matéria-prima mostraram que o custo do grão de soja, que representa 85% do custo de um processo não integrado, agora representa apenas 43% dos custos diretos totais. Associado a isso, a diversificação das fontes de receita da planta integrada permitiu o aumento da lucratividade, conduzindo a valores satisfatórios de todos os indicadores econômicos avaliados, levando a concluir quanto à viabilidade do empreendimento. Ainda que o biodiesel seja o produto de maior interesse, o principal produto da biorrefinaria integrada é o farelo de soja e os principais co-produtos são os fosfolipídios, hidrocarbonetos e casca de soja, o que confirma a importância de se considerar a cadeia de produção do biodiesel de maneira holística quando se busca a viabilidade econômica de um projeto independente.

Como os indicadores econômicos (VPL, Período de Payback e TIR) conduziram a resultados bastante satisfatórios, os resultados apresentam uma boa perspectiva para a produção de biodiesel a partir da soja, pois a aplicação do conceito de biorrefinaria eliminaria a necessidade dos subsídios governamentais para manutenção dessa indústria. Como o estudo possui certo grau de incerteza, há a possibilidade e necessidade de realização de estudos com maior grau de precisão, incluindo fluxogramas de processos e até mesmo a utilização de *softwares* de simulação.

Comparando indicadores econômicos do empreendimento com e sem a etapa de transterificação, confirmou-se que a transterificação encarece o processo e prejudica os indicadores econômicos. No entanto, a produção de biodiesel é essencial para o cenário político e econômico brasileiro, e, portanto, é o motivador do estudo realizado.

O presente trabalho também abre o precedente para a realização de trabalhos futuros contemplando superestruturas de processo. Nessas superestruturas, diversas rotas poderiam ser avaliadas partindo do grão de soja. Além disso, devido à pressão social e econômica sofrida pela destinação de um produto que poderia ser uma fonte alimentícia para produção de biocombustíveis, essa superestrutura poderia contemplar ainda a destinação alimentícia do óleo para a indústria de alimentos, além da produção de biodiesel. Dessa forma, um possível impedimento para implementação real do empreendimento estudado seria estudado e validado (ou não).

A autora espera que o trabalho possa contribuir para estudos mais aprofundados e com maior grau de precisão contemplando a integração das etapas desde o grão de soja até o produto final.

Referências

ABREU, P. S. DE M. **Análise Econômica Dos Processos De Produção Do Biodiesel De Soja: Rota Química X Rota Enzimática**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.

ADEKUNLE, A. S. et al. Effects of degumming on biodiesel properties of some non-conventional seedoils. **Energy Reports**, v. 2, p. 188–193, 2016.

ADITIVOS INGREDIENTES. Lecitina - Emulsionante e Lubrificante. p. 34–39, 2016.

ADVANCED BIOFUELS USA. **Biofuels and the Carbon Cycle**. Disponível em: <<https://advancedbiofuelsusa.info/wp-content/uploads/2017/01/carbon-cycle-handout-special-version-for-Ella.pdf>>. Acesso em: 20 jan. 2019.

AGROLINK. **Cotações**. Disponível em: <<https://www.agrolink.com.br/cotacoes/historico/go/soja-em-grao-sc-60kg>>. Acesso em: 10 fev. 2019.

AHMIA, A. C. et al. Raw material for biodiesel production. Valorization of used edible oil. **Revue des Energies Renouvelables**, v. 17, p. 2–335, 2014.

ALMEIDA, R. L.; RAVAGNANI, M. A. S. S.; MODENES, A. N. Soybean oil extraction in belt extractors with miscella recirculation. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 49, n. 10, p. 996–1005, 2010.

ALTOE, S. M. L.; VOESE, S. B. GESTÃO DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DO BIODIESEL : UM ESTUDO DA CRIAÇÃO DE VALOR NA CADEIA DE SUPRIMENTOS. **ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**, 2013.

ALVIM, J. C. et al. Biorrefinarias: Conceitos, Classificação, Matérias Primas e Produtos. **Journal of Bioenergy and Food Science**, n. June 2016, p. 61–77, 2014.

ANP. **RESOLUÇÃO ANP Nº 30, DE 23.6.2016 - DOU 24.6.2016 - RET. DOU DE 13.1.2017**. Disponível em: <<http://legislacao.anp.gov.br/?path=legislacao-anp/resol-anp/2016/junho&item=ranp-30-2016&export=pdf>>. Acesso em: 20 jan. 2019.

ANP. Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. p. 265, 2018a.

ANP. **CNPE propõe expansão de mistura de biodiesel para até 15% e estabelece novas regras para venda do petróleo e gás natural da União**. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/noticias/anp-e-p/4871-cnpe-propoe-expansao-de-mistura-de-biodiesel-para-ate-15-e-estabelece-novas-regras-para-venda-do-petroleo-e-gas-natural-da-uniao>>. Acesso em: 20 jan. 2019b.

ANTONIASSI, R.; FREITAS, S. C. DE. **Processamento**. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/tecnologia_de_alimentos/arvore/CONT000gc8yujq302wx5ok01dx9lcx1g7v3u.html>. Acesso em: 25 fev. 2019.

APROBIO; UBRABIO; ABIOVE. Biodiesel : oportunidades e desafios no longo prazo. p. 1–12, 2016.

ATADASHI, I. M.; AROUA, M. K.; AZIZ, A. A. Biodiesel separation and purification : A review. v. 36, p. 437–443, 2011.

AWUDU, I.; ZHANG, J. Uncertainties and sustainability concepts in biofuel supply chain management: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 2, p. 1359–1368, 2012.

AZAMBUJA, M. C. DE et al. **Relatório de Comércio Exterior - Superintendência de Distribuição e Logística - Nº 06** (ANP, Ed.). Rio de Janeiro.

AZEVEDO, P. DO C. **Estudo do Atraso de Ignição em Motores Utilizando Biodiesel**.

São João Del Rei: Universidade Federal de São João Del Rei, 2016.

BARBOSA, R. L. et al. Desempenho comparativo de um motor de ciclo diesel utilizando diesel e misturas de biodiesel. **Ciencia e Agrotecnologia**, v. 32, n. 5, p. 1588–1593, 2008.

BENITES, C. I. **Destilado da Desodorização do Óleo de Soja como Suplemento de Vitamina E**. Campinas: Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), 2008.

BERNTSSON, T. et al. What is a biorefinery? 2007.

