

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS

**EMILLY RAFAELLY RABELO RODRIGUES
ANTÔNIO AUGUSTO PRADO LIMA**

**PROJETO CONCEITUAL DE PRODUÇÃO DE BIODIESEL COM PURIFICAÇÃO
POR ADSORÇÃO UTILIZANDO AMIDO DE MILHO**

POÇOS DE CALDAS/MG

2025

**EMILLY RAFAELLY RABELO RODRIGUES
ANTÔNIO AUGUSTO PRADO LIMA**

**PROJETO CONCEITUAL DE PRODUÇÃO DE BIODIESEL COM PURIFICAÇÃO
POR ADSORÇÃO UTILIZANDO AMIDO DE MILHO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química, pela Universidade Federal de Alfenas, Campus de Poços de Caldas.

Professor Orientador: Dr. Leandro Lodi

POÇOS DE CALDAS/MG

2025

Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal de Alfenas
Biblioteca Campus Poços de Caldas

Rodrigues, Emilly Rafaelly Rabelo.

PROJETO CONCEITUAL DE PRODUÇÃO DE BIODIESEL COM PURIFICAÇÃO
POR ADSORÇÃO UTILIZANDO AMIDO DE MILHO / Emilly Rafaelly Rabelo
Rodrigues, Antônio Augusto Prado Lima. - Poços de Caldas, MG, 2025.
48 f. : il. -

Orientador(a): Leandro Lodi.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) -
Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, MG, 2025.
Bibliografia.

1. Biodiesel. 2. Adsorção. 3. Amido de milho. 4. Dimensionamento de
produção. 5. Projeto industrial. I. Lima, Antônio Augusto Prado. II. Lodi,
Leandro, orient. III. Título.

**EMILLY RAFAELLY RABELO RODRIGUES
ANTÔNIO AUGUSTO PRADO LIMA**


**PROJETO CONCEITUAL DE PRODUÇÃO DE BIODIESEL COM PURIFICAÇÃO
POR ADSORÇÃO UTILIZANDO AMIDO DE MILHO**

O(A) Presidente da banca examinadora abaixo assina a aprovação do Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química pela Universidade Federal de Alfenas.

Aprovada em: 18/11/2025

Prof. Dr. Leandro Lodi
Universidade Federal de Alfenas

Assinatura:


 Documento assinado digitalmente
LEANDRO LODI
Data: 28/11/2025 18:54:10-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Rodrigo Corrêa Basso
Universidade Federal de Alfenas

Assinatura:

Prof.^a Dr.^a Grazielle Santos Silva Andrade
Universidade Federal de Alfenas

Assinatura:

 Documento assinado digitalmente
GRAZIELLE SANTOS SILVA ANDRADE
Data: 09/12/2025 19:38:55-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

RESUMO

A matriz energética mundial atual é composta majoritariamente por combustíveis não-renováveis, de modo que, cada vez mais, é necessário explorar alternativas mais sustentáveis. O biodiesel se destaca como um substituto renovável para os combustíveis fósseis, sendo obtido a partir da reação de transesterificação de óleos vegetais ou gorduras animais com álcoois de cadeia curta. Atualmente, o processo de purificação do biodiesel industrial é realizado por lavagem com água, o que gera elevado volume de efluentes, mas esta etapa pode ser substituída por adsorção com adsorventes sólidos naturais. Deste modo, o objetivo desse estudo foi realizar o dimensionamento de uma planta de produção de biodiesel com purificação por adsorção utilizando amido de milho, contemplando estudo técnico e econômico e utilizando referências da literatura. Foram elaborados o diagrama de blocos, fluxograma do processo, balanços de massa e energia, dimensionamento de tanques, bombas e agitadores, além de estudo de gargalo e análise de riscos (What If). O balanço de massa indicou que, para cada batelada com 4.000 kg de óleo de soja, são necessários 879,73 kg de metanol e 68 kg de metilato de sódio, resultando em 4.100,53 kg de biodiesel e 185,6 kg de glicerina como subproduto. O diagrama de Gantt apontou a decantação como principal gargalo do processo, com duração de 5 horas. A estimativa de custos fixos indicou um investimento necessário de US\$ 630.500,00 e a estimativa de custos variáveis indicou um valor aproximado de US\$ 4.957,10 por batelada, resultando em um custo unitário de US\$ 1,06 por litro de biodiesel produzido.

Palavras-chave: biodiesel; adsorção; amido de milho; dimensionamento de produção; projeto industrial.

ABSTRACT

The current global energy matrix is predominantly composed of non-renewable fuels, making it increasingly necessary to explore more sustainable alternatives. Biodiesel stands out as a renewable substitute for fossil fuels, being obtained through the transesterification reaction of vegetable oils or animal fats with short chain alcohols. Currently, the industrial purification process of biodiesel is carried out by water washing, which generates a high volume of effluents, but this step can be replaced by adsorption with natural solid adsorbents. Therefore, the objective of this study was to design a biodiesel production plant with purification by adsorption using corn starch, including a technical and economic study and using references from the literature. A block diagram, process flow diagram (PFD), mass and energy balances, as well as the sizing of tanks, pumps, and agitators were developed, in addition to a bottleneck study and risk analysis (What If). The mass balance indicated that, for each batch with 4,000 kg of soybean oil, 879.73 kg of methanol and 68 kg of sodium methoxide are required, resulting in 4,100.53 kg of biodiesel and 185.6 kg of glycerin as a byproduct. The Gantt diagram identified decantation as the main bottleneck of the process, with a duration of 5 hours. The estimate of fixed costs indicated a required investment of US\$ 630,500.00, and the estimate of variable costs indicated an approximate value of US\$ 4,957.10 per batch, resulting in a unit cost of US\$ 1.06 per liter of biodiesel produced.

Keywords: biodiesel; adsorption; corn starch; production sizing; industrial project.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
2	OBJETIVOS	9
2.1	OBJETIVO GERAL	9
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	9
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
3.1	CONTEXTO ENERGÉTICO MUNDIAL E BRASILEIRO	11
3.2	BIODIESEL	12
3.3	POTENCIAL ECONÔMICO DO BIODIESEL	13
3.4	PROCESSO DE PRODUÇÃO DO BIODIESEL	15
3.5	ADSORÇÃO	17
4	MATERIAIS E MÉTODOS	18
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	19
5.1	DESCRIPTIVO DO PROCESSO	19
5.2	DIAGRAMA DE BLOCOS	19
5.3	FLUXOGRAMA DO PROCESSO (PFD)	20
5.4	BALANÇO DE MASSA	21
5.5	BALANÇO DE ENERGIA	26
5.5.1	Balanço de energia para o aquecimento dos reagentes	26
5.5.2	Determinação da massa de vapor	27
5.6	DIMENSIONAMENTO DOS EQUIPAMENTOS	27
5.6.1	Dimensionamento dos Tanques	27
5.6.1.1	Tanque de armazenamento de óleo de soja	27
5.6.1.2	Tanque de armazenamento de metanol	28
5.6.1.3	Tanque com agitação para transesterificação	28
5.6.1.4	Decantador	31
5.6.1.5	Tanque intermediário de biodiesel pós-decantação	32
5.6.1.6	Tanque com agitação para adsorção	32
5.6.1.7	Resultado dos dimensionamentos	33
5.6.2	Dimensionamento das bombas	33
5.7	ESTIMATIVA DE CUSTO	36
5.7.1	Custos fixos	36
5.7.2	Custos variáveis	38

5.8	ESTUDO DE GARGALO.....	39
5.9	ANÁLISE DE RISCOS (WHAT IF?).....	41
6	CONCLUSÃO	43
7	REFERÊNCIAS.....	44

1 INTRODUÇÃO

As fontes de energia não renováveis, como combustíveis fósseis e nucleares, são aquelas cuja regeneração natural é muito demorada, podendo ser consideradas um recurso findável. Enquanto as fontes renováveis, como o sol, os ventos, a água e a biomassa, são consideradas não esgotáveis por estarem disponíveis imediatamente na natureza por um longo período (Goldemberg; Lucon, 2007).

A matriz energética mundial é composta majoritariamente por fontes de energia não renováveis. Em 2020, 80% da energia consumida no mundo foi proveniente de combustíveis fósseis (International Energy Agency, 2022). Além da finitude das reservas, o uso de combustíveis fósseis causa inúmeros impactos ambientais, como a agravação do efeito estufa pela liberação de gases tóxicos, o que torna cada vez mais urgente a busca por fontes de energia mais sustentáveis e limpas (Santos; Borschiver; Souza, 2014).