BIODIESELBR. **Os interesses por trás da formação do preço do biodiesel**. Disponível em: <<https://www.biodieselbr.com/revista/018/a-alquimia-do-preco-1>>. Acesso em: 25 fev. 2019.

BIODIESELBR. **Preço do biodiesel recua R\$ 0,22 por litro em leilão**. Disponível em: <<https://www.biodieselbr.com/noticias/usinas/info/preco-do-biodiesel-recua-r-0-22-por-litro-em-leilao-220818>>. Acesso em: 25 fev. 2019.

BRONDANI, M. et al. **PRODUÇÃO DE BIODIESEL NO RIO GRANDE DO SUL : ASPECTOS**. 2013.

BUCZENKO, G. M.; DE OLIVEIRA, J. S.; VON MEIEN, O. F. Caracterização Físico-Química Do Subproduto Obtido Durante a Desodorização Do Óleo De Soja. **Boletim do Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos**, v. 20, n. 1, p. 55–64, 2014.

BURGHART, P.; EVRARD, J.; INDUSTRIEL, P. **CETIOM ' s Oil Mill Pilot Plant Pilot Plant Description**. Disponível em: <<http://www.regional.org.au/au/gcirc/5/318.htm>>. Acesso em: 1 fev. 2019.

CAIXETA, G. **Estudo de Cenário de Produção de Biodiesel**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009.

CARAMURU. **Caramuru**. Disponível em: <<http://www.caramuru.com/institucional/>>. Acesso em: 11 jan. 2019.

CARDOSO, D. **Cálculo do ICMS por Dentro**. Disponível em: <<https://www.contabeis.com.br/artigos/4478/calculo-do-icms-por-dentro/>>. Acesso em: 12 dez. 2018.

CASA CIVIL. **Presidência da República** Brasil, 2010.

CASA CIVIL - PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA. **LEI Nº 11.097, DE 13 DE JANEIRO DE 2005.**, 2005. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2004-2006/2005/Lei/L11097.htm>

CAVALCANTE, R. M. **Predição da Densidade de Biodiesel Proveniente de Diferentes Matérias-Primas**. Rio de Ja: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010.

CEREALISTA, Z. **Lecitina de Soja Granulada (Granel 200g)**. Disponível em: <<https://www.zonacerealista.com.br/lecitina-de-soja-granulada-granel-200g.html>>.

CGEE. **Avaliação do Biodiesel no Brasil**. Brasília, Brasil: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2004.

CHENG, M. Profitability Analysis of Soybean Oil Processes. 2017.

CHENG, M. H.; ROSENTRATER, K. A. Economic feasibility analysis of soybean oil production by hexane extraction. **Industrial Crops and Products**, v. 108, p. 775–785, 2017.

CHENG, M.; WANG, T. Sustainability analysis of soybean refinery : soybean oil extraction process. 2017.

CHOQUE, B. et al. Biochimie Linoleic acid : Between doubts and certainties. **Biochimie**, v. 96, p. 14–21, 2014.

COMEX STAT. **Base de Dados**. Disponível em: <<http://comexstat.mdic.gov.br/pt/home>>. Acesso em: 1 abr. 2019.

CONSTANZO, O. DI. **Terra De Diatomáceas Natural Organico 200 Gramas**. Disponível

em: <https://perfil.mercadolivre.com.br/ORSO_DI_COSTANZO>. Acesso em: 31 jan. 2019.

CORADI, P. C. et al. armazenados em diferentes ambientes. v. 2018, 2018.

DANTAS, A.; FILHO, M. R.; MENDES, F. Análise Econômica da Produção de Biodiesel em Planta Piloto: Experimental e Simulação. **Congresso Brasileiro de Química**, v. 56, n. 05, p. 1–9, 2016.

DE MEDEIROS, S. R. **Casca de soja na ração**. Disponível em:

<<https://www.grupocultivar.com.br/artigos/casca-de-soja-na-racao>>. Acesso em: 14 dez. 2018.

EMBRAPA. **Soja em números (safra 2017/2018)**. Disponível em:

<<https://www.embrapa.br/soja/cultivos/soja1/dados-economicos>>. Acesso em: 23 jan. 2019.

EMBRAPA. **História da Soja**. Disponível em:

<<https://www.embrapa.br/soja/cultivos/soja1/historia>>. Acesso em: 20 nov. 2018.

ENCARNAÇÃO, A. P. G. GERAÇÃO DE BIODIESEL PELOS PROCESSOS DE TRANSESTERIFICAÇÃO E HIDROESTERIFICAÇÃO , UMA AVALIAÇÃO ECONÔMICA. 2008.

FERRARI, R. A. et al. Biodiesel Production and Quality. 2010.

FRANÇA, B. B. **LEVANTAMENTO EXPERIMENTAL E MODELAGEM TERMODINÂMICA DO EQUILÍBRIO LÍQUIDO-LÍQUIDO NA PRODUÇÃO DE BIODIESEL DE SOJA**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.

FRANCO, A. L. C. et al. BIODIESEL DE MICROALGAS: AVANÇOS E DESAFIOS. **Química Nova**, v. 36, n. 3, p. 437–448, 2013.

FREEDMAN, B.; BUTTERFIELD, R. O.; PRYDE, E. H. Transesterification Kinetics of Soybean Oil. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, v. 63, n. 10, p. 1375–1376,

1986.

FREEDMAN, B.; PRYDE, E. H.; MOUNTS, T. L. Variables Affecting the Yields of Fatty Esters from Transesterified Vegetable Oils. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, v. 2, n. 10, p. 385–390, 1981.

GARCILASSO, V. P.; OLIVEIRA, F. C. DE; COELHO, S. T. Produção E Uso Do Biodiesel No Brasil – Análise De Barreiras E Políticas. **Anais do 10º Congresso sobre Geração Distribuída e Energia no Meio Rural**, n. 11, p. 13, 2015.

GERIS, R. et al. Biodiesel de soja - reação de transesterificação para aulas práticas de química orgânica Biodiesel. **Química Nova**, v. 30, 2007.

GO, A.-R. et al. Process design and evaluation of value- added chemicals production from biomass. **Biotechnology and Bioprocess Engineering**, v. 17, n. 5, p. 1055–1061, 2012.

GOVERNO FEDERAL. 1975 Proálcool. 2010.

GOVERNO FEDERAL. **Agricultura Familiar e do Desenvolvimento Agrário**.

Disponível em: <<http://www.mda.gov.br/sitemda/secretaria/saf-biodiesel/o-que-é-o-programa-nacional-de-produção-e-uso-do-biodiesel-pnpb>>. Acesso em: 20 jan. 2019.

GRANJO, J.; DUARTE, B.; OLIVEIRA, N. Soybean Biorefinery : Process Simulation and Analysis. v. 45, p. 583–588, 2015.

GRANJO, J. F. O.; DUARTE, B. P. M.; OLIVEIRA, N. M. C. Total Site Integration of a Soybean Biorefinery Using Systematic Optimization Techniques. v. 61, p. 1861–1866, 2017.

GRANOL. **Granol - Histórico**. Disponível em:

<<http://www.granol.com.br/empresa/historia/>>. Acesso em: 12 dez. 2018.

GRASSO, F. V. et al. Improvement of Soybean Oil Solvent Extraction through Enzymatic Pretreatment. **International Journal of Agronomy**, v. 2012, p. 1–7, 2012.

GUINAZ, M. et al. Tocoferóis e tocotrienóis em óleos vegetais e ovos Tocopherols and tocotrienols in vegetable oils and eggs. **Química Nova**, v. 32, n. 1678–7064, 2009.

GUNES, F. E. Medical use of squalene as a natural antioxidant. **Journal of Marmara University Institute of Health Sciences**, n. January 2013, p. 1, 2013.

GUNSTONE, F. D. **VEGETABLE OILS IN FOOD TECHNOLOGY: Composition, Properties and Uses**. 1. ed. Oxford: Blackwell Publishing, 2002.

HAAS, M. J. et al. A process model to estimate biodiesel production costs. **Bioresource Technology**, v. 97, n. 4, p. 671–678, 2006.

HIROTA, Y. et al. Purification of Steryl Esters from Soybean Oil Deodorizer Distillate. p. 341–342, 2003.

HOEKMAN, S. K. et al. Review of biodiesel composition, properties, and specifications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 1, p. 143–169, 2012.

JARDINE, J. G.; BARROS, T. D. **Árvore do Conhecimento: Agroenergia**. Disponível em:

<<http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/agroenergia/arvore/CONT000fj1om7kf02wyiv802hvm3jholyoom.html>>. Acesso em: 20 jan. 2019.

KOC, A. B.; ABDULLAH, M.; FERREIDOUNI, M. Soybeans Processing for Biodiesel Production, Soybean - Applications and Technology. 2011.

KUMAR, A.; GUPTA, T.; KOTHARI, A. Particulate emissions from biodiesel vs diesel fuelled compression ignition engine. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 6, p. 3278–3300, 2011.

LEITE, R.; LEAL, M. Novos estudos CEBRAP O biocombustível no Brasil. **SciELO**, v. 78, 2007.

LIMA, R. F. DE et al. ARMAZENAMENTO E SECAGEM DE GRÃOS DE SOJA. **Salão**

do Conhecimento, 2013.

LOPES, K. Investiga o Do Potencial De Melhoria Energ tica No Processamento Da Soja. p. 29, 2008.

MADANI, M.; ENSHAEIEH, M.; ABDOLI, A. Single cell oil and its application for biodiesel production. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 111, p. 747–756, 2017.

MAGALH ES, S. P. DE. **Estudo da rea o de transesterifica o enzim tica do  leo de palma e do comportamento das fases envolvidas**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.

MANDARINO, J. M. G.; ROESSING, A. C. Tecnologia para produ o do  leo de soja: descri o das etapas, equipamentos, produtos e subprodutos. p. 40, 2001.

MANDARINO, J. M. G.; ROESSING, A. C.; HIRAKURI, M. H. Tecnologia para Produ o de  leo de Soja: Descri o das Etapas, Equipamentos, Produtos e Subprodutos - 2^a Edi o. **Embrapa, Londrina, PR**, p. 100, 2015.

MARINKOVI, D. M. et al. Calcium oxide as a promising heterogeneous catalyst for biodiesel production : Current state and perspectives. v. 56, p. 1387–1408, 2016.

MARQUES, D. Avalia o T cnico-Econ mica da Produ o de Eteno via Etanol integrada a uma Usina Flex de Cana-de-A u ar e Milho. Escola de Qu mica-UFRJ.2018.

MENDES, C. Come ou a colheita da safra 2018/19 de soja no Brasil. **Noticias Agr colas**, 2018.

MERTINS, O. et al. Characterization of soybean phosphatidylcholine purity by 1H and 31P NMR. **Quimica Nova**, v. 31, n. 7, p. 1–7, 2008.

MFRURAL. **Casquinha de Soja**. Dispon vel em:

<<https://www.mfrural.com.br/detalhe/casca-de-soja-inteira-307748.aspx>>. Acesso em: 5 jan.

2019.

MORAES, I. DE. **Saiba tudo sobre PIS e COFINS e acabe com qualquer tipo de dúvida.**

Disponível em: <<https://www.contabeis.com.br/noticias/29263/saiba-tudo-sobre-pis-e-cofins-e-acabe-com-qualquer-tipo-de-duvida/>>. Acesso em: 21 jan. 2019.

NASREEN, S. et al. **Review of Catalytic Transesterification Methods for Biodiesel Production.**

OHYAMA, T. et al. Amino Acid Metabolism and Transport in Soybean Plants. **INTECH**, v. Amino Acid, 2017.

OLEOPLAN. **Produtos.** Disponível em: <<http://www.oleoplan.com.br/oleoplan/produtos>>.

OLIVEIRA, J. O. A. DE. **A agroindústria da soja.** São Paulo: Fundação Getúlio Vargas, 1995.

PARK, J. Y. et al. Blending effects of biodiesels on oxidation stability and low temperature flow properties. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 5, p. 1196–1203, 2008.

PERLINGEIRO, C. A. G. **Engenharia de Processos - Análise, Simulação, Otimização e Síntese de Processos Químicos.** 1. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2005.

PETROBRAS. **Solvente.** Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/produtos-e-servicos/produtos/industriais/solvente/>>. Acesso em: 20 jan. 2019.

PORTAL BRASIL. Governo do Brasil. **Percentual obrigatório de biodiesel no óleo diesel passa para 8% Biodiesel**, p. 1–6, 2017.