O biodiesel se destaca entre os biocombustíveis capazes de substituir o óleo diesel, muito utilizado no setor de transporte, como uma alternativa biodegradável e com baixa emissão de poluentes e gases de efeito estufa (Duarte *et al.*, 2022). Dados da Revisão Estatística Mundial de Energia (BP, 2021), mostram que o consumo de biodiesel no mundo cresceu 132% entre 2010 e 2020. No mesmo período, o consumo brasileiro deste combustível teve um aumento de 171% (BP, 2021). O aumento no consumo de biodiesel no país está diretamente relacionado à obrigatoriedade da adição de um percentual desse biocombustível no diesel comercial, de modo que, em 2024, o Brasil atingiu um novo recorde com a produção de 9 bilhões de litros de biodiesel (Brasil, 2025).

A produção de biodiesel pode ser feita de diversas maneiras, por processos como o craqueamento, a esterificação e a transesterificação, sendo o último o mais utilizado. A transesterificação é uma reação química entre um óleo (vegetal ou animal) com um álcool de cadeia curta (etanol ou metanol), acelerada por um catalisador (básico ou ácido). Essa reação tem como subproduto a glicerina (Costa; Oliveira, 2006).

De acordo com as especificações da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, 2021), o glicerol livre ou glicerina livre no biodiesel deve estar limitado a 0,02% massa para que não prejudique a integridade do combustível.

Portanto, antes que o biodiesel possa ser utilizado, deve passar por uma etapa de purificação. O processo mais comum é a decantação, em que a densidade do glicerol o separa, seguida pela lavagem com água, utilizando 3 gramas de água por grama de óleo. Apesar de ser barata e eficiente, essa lavagem é lenta e gera um alto volume de efluente, sendo interessante buscar soluções alternativas (Cavallari, 2012).

Outra forma de purificar o biodiesel é através da adsorção. Os adsorventes são elementos que possuem forte afinidade a compostos polares. Após sua adição à mistura de biodiesel e glicerina, deve ser feita uma filtração para reter o adsorvente com glicerol adsorvido, obtendo-se um filtrado de biodiesel com baixa concentração de impurezas (Cavallari, 2012).

O uso de adsorventes naturais é uma alternativa para a lavagem com água, diminuindo drasticamente o volume de efluentes gerados na etapa de purificação. Além disso, por ser um processo realizado a frio, também evita a degradação do biodiesel por aumento excessivo de temperatura. O amido de milho, presente abundantemente no país devido ao grande cultivo desse cereal, é um dos compostos que podem ser usados como adsorvente com resultados satisfatórios no tratamento do biodiesel (Gomes, 2015).

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver um projeto de uma planta de produção de biodiesel com a etapa de purificação por adsorção com amido de milho.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Descrever o processo de produção e tratamento do biodiesel com purificação por adsorção;
- Construir fluxogramas detalhando as etapas e correntes do processo;
- Realizar os balanços de massa e energia;
- Dimensionar os equipamentos;
- Estimar os custos fixos e variáveis para aplicação do processo em escala industrial;

- Estudar o gargalo do processo;
- Analisar possíveis riscos.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 CONTEXTO ENERGÉTICO MUNDIAL E BRASILEIRO

As fontes de energia podem ser classificadas como renováveis ou não renováveis. As não renováveis são aquelas que, para serem repostas na natureza, demandam um longo período de tempo e condições geológicas específicas, como carvão mineral, petróleo e gás natural, formados pelo acúmulo de matéria orgânica no subsolo terrestre ao longo de milhões de anos, e as nucleares, provenientes de elementos presentes na crosta terrestre capazes de gerar energia por fissão nuclear. Já as fontes renováveis são aquelas disponíveis imediatamente na natureza, como os potenciais hidráulicos, eólicos e biomassa (Goldemberg; Lucon, 2007).

De acordo com a Agência Internacional de Energia (International Energy Agency, 2023), a matriz energética mundial em 2020 foi composta majoritariamente por fontes não renováveis (80% do total). Os valores e percentuais representados por fonte de energia nesse período estão disponíveis na Tabela 1.

Tabela 1 - Matriz energética mundial no ano de 2020

Fonte	Óleo	Carvão	Gás Natural	Biomassa	Nuclear	Hidráulica	Outros
Total (TJ)	172.286.149	156.636.851	138.434.468	57.513.247	29.195.371	15.627.281	14.830.185
Percentual	29,47%	26,80%	23,68%	9,84%	4,99%	2,67%	2,54%

Fonte: International Energy Agency (2023).

No Brasil, embora ainda haja um grande consumo de energia proveniente de fontes não renováveis, é possível notar uma contribuição mais expressiva das fontes renováveis em relação à média global. Os dados referentes à matriz energética do país estão disponíveis na Tabela 2 (International Energy Agency, 2023).

Tabela 2 - Matriz energética brasileira no ano de 2020

Fonte	Óleo	Biomassa	Hidráulica	Gás Natural	Carvão	Outros	Nuclear
Total (TJ)	4.134.734	4.044.054	1.426.778	1.258.436	587.272	288.187	153.301
Percentual	34,77%	34,00%	12,00%	10,58%	4,94%	2,42%	1,29%

Fonte: International Energy Agency (2023).

Essa alta exploração de combustíveis fósseis traz consigo várias consequências ambientais, que vão desde impactos locais, como a poluição urbana

gerando problemas respiratórios na população, passando por problemas regionais, com chuvas ácidas causadas pelos gases gerados na combustão dos combustíveis, até o nível global, com as mudanças climáticas causadas pela emissão de gases que agravam o efeito estufa. As energias renováveis são uma alternativa durável e sustentável para substituir esses combustíveis. Elas são praticamente inesgotáveis, emitem pouco carbono e menos poluentes locais, além de gerarem mais empregos por unidade de energia (Goldemberg; Lucon, 2007).

3.2 BIODIESEL

Por definição, o biodiesel é um combustível biodegradável obtido a partir de fontes renováveis capaz de substituir o diesel de petróleo. Para essa substituição em motores ciclo diesel, pode ser usado puro ou misturado em diferentes proporções, sendo a nomenclatura BX (em que X é o percentual de biodiesel na mistura) a usual para definir a composição do combustível (Costa; Oliveira, 2006).

Sua obtenção é comumente feita por um processo químico denominado transesterificação. Nesse processo, os triglicerídeos reagem com um álcool primário, gerando o éster e a glicerina. O éster passará a ser denominado biodiesel e poderá ser comercializado quando passar por processos de purificação e se adequar às especificações da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (Brasil, 2020), podendo ser destinado à comercialização e aplicação.

Esse combustível é biodegradável na água e solo, degradando quatro vezes mais rápido que o diesel de petróleo (Demirbas, 2008). Além disso, o biocombustível emite 78% menos dióxido de carbono e possui viscosidade, densidade, teor de enxofre, ponto de inflamação e quantidade de aromáticos mais vantajosos que o diesel comum (Atadashi; Aroua; Aziz, 2010) Outras vantagens do biodiesel são o aumento da lubricidade e melhoria no processo de combustão e diminuição do potencial de oxidação (Demirbas, 2009).

As especificações definidas pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (2024) com os padrões que devem ser cumpridos para que o biodiesel possa ser consumido no Brasil podem ser vistas na Tabela 3.

Tabela 3 - Especificação do Biodiesel

CARACTERÍSTICA	UNIDADE	LIMITE	MÉTODO		
			ABNT NBR	ASTM D	EN/ISO
Aspecto	-	-1	-	-	-
Massa específica a 20°C	kg/m ³	850 a 900	7148 14065	1298 4052	EN ISO 3675 EN ISO 12185
Viscosidade cinemática a 40°C	mm ² /s	3,0 a 5,0	10441	445 7042	EN ISO 3104
Teor de água, máx.	mg/kg	200,0 (2)	-	6304	EN ISO 12937
Teste de filtração por imersão a frio (TFIF), máx.	s	anotar	-	7501	-
Ponto de fulgor, mín. (3)	°C	100	14598	93	EN ISO 3679
Teor de éster, mín.	% massa	96,5	15764	-	EN 14103
Cinzas sulfatadas, máx. (4)	% massa	0,02	6294	874	EN ISO 3987
Enxofre total, máx.	mg/kg	10	15867	5453	EN ISO 20846 EN ISO 20884
Sódio + Potássio, máx.	mg/kg	2,5	15553	-	EN 14538
Cálcio + Magnésio, máx.	mg/kg	2,5	15553	-	EN 14538
Fósforo, máx. (5)	mg/kg	3	15553	-	EN 16294
Corrosividade ao cobre, 3h a 50°C, máx. (4)	-	1	14359	130	EN ISO 2160
Número de cetano (4)	-	Anotar	-	613 6890 7668 8183	EN ISO 5165 EN 15195 EN 16715 EN 17155
Ponto de entupimento de filtro a frio (PEFF), máx.	°C	-6	14747	6371	EN 116
Índice de acidez, máx.	mg KOH/g	0,5	14448	664	EN 14104
Glicerol livre, máx. (7)	% massa	0,02	15908	6584	EN 14105
Glicerol total, máx. (7)	% massa	0,2	15908	6584	EN 14105
Monoacilglicerol, máx. (7)	% massa	0,5	15908	6584	EN 14105
Diacilglicerol, máx. (7)	% massa	0,2	15908	6584	EN 14105
Triacilglicerol, máx. (7)	% massa	0,2	15908	6584	EN 14105
Contaminação total, máx.	mg/kg	24	15995	-	EN 12662 (8)
Metanol e/ou Etanol, máx. (3)	% massa	0,2	15343	-	EN 14110
Estabilidade à oxidação a 110°C, mín. (9)	h	13	-	-	EN 14112 EN 15751

Fonte: ANP (2024).

3.3 POTENCIAL ECONÔMICO DO BIODIESEL

Dados do Ministério de Minas e Energia (Brasil, 2024) mostram que o Brasil já é o terceiro maior produtor de biodiesel no mundo. Essa produção impacta na renda de mais de 300 mil agricultores familiares, que produzem anualmente cerca de R\$9 bilhões em matérias-primas. A cadeia produtiva da soja, principal matéria-prima do

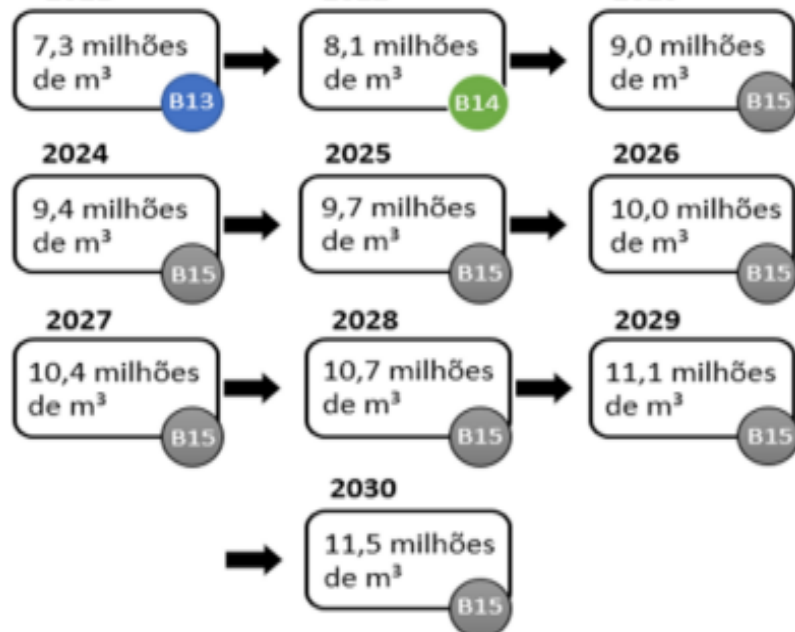
biodiesel no país, e do próprio biocombustível emprega mais de 2 milhões de pessoas, valor que tende a aumentar com a expansão do setor.

Segundo a ANP (2020), poderia ser feita voluntariamente a adição de 2% de biodiesel ao diesel fóssil de 2005 a 2007. A partir de janeiro de 2008 esse acréscimo tornou-se obrigatório em todo o Brasil. O percentual foi continuamente ampliado ao longo dos anos com um cronograma para atingir 15% em 2026, aumentando a necessidade de produção do biodiesel.

De acordo com a Revisão Estatística Mundial de Energia (BP, 2021), o Brasil consumiu 95 mil barris de óleo equivalente por dia em 2020, o que corresponde a aproximadamente 5,5 bilhões de litros no ano.

O Plano decenal de expansão de energia 2030 (MME, 2021) estima que a capacidade de produção de biodiesel no Brasil chegue a 11,5 milhões de metros cúbicos em 2030. Essa projeção é feita com base em um cronograma (Figura 1) estabelecido com a expectativa de crescimento nos investimentos tecnológicos e financeiros na área e tendo em vista o cronograma de aumento da proporção de biodiesel no diesel nos próximos anos.

Figura 1 - Projeção nacional para produção de biodiesel até 2030



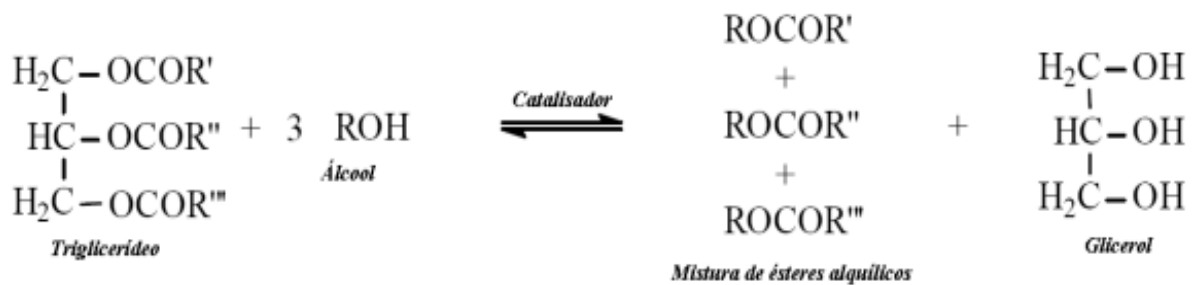
Fonte: Duarte *et al.* (2022).

3.4 PROCESSO DE PRODUÇÃO DO BIODIESEL

O método mais comum de produção de biodiesel é através da reação de transesterificação de triglicerídeos com álcoois primários na presença de um catalisador produzindo ésteres alquílicos de ácidos graxos e glicerol como subproduto. O éster deverá ser purificado e tratado até se adequar às especificações de qualidade, quando poderá ser comercializado (ANP, 2020).

A reação de transesterificação está representada na Figura 2.

Figura 2 - Reação de transesterificação de triglicerídeos, sendo R a representação da cadeia carbônica



Fonte: Simonetti (2011).

A mistura de ésteres alquílicos gerada é o que se denomina como biodiesel. A proporção dessa reação é de 3 mols de álcool para 1 mol de triglicerídeo. Para aumentar o rendimento da reação, pode-se aumentar a proporção de álcool, o que desloca o equilíbrio favoravelmente à formação dos produtos (Schuchardt.; Sercheli; Vargas, 1998). Em condições favoráveis, a transesterificação de glicerídeos com alto conteúdo de ácidos graxos tem rendimento de no mínimo 90% (Camargos, 2005).

Após o fim da reação e remoção do álcool em excesso, tem-se um meio com biodiesel e glicerol. O glicerol decanta no fundo do reator devido à sua densidade elevada, possibilitando sua separação (Leung; Wu; Leung, 2010). No entanto, apesar da tendência do glicerol e outras impurezas a decantarem, esse processo não é suficiente para garantir que o produto esteja de acordo com as especificações para consumo. A Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, 2021), determinou o limite de glicerol livre no biodiesel a 0,02% massa. Isso porque a glicerina livre está relacionada ao aumento da emissão de aldeídos, além de provocar problemas no armazenamento do biodiesel pela sua interação com outros compostos polares (ANP, 2021).

Portanto, antes que o biodiesel possa ser consumido, deve ser feita uma etapa de purificação, que pode ser por via úmida ou seca. A purificação por via úmida é a mais utilizada industrialmente, mas, apesar de sua eficácia, demanda um grande volume de água (3 gramas de água por grama de óleo) e, conseqüentemente, gera um alto volume de efluentes para tratamento (Cavallari, 2012). Outro método que pode ser utilizado é a purificação por adsorção, que elimina a necessidade do uso de água, não gera efluentes líquidos e, em alguns casos, pode ter o adsorvente reaproveitado (Faccini, 2008).

Os álcoois mais utilizados para a produção do biodiesel são o etanol e o metanol (Costa; Oliveira, 2006). O metanol se destaca devido ao baixo custo e a suas propriedades físico-químicas (Schuchardt; Sercheli; Vargas, 1998). Apesar de ser mais tóxico e volátil, o metanol se consolidou como o álcool mais utilizado na produção do biodiesel graças à sua maior reatividade e baixo consumo e tempo de reação em relação ao etanol. Além disso, não só o metanol é mais barato, como também consome menos energia e opera com equipamentos menores (Parente, 2003).

Triglicerídeos provenientes de diversas matérias-primas podem ser utilizados na produção do biodiesel, sendo classificados em primeira geração (óleos comestíveis, como o de soja e o de girassol), segunda geração (não comestíveis e resíduos, como óleo de mamona e óleos e gorduras de origem animal) e terceira geração (outras fontes, como alguns tipos de alga) (Mofijur *et al.*, 2021).