PRADO, E. R. DE A. et al. Refino de óleos vegetais utilizando lavagem ácida com recirculação. **ENGEVISTA**, v. 14, n. 3, p. 384–391, 2014.

RADENKOVIC, M. 8 Countries that Produce the Most Biofuels in the World. 2016.

REGO, R. B. et al. **Viabilidade Econômico-financeira de projetos.** Rio de Janeiro: FGV,

2010.

ROBERTO, C.; BUENO, F.; FREITAS, S. M. DE. O Biodiesel de Sebo Bovino no Brasil.

2011.

ROQUE, T. M. V. **Análise das Perdas de Hexano numa Unidade de Extração de Óleos e Bagaços Caso de Estudo Iberol Engenharia Química Agradecimentos.**

ROQUE, T. V. et al. Analysis of the Hexane Loss in a Vegetable Oil Extraction Unit. p. 1–10, 2015.

ROTTA, E. H. **Extração de óleo de soja com etanol: Dados de equilíbrio e dimensionamento de um módulo experimental para estudo da transferência de massa do sistema.** Cerro Largo: Universidade Federal da Fronteira Sul, 2015.

SANTOS, C. et al. Life cycle assessment of biodiesel produced by the methylic-alkaline and ethylic-enzymatic routes. **Fuel**, v. 208, p. 329–336, 2017.

SEIP, P. J. Current trends in the Alkali neutralization of edible oils. 1965.

SERIO, M. DI et al. Heterogeneous Catalysts for Biodiesel Production. n. 9, p. 207–217, 2008.

SIGMA ALDRICH. **Squalene**. Disponível em:

<<https://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/sigma/s3626?lang=pt®ion=BR>>.

Acesso em: 5 jan. 2019.

SILLA, H. **Chemical Process Engineering: Design And Economics**. New Jersey, Estados Unidos: Marcel Dekker, INC., 2003.

SILVA, R. et al. Estudo da conversão do óleo de soja em biodiesel em função do tempo, utilizando a metodologia TDSP. **6º Simpósio Nacional de Biocombustíveis**, p. 20–22, abr. 2013.

SNIS. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento**. Disponível em:

<<http://www.snis.gov.br/>>. Acesso em: 1 abr. 2019.

SNT. PRENSA CONTINUA TIPO EXPELLER. Disponível em:

<<http://www.sntmaquinas.com.br/prensa-continua-tipo-expeller>>. Acesso em: 14 dez. 2018.

SOUZA, T. P. C. Simulação de uma Planta de Biodiesel com estudo de viabilidade econômica preliminar utilizando Hysys. Recife: Universidade Federal de Pernambuco, 2011.

TANG, H. et al. Formation of insolubles in palm oil-, yellow grease-, and soybean oil-based biodiesel blends after cold soaking at 4 °c. **JAOCS, Journal of the American Oil Chemists' Society**, v. 85, n. 12, p. 1173–1182, 2008.

TANG, H.; SALLEY, S. O.; SIMON NG, K. Y. Fuel properties and precipitate formation at low temperature in soy-, cottonseed-, and poultry fat-based biodiesel blends. **Fuel**, v. 87, n. 13–14, p. 3006–3017, 2008.

THOMAS, G. C. Análise teórico-experimental da extração de óleo de soja em instalação industrial do tipo Rotocell. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PROMEC, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003.

TURTON, R. et al. **Analysis, synthesis and design of chemical processes.** 3rd. ed. Boston, Estados Unidos: Prentice Hall, 2009.

TYWH. Preço para o hidróxido de sódio industriais a granel. Disponível em:

<https://pt.made-in-china.com/co_tianyuanweihong/product_Price-for-Bulk-Industrial-Sodium-Hydroxide_eyyioysey.html>. Acesso em: 1 abr. 2019.

VALOR ECONÔMICO. Produção de biodiesel precisará de subsídios para ser viável, diz estudo. **Biodieselbr**, 1999.

VIANNA, J. F.; XAVIER, D.; HENRIQUE, L. Processo químico industrial de extração de

óleo vegetal : um experimento de química geral. **Química Nova**, 1999.

VILLARDI, H. G. . et al. **Produção de ésteres etílicos através de resíduo da indústria de soja utilizando etanolise supercrítica**. Congresso Brasileiro de Engenharia Química. **Anais...**2016

VILLARDI, H. G. D. et al. Catalytic and Non-catalytic Esterification of Soybean Oil Deodorizer Distillate by Ethanol : Kinetic Modelling. **CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS**, v. 57, p. 1999–2004, 2017a.

VILLARDI, H. G. D. et al. Study of the Production of Ethyl Esters of Soybean Industry Using Waste Acid with and without Catalyst. **CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS**, v. 57, p. 163–168, 2017b.

WEST, A. H.; POSARAC, D.; ELLIS, N. Assessment of four biodiesel production processes using HYSYS.Plant. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 14, p. 6587–6601, 2008.

YOU, Y. DER et al. Economic cost analysis of biodiesel production: Case in soybean oil. **Energy and Fuels**, v. 22, n. 1, p. 182–189, 2008.

YOUNG, A.; PESSOA, F.; QUEIROZ, E. **Tecnologias de produção de biodiesel - Produção em meio supercrítico e em meio enzimático**. Saarbrucken: Novas Edições Acadêmicas, 2015.

ZANCAN, N.; MARTINES FILHO, J. G. Biodiesel a partir da soja : vantagens e desvantagens. p. 2008, 2008.

ZEHNDER, C. T. Deodorization. **Practical Handbook of Soybean Processing and Utilization**, n. 1, p. 239–257, 1995.

ZHANG, Y. et al. Biodiesel production from waste cooking oil : 1 . Process design and technological assessment. **Bioresource Technology**, v. 89, p. 1–16, 2003.

ZHAO, X. et al. Lipase-catalyzed process for biodiesel production: Enzyme immobilization,

process simulation and optimization. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 44, p. 182–197, 2015.