Conforme dados fornecidos pela ANP (2021), o óleo de soja representou em 2020 71,21% da matéria-prima utilizada na produção de biodiesel no Brasil, o que equivale a um consumo de 4.621.448 m³ de óleo. Isso se deve principalmente à escala em que a soja é produzida no país, sendo mais que suficiente para suprir a demanda do segmento alimentar (Freitas, 2004).

O tipo de catálise para essa reação pode ser ácido ou alcalino, sendo o alcalino mais utilizado por seu maior rendimento e menor tempo de reação (Arzani *et al.*, 2013). Estudos de Cartoni (2009), comparando a eficiência de catalisadores alcalinos, mostram que o uso do metilato de sódio (CH₃NaO) traz um rendimento mássico médio de 99,38%, de modo que possui uma boa eficiência, menores custos e menor geração de efluentes se comparado ao hidróxido de potássio (KOH).

3.5 ADSORÇÃO

A adsorção é um processo em que um ou mais componentes de uma fase fluida (adsorvato) são transferidos para uma fase sólida em sua superfície (adsorvente). É considerado um fenômeno físico-químico muito importante para a indústria, sendo um dos métodos mais eficientes a adsorção em fase líquida, visto que sólidos específicos possuem a característica de concentrar em sua superfície substâncias presentes na fase líquida (Gomes, 2015).

A impregnação da substância no adsorvente é favorecida quando existem forças atrativas entre o sólido e as moléculas do fluido (Ruthven, 1997). Para que a adsorção seja eficiente, deve-se escolher um adsorvente com alta seletividade e capacidade adsortiva, sendo ideal que o componente predominante na mistura não seja facilmente adsorvido (Cavallari, 2012).

A purificação por adsorção é mais rápida e gera uma quantidade menor de efluentes, por não utilizar água, sendo assim mais aceita pela indústria. Existem vários adsorventes que podem ser utilizados especificamente para o biodiesel como alguns silicatos de magnésio, entretanto a novos estudos com a utilização de adsorventes orgânicos (Faccini, 2008).

Estudos de Gomes (2015) mostram que adsorventes naturais são capazes de remover a glicerina residual do biodiesel, gerando um produto que atende aos padrões de acidez e alcalinidade, além de consumir menos energia e gerar menos efluentes que a purificação por lavagem com água. O amido de milho foi um dos adsorventes testados por Gomes (2015) que teve como produto resultados satisfatórios, dentro das normas da ANP.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Com base nos conceitos apresentados na revisão bibliográfica, foi feito ao longo deste trabalho o desenvolvimento de um projeto conceitual para a produção de biodiesel em escala industrial, seguindo as normas técnicas e regulamentações aplicáveis.

Está sendo aplicado o método de escalonamento do processo de produção de biodiesel a fim de obter-se uma proposta para sua implantação em escala industrial e de modo que o produto atenda às especificações definidas pela ANP para sua comercialização e uso.

O escalonamento consiste em uma divisão do processo em diferentes níveis (Laboratório, Banco, Piloto, Semi-Industrial e Industrial) em que o volume de produção é aumentado gradualmente. Não existe uma segmentação clara entre essas etapas, de modo que, em casos nos quais o processo é suficientemente conhecido, ele pode passar da escala de laboratório, para a escala piloto e para a escala industrial (Castelanos, 2000).

Deste modo, para o processo descrito neste trabalho, considera-se que os valores utilizados para os balanços e dimensionamentos de processo já foram testados em escala de laboratório e, teoricamente, podem ser adaptados para o processo industrial.

O tratamento da torta resultante da filtração e o processo de recuperação do catalisador não serão endereçados neste projeto.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, são descritas as etapas do projeto proposto acompanhadas da representação dos itens do projeto proposto de modo a evidenciar as etapas do processo, a sequência lógica da produção, bem como a apresentação dos demais itens referentes que complementam a proposta.

5.1 DESCRITIVO DO PROCESSO

Para esse processo, considerando a disponibilidade da soja e do milho no Brasil, as vantagens do uso do metanol e de catalisadores básicos e a eficiência dos adsorventes sólidos, optou-se pelo uso do óleo de soja e metanol como reagentes, Metilato de Sódio (CH_3NaO) como catalisador e amido de milho como adsorvente.

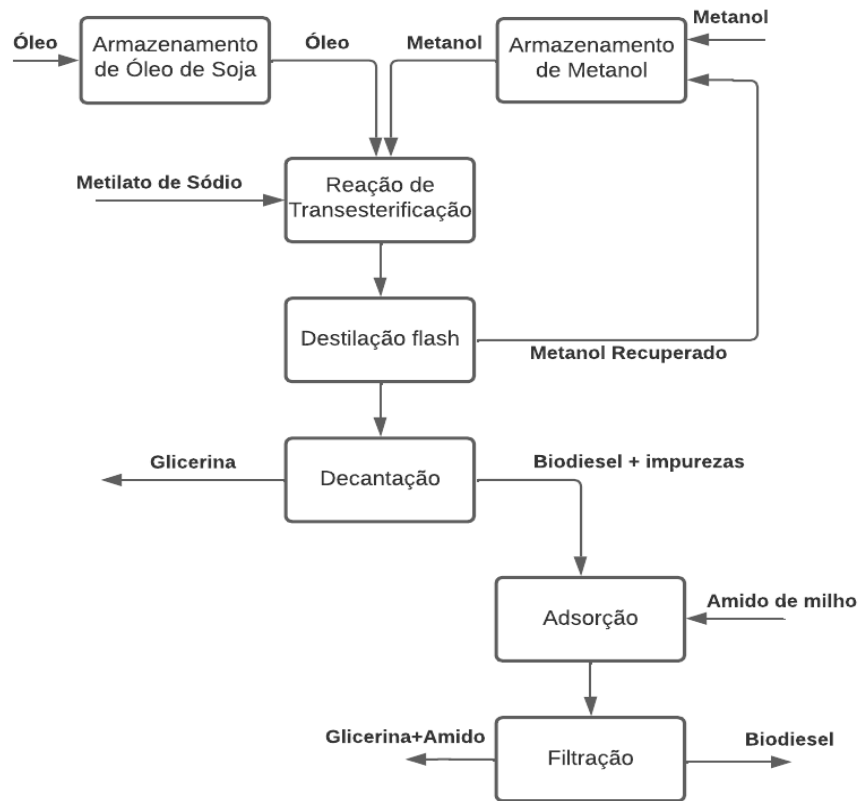
O processo inicia com a chegada do óleo de soja. Em seguida, são adicionados ao reator o álcool e o catalisador. Para a adição dos sólidos no reator, será utilizado um sistema de rosca-sem-fim. O álcool utilizado é o metanol na proporção de 6 mols por mol de óleo de soja para deslocar o equilíbrio favoravelmente à formação de produto. O catalisador adicionado é o CH_3NaO , sendo a razão m/m do catalisador e do óleo 1,7% m/m. A reação ocorre em batelada por 60 minutos sob agitação constante e o meio é mantido entre 50 e 52°C para otimizar a reação (Cartoni, 2009).

Após a transesterificação, é feita a remoção do álcool por um destilador flash (Ocamoto, 2018). Após a remoção do metanol, a mistura deve decantar por 5 horas para separação da glicerina (Cartoni, 2009). Em seguida, o biodiesel segue para a etapa de adsorção, em que é adicionado o amido de milho no reator. A proporção de amido de milho utilizada é 10% m/v e a adsorção é feita sob uma agitação de 150 rpm. Com o fim dessa etapa, o biodiesel segue para a filtração, na qual é separado o produto final da torta contendo o amido com os resíduos de glicerol, catalisador e outras impurezas (Gomes, 2015). O filtro utilizado será do tipo prensa, muito utilizado na indústria química por sua flexibilidade e baixo custo (Foust, 2012).

5.2 DIAGRAMA DE BLOCOS

A Figura 3 mostra, em forma de diagrama de blocos, uma representação das etapas e correntes do processo.

Figura 3 - Diagrama de blocos do processo de produção de biodiesel

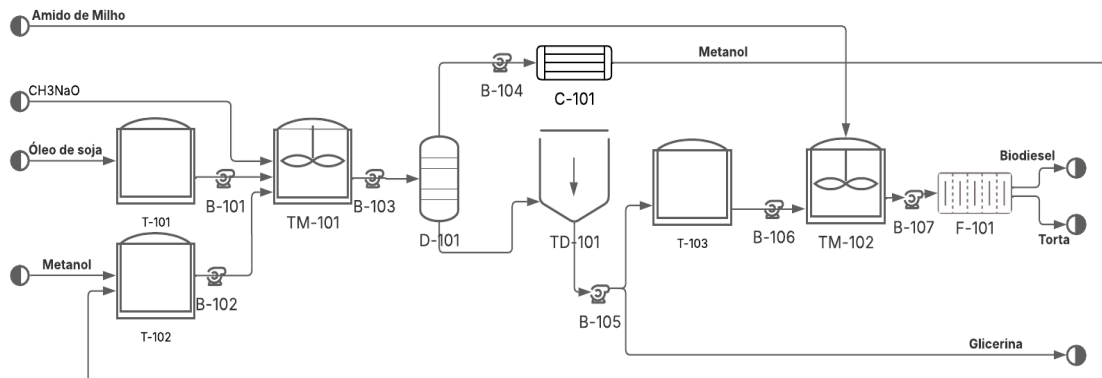


Fonte: Autoria própria (2025).

5.3 FLUXOGRAMA DO PROCESSO (PFD)

Na Figura 4, pode-se observar o diagrama de processos (PFD) em que estão mapeados todos os processos, equipamentos e correntes de entrada e saída.

Figura 4 - Diagrama de processo de produção de biodiesel



Fonte: Autoria própria (2025).

A legenda dos elementos presentes no PFD está representada na Tabela 4.

Tabela 4 - Legenda do PFD

B-101	Bomba centrífuga	D-101	Destilador
B-102	Bomba centrífuga	F-101	Filtro Prensa
B-103	Bomba centrífuga	T-101	Tanque de armazenamento
B-104	Bomba centrífuga	T-102	Tanque de armazenamento
B-105	Bomba centrífuga	T-103	Tanque de armazenamento
B-106	Bomba centrífuga	TD-101	Tanque de decantação
B-107	Bomba centrífuga	TM-101	Tanque de mistura
C-101	Condensador	TM-102	Tanque de mistura

Fonte: Autoria própria (2025).

5.4 BALANÇO DE MASSA

Para realizar o balanço de massa do processo, inicialmente determinou-se a quantidade de óleo a ser utilizada. A partir desse valor, foi calculada a quantidade de reagentes necessária para cada etapa. De acordo com Cartoni (2009), utilizou-se a proporção de 6 mols de metanol para cada mol de óleo. Além disso, o catalisador (metilato de sódio) foi adicionado na proporção de 1,7% em massa, com base na massa do óleo.

Os reagentes são bombeados dos tanques de armazenamento para o reator agitado, onde ocorre a reação de transesterificação. Segundo Ocamoto *et al.* (2018), a conversão da reação é de 98,9%, sendo conduzida a uma temperatura de 45 °C e sob baixa agitação (150 RPM), a fim de evitar a reação de saponificação.

A tabela a seguir apresenta os dados de massa molar e massa específica dos reagentes e produtos formados na produção de biodiesel. As informações de massa específica e massa molar dos reagentes, catalisador e subproduto foram retirados da Ficha de Segurança de Produtos Químicos (CETESB, [2025?]). Para o biodiesel, considerou-se a massa específica média entre os limites permitidos pela ANP (850 a 900 kg/m³) e a massa molar disponível no trabalho de Hungria (2022). Os dados utilizados para o cálculo do balanço de massa estão disponíveis na Tabela 5.

Tabela 5 - Dados de massa específica e massa molar dos reagentes, produtos e catalisador da reação

Composto	Massa específica (kg/m³)	Massa molar (kg/mol)
Óleo de soja	922	0,87332
Metanol	792	0,03204
CH ₃ NaO	>1.000	0,05403
Biodiesel	875	0,2922
Glicerina	1261	0,09209

Fonte: Autoria própria (2023).

Utilizando as Equações 1 e 2, foi possível determinar a massa e o volume dos reagentes e produtos envolvidos na reação de produção de biodiesel:

$$n = m * MM \quad (1)$$

Em que:

- n : Número de mols [mol];
- m : Massa [kg];
- MM : Massa molar [kg/mol].

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2)$$

Em que:

- ρ : Massa específica [kg/m³];
- m : Massa [kg];
- V : Volume [m³].

Com base na proporção adotada para a reação e nas massas molares de cada reagente, conclui-se que para cada 0,873 kg de óleo de soja (um mol) são necessários aproximadamente 0,192 kg de metanol (seis mols) e 0,0148 kg de catalisador (1,7% da massa de óleo de soja). Para este processo, foi considerada que a massa de catalisador permanece constante e um pequeno percentual de liberação de água do óleo e contato do catalisador com a umidade do ar causando saponificação.

As tabelas a seguir apresentam os dados de entrada e saída do balanço de massa.

Tabela 6 - Balanço de massa da reação de transesterificação

Composto	Entrada (kg)	Entrada % (massa)	Saída (kg)	Saída % (massa)
Óleo de soja	4.000	80,85%	43,56	0,88%
Metanol	879,73	17,78%	531,7	10,75%
Metilato de Sódio	68	1,37%	68	1,37%
Biodiesel	-	-	4.100,53	82,88%
Glicerina	-	-	185,6	3,75%
Sabão	-	-	17,31	0,35%
Água	-	-	1,02	0,02%
Total	4.947,73	100,00%	4.947,72	100,00%

Fonte: Autoria própria (2025).

O próximo processo consiste na retirada do metanol presente nos produtos da reação de transesterificação utilizando um destilador flash. Para fins deste trabalho, considerou-se a remoção total do metanol do produto. A saída do metanol ocorre pela parte superior do equipamento e será reutilizada no processo, enquanto o produto segue pela parte inferior.

Tabela 7 - Balanço de massa da destilação de metanol

Composto	Entrada (kg)	Entrada % (massa)	Saída 1 (kg)	Saída 1 % (massa)	Saída 2 (kg)	Saída 2 % (massa)
Óleo de soja	43,56	0,88%	-	-	43,56	0,99%
Metanol	531,7	10,75%	531,7	100,00%	-	-
Metilato de Sódio	68	1,37%	-	-	68	1,54%
Biodiesel	4.100,53	82,88%	-	-	4.100,53	92,86%
Glicerina	185,6	3,75%	-	-	185,6	4,20%
Sabão	17,31	0,35%	-	-	17,31	0,39%
Água	1,02	0,02%	-	-	1,02	0,02%
Total	4.947,72	100,00%	531,7	100,00%	4.416,02	100,00%

Fonte: Autoria própria (2025).

Logo após a saída do destilador flash, a solução segue para o decantador, onde ocorre a separação da fase leve (biodiesel) da fase pesada (composta por glicerina, sabão e catalisador). De acordo com Ocamoto *et al.* (2018), aproximadamente 1% da glicerina e 38,6% do catalisador permanecem na fase leve, enquanto o restante segue com a fase pesada. O balanço desta etapa pode ser encontrado na Tabela 8.

Tabela 8 - Balanço de massa da decantação

Composto	Entrada (kg)	Entrada % (massa)	Saída 1 (kg)	Saída 1 % (massa)	Saída 2 (kg)	Saída 2 % (massa)
Óleo de soja	43,56	0,99%	-	-	43,56	1,04%
Metilato de Sódio	68	1,54%	41,75	17,20%	26,25	0,63%
Biodiesel	4.100,53	92,86%	-	-	4.100,53	98,26%
Glicerina	185,6	4,20%	183,74	75,68%	1,86	0,04%
Sabão	17,31	0,39%	17,31	7,13%	-	-
Água	1,02	0,02%	-	-	1,02	0,02%
Total	4.416,02	100,00%	242,8	100,00%	4.173,22	100,00%

Fonte: Autoria própria (2025).

Na etapa de adsorção, adicionou-se 10% (m/v) de amido de milho a um tanque agitado a 150 RPM para a purificação do biodiesel. De acordo com Gomes (2015), o amido atua como adsorvente das impurezas presentes. O balanço de massa desta operação pode ser encontrado na Tabela 9.

Tabela 9 - Balanço de massa da adsorção

Composto	Entrada (kg)	Entrada % (massa)	Saída (kg)	Saída % (massa)
Óleo de soja	43,56	0,95%	43,56	0,95%
Amido de Milho	410,05	8,95%	410,05	8,95%
Metilato de Sódio	26,25	0,57%	26,25	0,57%
Biodiesel	4.100,53	89,47%	4.100,53	89,47%
Glicerina	1,86	0,04%	1,86	0,04%
Água	1,02	0,02%	1,02	0,02%
Total	4.583,27	100,00%	4.583,27	100,00%

Fonte: Autoria própria (2025).

As correntes de entrada e saída são iguais, pois a separação dos elementos será feita na filtragem. Por fim, na etapa de filtração, o biodiesel é separado do resíduo sólido (torta) contendo os contaminantes retidos pelo amido de milho. De acordo com Gomes (2015), o amido adsorve cerca de 95% da glicerina e 70,8% da água presentes no biodiesel. O balanço de massa final é apresentado na Tabela 10.