ANEXOS

```
function [npv,fcglobal]=spja25(tma,desconto,variacaodespesa,variacaoreceita)
```

```
fator=7920;% h/ano
```

```
% Cenário principal avaliado
```

```
% tma=0.25;
```

```
% desconto=0;
```

```
% Variação de despesa e receita indicam o quanto deseja perturbar esses valores
```

```
% para avaliar a mudança no NPV
```

```
% variacaodespesa=[1 1 1 1 1 1]
```

```
% variacaoreceita=[1 1 1 1 1 1 1]
```

```
%%%%%%%%%%%% Vazão em função do tempo %%%%%%%%%%%%%
```

```
% 2019-2021 - Construção
```

```
% 2022 - 303500,00 m3 de biodiesel
```

```
% 2023 - 364200,00 m3 de biodiesel
```

```
% 2024 - 424900,00 m3 de biodiesel
```

%2025 - 485600,00 m3 de biodiesel

%2026 - 546300,00 m3 de biodiesel

%2027 - 607000,00 m3 de biodiesel

%2028 - 667700,00 m3 de biodiesel

%2029 - 728400,00 m3 de biodiesel

%2030-2041 - 789100,00 m3 de biodiesel

% Quantidade de soja anual gasta em toneladas

sojaano(1)=0; %2019

sojaano(2)=0; %2020

sojaano(3)=0; %2021

sojaano(4)=200.6881361*fator; %2022

sojaano(5)= 240.8259789*fator; %2023

sojaano(6)= 280.9636257*fator; %2024

sojaano(7)= 321.1007728*fator; %2025

sojaano(8)= 361.2391153*fator; %2026

sojaano(9)= 401.3763702*fator; %2027

sojaano(10)= 441.5139092*fator;%2028

sojaano(11)= 481.6511641*fator; %2029

i=12;

for i=12:23

sojaano(i)= 521.7886916*fator; %2030 até 2041

end

%%%%%%%%%%%%%Definições%%%%%%%%%%%%%

dolar=3.70;

mmhexano=86.18; %g/mol

mmolesoja= 874.8; %g/mol

mmbiodiesel=296.4; %g/mol

mmmetanol= 32.04; %g/mol

mmnaoh= 39.997; %g/mol

mmglicerina=92.09; %g/mol

densidadebiodiesel=0.8696*1000; %kg/m3

precohexano=157404; % reais por tonelada

precograodesoja=(1200)*(1-desconto); % reais por tonelada

precocasca=(13.5/12)*1000; % reais por tonelada

precofarelo=2632.92; % reais por tonelada

precofosfolipideos=164950; % reais por tonelada

precotocoferois=141216; % reais por tonelada

precobiodiesel=2794; % reais por tonelada

precoglicerina=1000; % reais por tonelada

precoagua=2; %reais por tonelada

precoterra=33.9*5*1000;

densidademetanol=792; %kg/m3

precometanol=64.75*1000 ; %reais por tonelada

preconaoh=2500; %reais por tonelada

precoacidograxo=5346.22; %reais por tonelada

densidadeesqualeno=858; %kg/m3

precoesqualeno=(6109*1000/densidadeesqualeno)*1000 ;

%% Cálculos de Balanco de Massa %% % % % % %

for i=1:23

soja(i)=sojaano(i)/fator;

% Corrente 01 %

qtdcasca(i)=7.3*soja(i)/100; %7,3% do grão é casca Fonte: Livro Gunstone

qtdpolpa(i)=90.3*soja(i)/100; %9.3% do grão é polpa Fonte: Livro Gunstone

qtdoleo(i)=22.8*qtdpolpa(i)/100; % 22,8% da polpa é oleo. Fonte: Livro Gunstone

% Corrente 05 %

qtdhexano5(i)=1.0*(soja(i)-qtdcasca(i)); %o que precisa entrar no extrator para extração bem sucedida. Fonte: Roque,2015

%Corrente 06%

qtdoleo6(i)=0.95*qtdoleo(i); %Adotando 0.95 do oleo passa, e 0,05 é perdido.

$\text{molsoleo6}(i) = \text{qtdoleo6}(i) * (10^6) / \text{mmoleosoja}$; %passando qtdoleo6 para g

$\text{fmolarhexano} = 0.36$; % Aproximando para o pior caso em fração molar, http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/266512/1/Custodio_AlineFerrao_M.pdf

$\text{qtdhexano6}(i) = ((1 - \text{fmolarhexano}) * \text{molsoleo6}(i) * \text{mmhexano}) / (10^6)$; %Passando para tonelada de hexano que é coletada

$\text{corrente6}(i) = \text{qtdoleo6}(i) + \text{qtdhexano6}(i)$;

%Corrente 04%

$\text{qtdhexanoperdida4}(i) = (0.4 / 1000) * \text{soja}(i)$; % Metade do Máximo - Respeitando legislação ambiental, 0.8 kg por tonelada de oleo p atmosfera - Fonte: Roque, 2015

$\text{qtdhexano4}(i) = \text{qtdhexano6}(i) - \text{qtdhexanoperdida4}(i)$;

%Corrente 7%

$\text{qtdhexano7}(i) = \text{qtdhexano5}(i) - \text{qtdhexano6}(i)$;

$\text{qtdfarelo}(i) = \text{soja}(i) - (\text{qtdcasca}(i) + \text{qtdoleo}(i))$; %Quantidade de farelo que é formada e coletada

$\text{corrente7}(i) = \text{qtdhexano7}(i) + \text{qtdfarelo}(i)$;

%Corrente 8 %

$\text{qtdfarelo8}(i) = \text{soja}(i) - (\text{qtdcasca}(i) + \text{qtdoleo}(i))$;

$\text{qtdhexanoperdida3}(i) = (0.4 / 1000) * \text{soja}(i)$; % Metade do Máximo - Respeitando legislação ambiental, 0.8 kg por tonelada de oleo p atmosfera - Fonte: Roque, 2015

$\text{corrente8}(i) = \text{qtdfarelo8}(i) + (\text{qtdhexano7}(i) - \text{qtdhexanoperdida3}(i))$;

%Corrente 3%

$$\text{qtdhexano3}(i)=\text{qtdhexano7}(i)-\text{qtdhexanoperdida3}(i);$$

%Corrente 2% Make up Hexano %

%Quantidade de Hexano realmente necessária no processo%

$$\text{qtdhexano2}(i)=(\text{qtdhexanoperdida3}(i)+\text{qtdhexanoperdida4}(i));$$

%Corrente 9% No oleo extraido, que sera degomado, temos as seguintes proporções, pelo Livro Gunstone, 2002.

$$\text{triacilglicerol9}(i)=0.95*\text{qtdoleo6}(i);$$

$$\text{fosfolipideos9}(i)=(1.5/100)*\text{qtdoleo6}(i);$$

$$\text{tocoferois9}(i)=(0.21/100)*\text{qtdoleo6}(i);$$

$$\text{hidrocarbonetos9}(i)=(0.014/100)*\text{qtdoleo6}(i);$$

$$\text{acidosgraxoslivres9}(i)=(0.3/100)*\text{qtdoleo6}(i);$$

$\text{qtdoleoch9}(i)=\text{triacilglicerol9}(i)+\text{fosfolipideos9}(i)+\text{tocoferois9}(i)+\text{hidrocarbonetos9}(i)+\text{acido sgraxoslivres9}(i)$; % check composição, para verificar se os totais batem.

$\text{outroscomponentes9}(i)=(\text{qtdoleo6}(i)-\text{qtdoleoch9}(i))*0.9$; %criterio 0.9 adotado, 10% dos outros componentes do oleo se perdem

$$\text{qtdhexano9}(i)=\text{corrente6}(i)-(\text{qtdoleoch9}(i)+\text{outroscomponentes9}(i));$$

$$\text{qtdoleo9}(i)=\text{qtdoleoch9}(i)+\text{outroscomponentes9}(i);$$

%Etapa de Degomagem%

%Corrente 10%

$$\text{h2o10}(i)=(3/100)*(\text{qtdoleo9}(i)); \text{ % Dado Embrapa: 3\%}$$

%Corrente 11%

$corrente11(i)=h2o10(i)+qtdoleo9(i);$

%Corrente 12%

$corrente12(i)=corrente11(i);$

%Corrente 13% formação de lecitina

$qtdtriglicerideos13(i)=(0.5/0.35)*(0.9*fosfolipideos9(i));$ % 0.9 é a quantidade de fosfolipideos hidratáveis, Gunstone, 2012.

% Demais informações (ADITIVOS INGREDIENTES, 2019)

$qtdoutrosmateriais13(i)=(0.15/0.35)*(outroscomponentes9(i));$

$aquosa13(i)=h2o10(i)+0.9*fosfolipideos9(i)+qtdtriglicerideos13(i)+qtdoutrosmateriais13(i);$

%Considerando a remoção de todos os fosfolipideos hidratáveis.

$oleosa13(i)=qtdoleo9(i)-aquosa13(i)+h2o10(i);$

$oleosa13check(i)=0.1*fosfolipideos9(i)+triacilglicerol9(i)-$

$qtdtriglicerideos13(i)+outroscomponentes9(i)-qtdoutrosmateriais13(i);$

$oleosa13check(i)=oleosa13check(i)+tocoferois9(i)+hidrocarbonetos9(i)+acidosgraxoslivres9(i);$

%Corrente 14%

$corrente14(i)=fosfolipideos9(i)*0.9;$

%Corrente 15%

$corrente15(i)=aquosa13(i)-corrente14(i);$

%Etapa de Neutralização%

%Corrente 16%

oleosa16(i)=oleosa13(i);

%Corrente 17%

naoh17(i)=(1.2/100)*oleosa16(i);

%Corrente 18%

corrente18(i)=naoh17(i)+oleosa16(i);

%Corrente 19%

corrente19(i)=corrente18(i);

%Corrente 20% na separação separa os ácidos graxos

aquosa20(i)=naoh17(i)+ácidosgraxoslivres9(i)*0.9; %Considerando que apenas 90% dos ácidos graxos são removidos

%Corrente 21%

oleosa21(i)=oleosa16(i)-ácidosgraxoslivres9(i)*0.9; %Considerando que apenas 90% dos ácidos graxos são removidos

%Corrente 22% Lavagem com água

agua22(i)=0.2*oleosa21(i);

%Corrente 23%

corrente23(i)=agua22(i)+oleosa21(i);

%Corrente 24%

corrente24(i)=corrente23(i);

%Corrente 25%

$$\text{aquosa25}(i)=\text{agua22}(i)+0.1*\text{fosfolipideos9}(i);$$

$$\text{aq25completa}(i)=100*\text{aquosa25}(i)/(100-2.5); \% \text{ 2.5\% deessa corrente é composta por óleo.}$$

fonte: Prado et. al

$$\text{oleosa25}(i)=\text{aq25completa}(i)-\text{aquosa25}(i);$$

$$\text{corrente25}(i)=\text{aq25completa}(i);$$

% Corrente 26%

$$\text{oleosa26}(i)=\text{oleosa21}(i)-0.1*\text{fosfolipideos9}(i)-\text{oleosa25}(i);$$

% Corrente 27%

$$\text{terra27}(i)=(0.3/100)*\text{oleosa26}(i);$$

% Corrente 28%

$$\text{corrente28}(i)=\text{terra27}(i)+\text{oleosa26}(i);$$

% Corrente 29%

$$\text{corrente29}(i)=\text{corrente28}(i);$$

% Corrente 31%

$$\text{corrente31}(i)=\text{terra27}(i)+\text{outroscomponentes9}(i)-\text{qtdoutros materiais13}(i); \% \text{ retirando todos os outros comp.}$$

% Corrente 30%

$$\text{oleosa30}(i)=\text{oleosa26}(i)-(\text{outroscomponentes9}(i)-\text{qtdoutros materiais13}(i));$$

% Corrente 32%

% Entrada de vapor para desodorização - Não considerado, pois entra como custo de utilidades

%Corrente 33%

oleosa33(i)=oleosa30(i);

%Corrente 34%

oleosa34(i)=oleosa33(i);

%Corrente 35%

oleosa35(i)=acidosgraxoslivres9(i)*0.1; %Restante dos ácidos graxos saem nessa corrente.