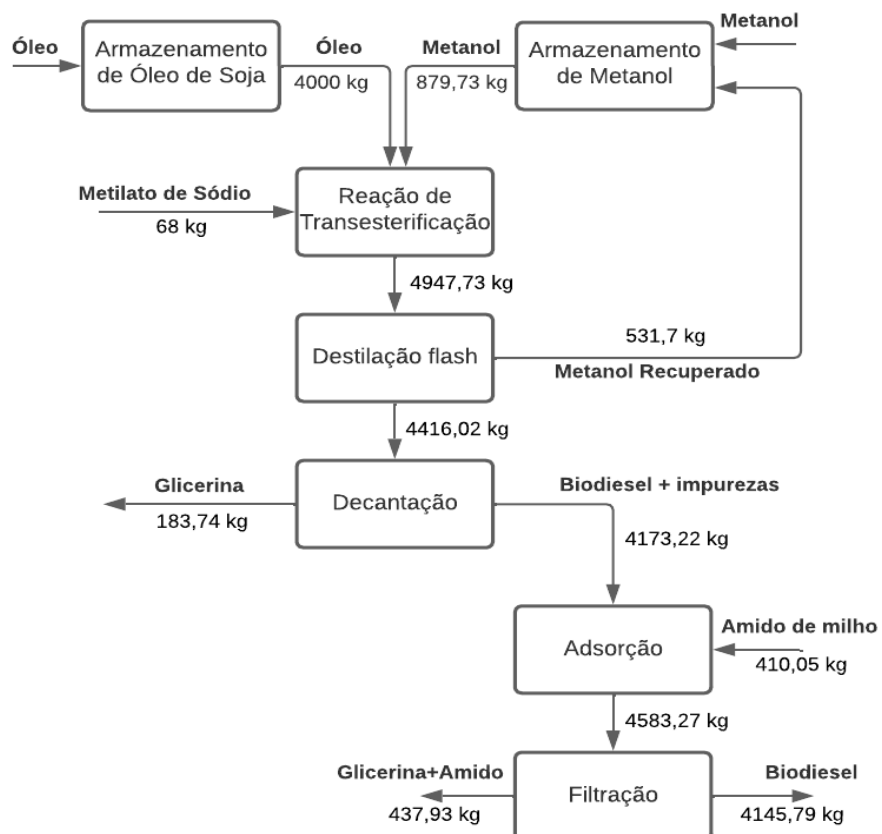
Tabela 10 - Balanço de massa da filtração

Composto	Entrada (kg)	Entrada % (massa)	Saída 1 (kg)	Saída 1 % (massa)	Saída 2 (kg)	Saída 2 % (massa)
Óleo de soja	43,56	0,95%	43,56	1,05%	-	-
Amido de Milho	410,05	8,95%	-	-	410,5	93,74%
Metilato de Sódio	26,25	0,57%	1,31	0,03%	24,94	5,69%
Biodiesel	4.100,53	89,47%	4.100,53	98,91%	-	-
Glicerina	1,86	0,04%	0,09	0,00%	1,76	0,40%
Água	1,02	0,02%	0,30	0,01%	0,73	0,17%
Total	4.583,27	100,00%	4.145,79	100,00%	437,93	100,00%

Fonte: Autoria própria (2025).

Considerando o balanço de massa, o diagrama de blocos foi atualizado com o valor em kg de cada corrente para uma melhor visualização de como elas se relacionam com o processo.

Figura 5 - Diagrama de blocos do processo de produção de biodiesel



Fonte: Autoria própria (2025).

5.5 BALANÇO DE ENERGIA

5.5.1 Balanço de energia para o aquecimento dos reagentes

Para que a reação de transesterificação ocorra de forma mais eficiente, é necessário que os reagentes sejam previamente aquecidos até 45 °C. Para fins de cálculo, neste trabalho foram desconsideradas tanto as perdas de calor para o meio ambiente quanto a energia liberada pela própria reação, considerando-se apenas o calor necessário para elevar a temperatura dos reagentes e a temperatura inicial dos fluidos como 25° C.

A energia térmica requerida para o aquecimento de cada substância foi calculada por meio da Equação 3.

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (3)$$

Em que:

- Q : Energia requerida [J];
- m : Massa [kg];
- c_p : Calor específico [J/kg°C];
- ΔT : Variação de temperatura [°C].

Para os cálculos, foram adotados os seguintes valores de calor específico:

- Metanol: 2.613,5 J/kg·°C;
- Óleo de soja: 1.963 J/kg·°C.

A partir destes dados e das equações apresentadas, determina-se que a energia necessária para aquecer separadamente o metanol é 46 MJ e para o óleo 157 MJ.

A energia total requerida para o aquecimento da mistura foi obtida pela soma desses dois valores. Assim, a energia necessária para o aquecimento dos reagentes é aproximadamente 203 MJ.

5.5.2 Determinação da massa de vapor

Para o aquecimento dos reagentes envolvidos na reação de transesterificação, é necessário utilizar uma corrente de utilidade. Para este processo, adotou-se vapor de água a 180 °C e 10 atm.

Assim, a massa de vapor necessária para essa mudança de temperatura pode ser determinada com base na equação de transferência de calor (Equação 4).

$$Q = m \cdot \Delta H \quad (4)$$

Em que:

- Q : Energia transferida [J];
- m : Massa de vapor [kg];
- ΔH : Variação de entalpia do vapor.

A quantidade de energia necessária para elevar a temperatura dos reagentes de 25 °C para 45 °C foi previamente calculada como 203 MJ.

Portanto, a massa de vapor requerida para o processo é de aproximadamente 73 kg.

5.6 DIMENSIONAMENTO DOS EQUIPAMENTOS

5.6.1 Dimensionamento dos tanques

5.6.1.1 Tanque de armazenamento de óleo de soja

Para o dimensionamento do tanque de armazenamento do óleo de soja, será considerado o volume necessário para a produção semanal de biodiesel. Considerando que a produção funcionará continuamente sete dias por semana e que, por dia, há a produção de aproximadamente quatro bateladas usando 4.000 kg de óleo de soja cada, o tanque deve ter capacidade de armazenar 112.000 kg de óleo de soja. Sabendo que a massa específica desse fluido é de 922 kg/m³, infere-se que o volume a ser ocupado por ele equivale a 121,48 m³. Com uma margem de segurança de aproximadamente 20%, o tanque será dimensionado para suportar 145,77 m³.

O volume de um tanque cilíndrico pode ser determinado pela Equação 5:

$$V = \pi * r^2 * h \quad (5)$$

Em que:

- V: volume [m³];
- r: raio [m];
- h: altura [m].

Considerando o volume calculado e que a altura do tanque é o dobro do raio ($h = 2 * r$), o raio do tanque pode ser encontrado pela relação da Equação 6:

$$r = \sqrt[3]{\frac{V}{2 * \pi}} \quad (6)$$

Assim, o raio e a altura do tanque serão, respectivamente 2,85 m e 5,70 m.

5.6.1.2 Tanque de armazenamento de metanol

O dimensionamento do tanque de armazenamento do metanol será feito de forma similar ao de óleo de soja. Considerando o volume 1,11 m³, conforme calculado no balanço de massa para uma batelada, tem-se o gasto semanal de metanol como 31,10 m³. Assim, adicionando uma margem de segurança de 20 %, o tanque será dimensionado para suportar 37,32 m³.

Utilizando as relações das Equações 5 e 6, o raio e a altura do tanque serão, respectivamente, 1,81 m e 3,62 m.

5.6.1.3 Tanque com agitação para transesterificação

O tanque de transesterificação recebe as correntes dos reagentes e do catalisador. Considerando que o volume do catalisador e do agitador são comportados dentro da margem de segurança, será adotado o volume com 20% de segurança de óleo de soja e metanol para produção de uma batelada. Assim, o volume do tanque deve ser, no mínimo, de 6,54 m³.

Utilizando as relações das Equações 5 e 6, o raio e a altura do tanque serão, respectivamente 1,01 m e 2,02 m.

O agitador utilizado no processo é do tipo Turbina Rushton de 6 pás sem chicanas. Seguindo as proporções genéricas de um sistema de agitação, a relação entre o diâmetro e a largura das pás do agitador é dada por:

$$\frac{W}{Da} = \frac{1}{5} \quad (7)$$

Em que:

- W: Largura da pá [m];
- Da: Diâmetro da pá [m].

Considerando que o diâmetro das pás equivale a 1/3 do diâmetro do tanque, o diâmetro das pás será igual a 0,67 m. Consequentemente, a largura das pás será igual a 0,13 m.

A viscosidade dinâmica de um fluido é dada pela multiplicação entre a viscosidade cinemática e a densidade do fluido. Assim:

$$\mu = \rho * \nu \quad (8)$$

Em que:

- μ : viscosidade dinâmica [kg/(m*s)];
- ρ : massa específica [kg/m³];
- ν : viscosidade cinemática [m²/s].

Portanto, considerando que as características físico-químicas da mistura se assemelham às do biodiesel, podem-se considerar os valores de viscosidade cinemática e densidade médios especificados pela ANP, que são, respectivamente, 4 mm²/s e 875 kg/m³, obtendo o valor de 0,0035 kg/m*s para a viscosidade dinâmica.

O cálculo do número de Reynolds é feito pela equação 9:

$$Re = \frac{N * Da^2 * \rho}{\mu} \quad (9)$$

Em que:

- Re: número de Reynolds;
- N: rotação (rps);

- D_a : diâmetro da pá [m];
- ρ : massa específica [kg/m³];
- μ : viscosidade dinâmica [kg/(m*s)].

Considerando a viscosidade dinâmica previamente calculada de 0,0035 kg/m*s, o diâmetro da pá do agitador de 0,67 m e a massa específica do biodiesel de 875 kg/m³, a rotação do sistema foi definida utilizando a **velocidade de ponta** (*tip speed*) como critério de seleção, conforme a Equação 10. Esse parâmetro relaciona a velocidade periférica do impelidor com o nível de cisalhamento e a intensidade de mistura no tanque, sendo amplamente empregado para padronização e comparação de processos de agitação (Barradas *et al.*, 2013). Para este estudo, adotou-se uma rotação de $N=2,5 \text{ s}^{-1}$ (150 rpm), resultando em uma velocidade de ponta de aproximadamente $v_{tip}=5,26 \text{ m/s}$, valor típico para sistemas operando em regime turbulento com líquidos Newtonianos. Substituindo esses parâmetros na equação do número de Reynolds, obtém-se Re igual a $2,8 * 10^5$.

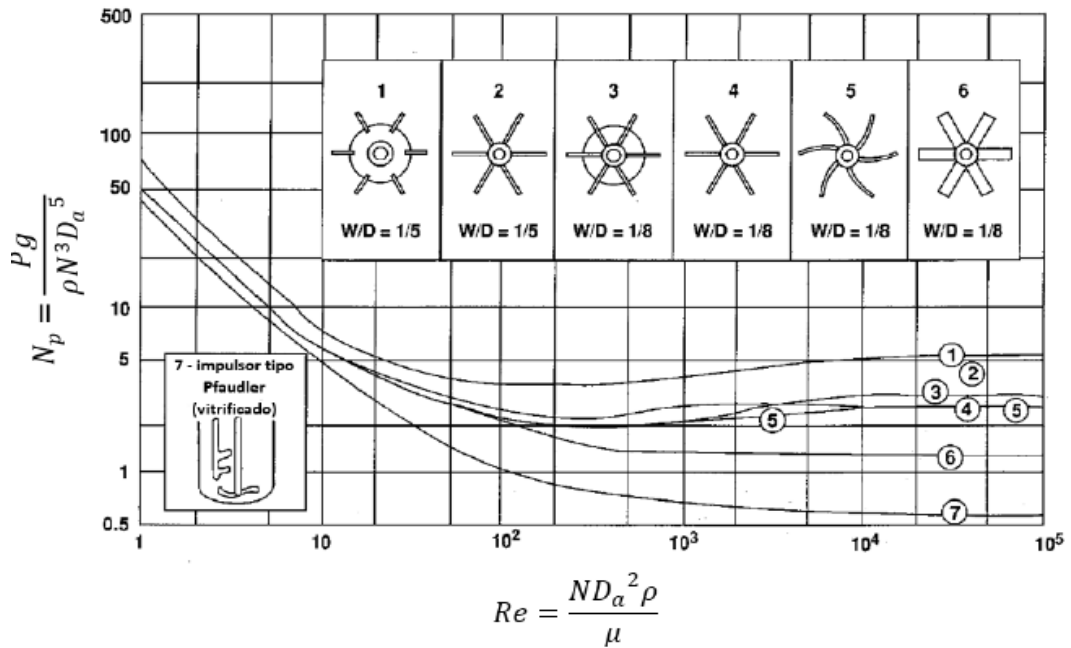
$$v_{ponta} = \pi DN \quad (10)$$

Em que:

- v_{ponta} : velocidade na ponta;
- π : Pi
- D : diâmetro da pá [m];
- N : rotação (rps);

Utilizando o número de Reynolds, é possível encontrar a potência das pás do agitador utilizando o diagrama da Figura 6.

Figura 6 - Diagrama de Número de Potência por Número de Reynolds para diferentes tipos de impulsores



Fonte: Thomas (2019).

Assim, considerando que o impelidor é do tipo 2, o Número de Potência do sistema será aproximadamente igual a 5,1. Desta forma, é possível calcular a Potência Requerida pela Equação 11.

$$N_p = \frac{P_g}{\rho * N^3 * D_a^5} \quad (11)$$

Em que:

- N_p : número de potência;
- P_g : potência requerida
- ρ : massa específica [kg/m^3];
- N : rotação (rps);
- D_a : diâmetro da pá [m].

Portanto, a potência requerida pelo agitador é 9,4 kW.

5.6.1.4 Decantador

O decantador possui uma abertura no fundo para facilitar o processo de remoção da glicerina. O dimensionamento do tanque será feito de forma similar aos

tanques de armazenamento de óleo de soja e metanol. Considerando o volume de biodiesel e glicerina que chega até essa etapa ($4,83 \text{ m}^3$) e uma margem de segurança de 20% a fim de englobar as impurezas e o volume do agitador, será projetado um decantador para um tanque com volume de $5,8 \text{ m}^3$.

Utilizando as relações das Equações 5 e 6, o raio e a altura do tanque serão, respectivamente, 0,97 m e 1,95 m.

5.6.1.5 Tanque Intermediário de biodiesel pós-decantação

Este tanque é um tanque intermediário entre a etapa de decantação e a etapa de adsorção. O dimensionamento do tanque será feito de forma similar aos tanques de armazenamento de óleo de soja e metanol. Considerando o volume de biodiesel que chega até essa etapa ($4,69 \text{ m}^3$) e uma margem de segurança de 20% a fim de englobar as impurezas e o volume do agitador. Assim, será projetado um decantador para um tanque com volume de $5,62 \text{ m}^3$.

Utilizando as relações das Equações 5 e 6, o raio e a altura do tanque serão, respectivamente, 0,96 m e 1,93 m.

5.6.1.6 Tanque com agitação para adsorção

A potência do agitador do tanque de adsorção será calculada de forma similar à do tanque de transesterificação. Para o cálculo do volume do tanque, será considerado o volume de biodiesel que chega até essa etapa ($4,69 \text{ m}^3$) e uma margem de segurança de 20% a fim de englobar as impurezas e o volume do agitador. Assim, será projetado um agitador para um tanque com volume de $5,62 \text{ m}^3$.

Utilizando as relações das Equações 5 e 6, o raio e a altura do tanque serão, respectivamente, 0,96 m e 1,93 m. Deste modo, o diâmetro da pá equivale a 0,64 m e a largura a 0,128 m.

Considerando que esta etapa precisa de uma agitação de 150 rpm (2,5 rps), o número de Reynolds equivale a $2 * 10^5$.

Assim, a potência requerida pelo agitador é 7,5 kW.

5.6.1.7 Resultado dos dimensionamentos

Para fins de comparação entre os tamanhos dos tanques, organizaram-se os dados relativos a suas dimensões na Tabela 11.

Tabela 11 – Dimensões dos Tanques

Tanque	Volume (m ³)	Raio (m)	Altura (m)
Armazenamento do óleo de soja	145,77	2,85	5,70
Armazenamento do metanol	37,32	1,81	3,62
Transesterificação	6,54	1,01	2,02
Decantação	5,80	0,97	1,95
Intermediário	5,62	0,96	1,93
Adsorção	5,62	0,96	1,93

Fonte: Autoria própria (2025).

5.6.2 Dimensionamento das bombas

Para o dimensionamento da bomba com maior potência utilizada neste trabalho, tomou-se como base o volume total do tanque de transesterificação. Inicialmente, foi estabelecido o tempo de 300 segundos como referência para o bombeamento completo do conteúdo do tanque. A partir desse tempo e da massa total do fluido, é possível calcular a vazão mássica e a vazão volumétrica por meio das Equações 12 e 13.

$$m_i = \frac{m}{t} \quad (12)$$

Em que:

- m_i : Vazão mássica [kg/s];
- m : Massa [kg];
- t : Tempo [s].

$$Q = \frac{V}{t} \quad (13)$$

Em que:

- Q : Vazão volumétrica [m³/s];

- V : Volume [m^3];
- t : Tempo [s].

Assim, a vazão mássica do processo é de 16,5 kg/s, e a vazão volumétrica, determinada é de 0,019 m^3/s .