Fonte: Destilado da desodorização do óleo de soja como suplemento de vitamina E.
Benites,2008

tocoferois35(i)=0.1*oleosa35(i)/0.9;

corrente35(i)=tocoferois35(i)+oleosa35(i);

%Corrente 36%

oleosa36(i)=oleosa34(i)-corrente35(i); % em ton/h

molsoleosa36(i)=(oleosa36(i)*(10⁶)/mmoleosoja); %em mol/h

%Corrente 41% metanol e naoh que retornam

metanol41mol(i)=molsoleosa36(i)*3.3; % nao consumidos, pois é colocado em excesso 6:1 e o rendimento é de 90%

metanol41massa(i)=metanol41mol(i)*mmmetanol*(10⁻⁶); %em ton/h

naoh41massa(i)=metanol41massa(i)*0.3;

massa41(i)=naoh41massa(i)+metanol41massa(i);

%Corrente 37% Make Up de Metanol (Consumido)

metanol37mol(i)=molsoleosa36(i)*2.7;

metanol37massa(i)=metanol37mol(i)*mmmetanol*(10^-6); % em ton/h

% Corrente 38% Make Up de Naoh (Consumido)

nahton38(i)=metanol37massa(i)*0.3;

naohmol38(i)=nahton38(i)*(10^6)/mmnaoh;

% Corrente 39%

corrente39massa(i)=metanol37massa(i)+nahton38(i);

corrente39mol(i)=metanol37mol(i)+naohmol38(i);

% Corrente 40%

corrente40massa(i)=corrente39massa(i);

% Corrente 46% óleo reciclado

oleo46mol(i)=(oleosa36(i)*(10^6)/mmoleosoja)*0.1; % nao consumidos

oleo46massa(i)=oleo46mol(i)*mmoleosoja*(10^-6); % em ton/h

corrente46m(i)=oleo46massa(i);

% Corrente 42%

corrente42m(i)=corrente46m(i)+oleosa36(i)+corrente40massa(i);

% Corrente 43%

corrente43m(i)=corrente42m(i);

% Corrente 44%

glicerina44mol(i)=molsoleosa36(i)*0.9; % em mol/h % Considera a conversão de 90%

glicerina44mm(i)=glicerina44mol(i)*mmglicerina/(10^6); % em ton/h

% Corrente 45%

biodiesel45mol(i)=molsoleosa36(i)*3*0.9;% em mol/h

biodiesel45massa(i)=biodiesel45mol(i)*mmmbiodiesel/(10^6); % em ton/h

biodiesel45volume(i)=biodiesel45massa(i)*1000/densidadebiodiesel; % em m3/h

biodiesel45volumeannual(i)=biodiesel45volume(i)*fator; % em m3/ano

%%%%%%%% Despesas %%%%%%%%%%

gastohexano(i)=precohexano*fator*qtddhexano2(i)*variacaodespesa(1);

gastograo(i)=precograodesoja*fator*soja(i)*variacaodespesa(2);

gastoagua(i)=(h2o10(i)+agua22(i))*fator*precoagua*variacaodespesa(3);

gastoterra(i)=precoterra*fator*terra27(i)*variacaodespesa(4);

gastometanol(i)=precometanol*fator*(metanol37massa(i))*variacaodespesa(5);

gastonaoh(i)=preconaoh*fator*(naoh17(i)+naohton38(i))*variacaodespesa(6);

despesas(i)=gastohexano(i)+gastograo(i)+gastoagua(i)+gastoterra(i)+gastometanol(i)+gastonaoh(i);

%%%%%%%% Receitas %%%%%%%%%%

receitabiodiesel(i)=fator*precobiodiesel*biodiesel45massa(i)*variacaoreceita(1);

receitaglicerina(i)=fator*glicerina44mm(i)*precoglicerina*variacaoreceita(2);

receitatocoferol(i)=fator*tocoferois35(i)*precotocoferois*variacaoreceita(3);

receitafosfolipideos(i)=fator*fosfolipideos9(i)*0.9*precofosfolipideos*variacaoreceita(4);

receitaacidosgraxos(i)=fator*acidosgraxoslivres9(i)*precoacidograxo*variacaoreceita(5);

```

receitacascadesoja(i)=fator*qtddasca(i)*precoasca*variacaoreceita(6);

receitafarelosoja(i)=fator*qtddfarelo8(i)*precofarelo*variacaoreceita(7);

receitashidrocarbonetos(i)=fator*hidrocarbonetos9(i)*precoesqualeno*variacaoreceita(8);

receitas(i)=receitashidrocarbonetos(i)+receitafarelosoja(i)+receitacascadesoja(i)+receitaacid
osgraxos(i)+receitabiodiesel(i)+receitafosfolipideos(i)+receitaglicerina(i)+receitatocoferol(i)
;

end

```

%%%%%%%%%%%%Cálculos de Investimento Inicial %%%%%%%%%%

terra=0; %Preencher com valores

desenvolvimento=0; % Preencher com valores

% Para o investimento inicial, usa o valor final, pois considera a capacidade de operação máxima.

qtdsoja1=(sojaano(23)/fator); % Aumento da vazão da planta com critério de segurança em ton/h

qtddasca1=7.3*(sojaano(23)/fator)/100; %7,3% do grão é casca Fonte: Livro Gunstone

qtdpolpa1=90.3*(sojaano(23)/fator)/100; %9.3% do grão é polpa Fonte: Livro Gunstone

qtdoleo1=22.8*qtdpolpa1/100; % 22,8% da polpa é óleo. Fonte: Livro Gunstone

indice2018=567.5;

% fonte: http://folk.ntnu.no/magnehi/cepci_2011_py.pdf

% fonte: <https://www.chemengonline.com/cepci-updates-january-2018-prelim-and-december-2017-final/?printmode=1>

% Ordem da informação na matriz - base de tonelada de soja/ano_ano_indiceano_custo_fatordelocalidade

extracao=[15387 1995 381.1 2083500 1;

4217621 2015 570.5 806162.34 1.43;

200000 2015 570.5 18814500 1.43];

refino=[15387 1995 381.1 902500 1];

transesterificacao=[201410 2006 499.6 41987600 1.43;

47960 2008 575.4 4343800 1.43;

47960 2008 575.4 5106000 1.43];

% Custo de Extração %

custo=0; linha=1;

for linha=1:3

custoextracao=extracao(linha,5)*(((qtdsoja1*fator)/(extracao(linha,1)))^0.6)*extracao(linha,4)*(indice2018/extracao(linha,3));

custo=custo+custoextracao;

endfor

custoextr=(custo/3);

% Custo de Refino %

custo2=0; linha2=1;

```

for linha2=1:1

custorefino=refino(linha2,5)*(((qtdsoja1*fator)/(refino(linha2,1)))^0.6)*refino(linha2,4)*(in
dice2018/refino(linha2,3));

custo2=custo2+custorefino;

endfor

custorefino=(custo2);

% Custo de Refino %

custo3=0; linha3=1;

for linha3=1:3

custotransest=transesterificacao(linha3,5)*(((qtdsoja1*fator)/(transesterificacao(linha3,1)))^
0.6)*transesterificacao(linha3,4)*(indice2018/transesterificacao(linha3,3));

custo3=custo3+custotransest;

endfor

custotransest=(custo3/3);

investimentoinicial=custotransest+custoextr+custorefino;

%Custo de Capital%

custocapitalfixo=investimentoinicial+terra+desenvolvimento;

%Como está zerado o custo de terra e desenvolvimento, o custo de capital fixo fica

%igual ao custo de investimento inicial definido pelo Turton.

%%%%%%%%%% Custos de Operação %%%%%%%%%%%

```

```

for i=1:23

% Calculo do capital de giro % Apenas no primeiro ano de operação (4º Ano)

if i==4

cgiro=0.2*custocapitalfixo;

elseif

cgiro=0;

end

%%% Custos diretos %%% Variam com quantidade

cmp(i)=despesas(i); % custo das MP utilizadas no processo

ctr(i)=0; %tratamento de rejeitos eh nulo, pq a borra eh reaproveitada.

cut01(i)=(8.42+7.42+3.2+6.23)*dolar*sojaano(i); % custo de utilidades do refino e extração,
previstos pelo embrapa.

cut02(i)=2.312*sojaano(i); %Custo de Utilidades da transesterificação

% custo de utilidades de transesterificacao, http://www.tpqb.eq.ufrj.br/download/biodiesel-
via-trans-e-hidroesterificacao.pdf

% 100 mil toneladas/ano de biodiesel, 1445000 reais.

%equivalente a 625mil ton/ ano de grao. 1 ton de grao=2.312 reais

cut(i)=cut01(i)+cut02(i);

cop01(i)=(3.65+2.56)*sojaano(i); %definicao embrapa

cop02(i)=(1.92/5.6)*sojaano(i); % Fonte: 1,92 reais por tonelada de oleo
http://coral.ufsm.br/cenergia/images/PRODU%C3%87%C3%83O\_DE\_BIODIESEL\_NO\_R

```

IO_GRANDE_DO_SUL_-

_ASPECTOS_ECONOMICOS_DAS_ETAPAS_DE_PRODUÇÃO.

pdf

% Se tenho 1,92 reais para 1 tonelada de oleo e em 1 tonelada de grão de 0.1789 tonelada de
grao refinado

% Logo, para 1 ton de oleo, tenho 5.6 toneladas de grao.

$\text{cop}(i) = \text{cop01}(i) + \text{cop02}(i);$

$\text{csup}(i) = 0.2 * \text{cop}(i);$ % Definido pelo Silla

$\text{cmat} = 0.045 * \text{custocapitalfixo};$

$\text{clab}(i) = 0.15 * \text{cop}(i);$

$\text{custodiretoanterior}(i) = \text{ctr}(i) + \text{cut}(i) + \text{cop}(i) + \text{csup}(i) + \text{cmat} + \text{clab}(i) + \text{cmp}(i);$

%%% custos de despesas gerais %%%

$\text{cgerais}(i) = 0.025 * \text{receitas}(i);$ % Livro Perlingeiro

end

for i=1:23

%%% Custos indiretos %%% - Não mudam em função da vazão!

$\text{fs} = 0.05;$

$\text{cdep} = (1 - \text{fs}) * \text{investimentoinicial} / 20;$ % vida util da planta 20 anos, custo de depreciação

$\text{ip} = 0.02 * \text{custocapitalfixo};$ % imposto de propriedade

```
s=0.01*custocapitalfixo;% seguro
```

```
cops=0.60*(csup(23)+cmat+cop(23));
```

```
ctax(i)=ip+s+cops;
```

```
cind(i)=ctax(i); % total dos custos indiretos
```

```
% Custos Gerais
```

```
CP(i)=cgerais(i)+cind(i)+custodiretoanterior(i);
```

```
croy(i)=0.03*CP(i);
```

```
custodireto(i)=custodiretoanterior(i)+croy(i);
```

```
CP2(i)=cgerais(i)+cind(i)+custodireto(i);
```

```
end
```

```
%%%%%%%%
```

```
Fluxo de caixa
```

```
%%%%%%%%
```

```
for i=1:23
```

```
%Fonte do Fluxo de Caixa: Livro Rego et al
```

```
pisecofinsgrandes(i)=((1.65+7.6)/100)*(receitas(i)-despesas(i)); % para grandes empresas
```

```
icms(i)=0.18*receitas(i); % é 18% do preço da venda.
```

```
Fonte:https://www.contabeis.com.br/artigos/4478/calculo-do-icms-por-dentro/
```

```
receitasliquidas(i)=receitas(i)-pisecofinsgrandes(i)-icms(i);
```

```
lucrobruto(i)=receitas(i)-despesas(i);
```


lucrooperacionalbruto(i)=lucrobruto(i)-cgerais(i)-cind(i)-custodireto(i)+cmp(i); %Somando as matérias - primas, pois ela está também nos custos diretos, apenas para não contabilizar duas vezes, já que já foi considerada na etapa anterior.

lucrooperacional(i)=lucrooperacionalbruto(i)-cdep;

impostoderenda(i)=0.25*lucrooperacional(i);

lucroliquido(i)=lucrooperacional(i)-impostoderenda(i);

fcoperacional(i)=lucroliquido(i)+cdep;

% Calculo do investimento inicial dividido em 3 anos de construção

if i<=3

investimentoinicialdividido(1)=0.3*investimentoinicial;

investimentoinicialdividido(3)=investimentoinicialdividido(1);

investimentoinicialdividido(2)=investimentoinicial*0.4;

elseif i>3

investimentoinicialdividido(i)=0;

end

% Calculo do capital de giro

if i==4

cgiro=0.2*custocapitalfixo;

elseif cgiro=0

end

```

fcglobal(i)=fcoperacional(i)-investimentoinicialdividido(i)-cgiro;

end

fctotal=0;

for i=1:23

fctotal=fctotal+fcglobal(i);

end

vresidual=fctotal/investimentoinicial;

fctotal2=fctotal+vresidual;

%%%      Atualização do valor no tempo, utilizando TMA      %%%

fctempototal=0;

for i=1:23

if i<=3;

fcglobal(i)=fcglobal(i);

else

fcglobal(i)=fcglobal(i)/((1+tma)^(i-3));

end

fctempototal=fctempototal+fcglobal(i);

end

npv=fctempototal+vresidual/((1+tma)^(20));

```

end