Na sequência, estimando uma velocidade de 2,5 m/s,, foram realizados os cálculos do diâmetro econômico utilizando a Equação 14.

$$D_e = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot v}} \quad (14)$$

Em que:

- D_e : Diâmetro econômico da tubulação [m];
- Q : Vazão volumétrica [m^3/s];
- v : Velocidade do fluido [m/s].

Em seguida, tendo determinado o diâmetro econômico de 0,098 m e sabendo a massa específica ($875 \text{ kg}/\text{m}^3$), velocidade (2,5 m/s) e viscosidade dinâmica ($0,035 \text{ kg}/\text{m} \cdot \text{s}$) do fluido, é possível determinar o número de Reynolds utilizando a Equação 15.

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} \quad (15)$$

Em que:

- Re : Número de Reynolds;
- ρ : Massa específica do fluido [kg/m^3];
- v : Velocidade do fluido [m/s];
- D : Diâmetro [m];
- μ : Viscosidade dinâmica [$\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$].

O valor obtido para o número de Reynolds é 6123,55.

Com base no valor de Reynolds e assumindo o escoamento do fluido como Newtoniano, utilizou-se o diagrama de Moody para a determinação do fator de atrito. A partir desse fator, calcularam-se o comprimento equivalente das tubulações, a perda

de carga e, por fim, a potência requerida pela bomba, de acordo com as Equações 16, 17 e 18, respectivamente:

$$H_f = \frac{f \cdot L \cdot v^2}{2 \cdot D_e \cdot G} \quad (16)$$

Em que:

- H_f : Perda de carga contínua [m];
- f : Fator de atrito;
- L : Comprimento da tubulação [m];
- v : Velocidade do fluido [m/s];
- D_e : Diâmetro da tubulação [m];
- G : Aceleração da gravidade [m/s²].

$$H_T = H_f + H_z \quad (17)$$

Em que:

- H_T : Perda de carga total [m];
- H_f : Perda de carga contínua [m];
- H_z : Perda de carga localizada [m].

$$P_B = H_T \cdot G \cdot m \quad (18)$$

Em que:

- P_B : Potência da bomba [W];
- H_T : Perda de carga total [m];
- G : Aceleração da gravidade [m/s²];
- m : Vazão mássica [kg/s].

Assim, a potência requerida para o funcionamento desta bomba é de aproximadamente 488 W.

Para o dimensionamento da bomba instalada após o destilador, aplicou-se a mesma metodologia utilizada no cálculo anterior. O valor obtido para a potência requerida foi de 430 W.

Na Tabela 12 são apresentados os dados consolidados das duas bombas dimensionadas ao longo deste trabalho.

Tabela 12 – Dimensionamento das Bombas

Propriedade	Bomba de menor potência	Bomba de maior potência
Massa (kg)	4947,73	4173,22
Densidade do fluido (kg/m ³)	875	875
Volume (m ³)	5,60	4,75
Tempo (s)	300	300
Vazão volumétrica (m ³ /s)	0,019	0,016
Vazão mássica (kg/s)	16,492	13,911
Diâmetro econômico (m)	0,098	0,090
Reynolds	6123,55	5623,88
Fator E/D	0,00046	0,00050
Potência da bomba (W)	488	430

Fonte: Autoria própria (2025).

5.7 ESTIMATIVA DE CUSTO

Os custos para a instalação de uma fábrica de biodiesel incluem valores fixos e variáveis. Os custos fixos incluem o valor do próprio terreno, dos equipamentos e da instalação. Os custos variáveis são os custos com matérias-primas e utilidades.

Foi adotado o valor de referência de custos em dólar americano (US\$), unidade em que estão descritas as referências encontradas.

5.7.1 Custos fixos

O cálculo dos custos fixos dos equipamentos dimensionados foi feito com base em Loh, Lyons e White (2001). Foi adicionada uma margem de segurança de 30% sobre cada valor a fim de minimizar o impacto de flutuações de preço e custos com instalações. O restante dos valores (equipamentos não dimensionados, tubulações e galpão) foi estimado utilizando páginas de domínio público.

Tabela 13 - Custos fixos

Custo	Valor (US\$)
Compra de Galpão	150.000,00
Bomba centrífuga	6.500,00
Bomba centrífuga	6.500,00
Bomba centrífuga	6.500,00
Bomba centrífuga	6.500,00
Bomba centrífuga	6.500,00
Destilador	260.000,00
Condensador	26.000,00
Filtro Prensa	39.000,00
Tanque de armazenamento (óleo)	65.000,00
Tanque de armazenamento (metanol)	130.000,00
Tanque	26.000,00
Tanque	26.000,00
Tanque	26.000,00
Tanque de decantação	26.000,00
Agitador (transesterificação)	70.000,00
Agitador (adsorção)	13.000,00
Tubulação	15.000,00
Total	904.500,00

Fonte: Autoria própria (2025).

Para o cálculo da depreciação, o Anexo III da Instrução Normativa RFB nº 1.700 (Brasil, 2017) estabelece, de forma geral, que máquinas e equipamentos industriais sejam depreciados ao longo de dez anos. Entretanto, a Nota 2 do referido anexo dispõe que: “As máquinas, equipamentos e instalações industriais constantes deste anexo, utilizadas na indústria química, serão depreciadas em 5 anos à taxa de 20%” (Brasil, 2017), aplicando-se, portanto, essa exceção para o presente estudo.

Tabela 14 - Depreciação dos custos fixos

Custo	Valor (US\$)	Tempo (anos)	Depreciação (%)	Valor depreciado por ano (US\$)	Valor depreciado por mês (US\$)
Bomba centrífuga	6.500,00	5	20%	1.300,00	108,33
Bomba centrífuga	6.500,00	5	20%	1.300,00	108,33
Bomba centrífuga	6.500,00	5	20%	1.300,00	108,33
Bomba centrífuga	6.500,00	5	20%	1.300,00	108,33
Bomba centrífuga	6.500,00	5	20%	1.300,00	108,33
Destilador	260.000,00	5	20%	52.000,00	4.333,33
Condensador	26.000,00	5	20%	5.200,00	433,33
Filtro Prensa	39.000,00	5	20%	7.800,00	650,00
Tanque de armazenamento (óleo)	65.000,00	5	20%	13.000,00	1.083,33
Tanque de armazenamento (metanol)	130.000,00	5	20%	26.000,00	2.166,67
Tanque	26.000,00	5	20%	5.200,00	433,33
Tanque	26.000,00	5	20%	5.200,00	433,33
Tanque	26.000,00	5	20%	5.200,00	433,33
Tanque de decantação	26.000,00	5	20%	5.200,00	433,33
Agitador (transesterificação)	70.000,00	5	20%	14.000,00	1.166,67
Agitador (adsorção)	13.000,00	5	20%	2.600,00	216,67
Tubulação	15.000,00	5	20%	3.000,00	250,00
Total	754.500,00	5	20%	150.900,00	12.575,00

Fonte: Autoria própria (2025).

5.7.2 Custos variáveis

Para o cálculo de custos variáveis, foram consideradas as seguintes cotações para as matérias-primas e utilidades com dados aproximados conforme páginas de domínio público:

- Óleo de soja: US\$ 1,05/kg;
- Metanol: US\$ 0,82/kg;
- Metilato de sódio: US\$ 0,98/kg;

- Amido de milho: US\$ 0,42/kg;
- Vapor de água: US\$ 0,42/kg.

Utilizando esses valores, é possível calcular o preço para produzir uma batelada de biodiesel.

Tabela 15 - Custos variáveis para produção de biodiesel

Matéria-prima/utilidade	Quantidade (kg)	Preço (US\$/kg)	Preço (US\$/batelada)
Óleo de soja	4.000	1,05	4.200,00
Metanol	879,73	0,65	571,82
Metilato de soja	68	0,60	40,80
Amido de milho	410,05	0,35	143,52
Vapor de água	95,96	0,01	0,9596
Total	-	-	4.957,10

Fonte: Autoria própria (2025).

Assim, o custo de matéria prima para produção de um litro de biodiesel equivale a US\$ 1,06. Considerando que o preço do biodiesel chegou a R\$ 6,38 em dezembro de 2024 (ANP, 2025) e a cotação do real em relação ao dólar, o valor está dentro do esperado, mas não possui uma margem de lucro considerável. Essa margem pode ser aumentada com compra de reagentes em maior escala, o que diminui o custo de matéria-prima e, conseqüentemente, do produto final.

5.8 ESTUDO DE GARGALO

O diagrama de Gantt é uma ferramenta que permite o mapeamento do caminho crítico de um processo ao definir tarefas, marcos e duração. Pode ser utilizado para organizar as etapas do processo de forma hierárquica conforme sua importância e custos (Erdmann, 2000). Para o estudo de gargalo, foi elaborada a Tabela 16, contendo os processos necessários para a produção e purificação do biodiesel.

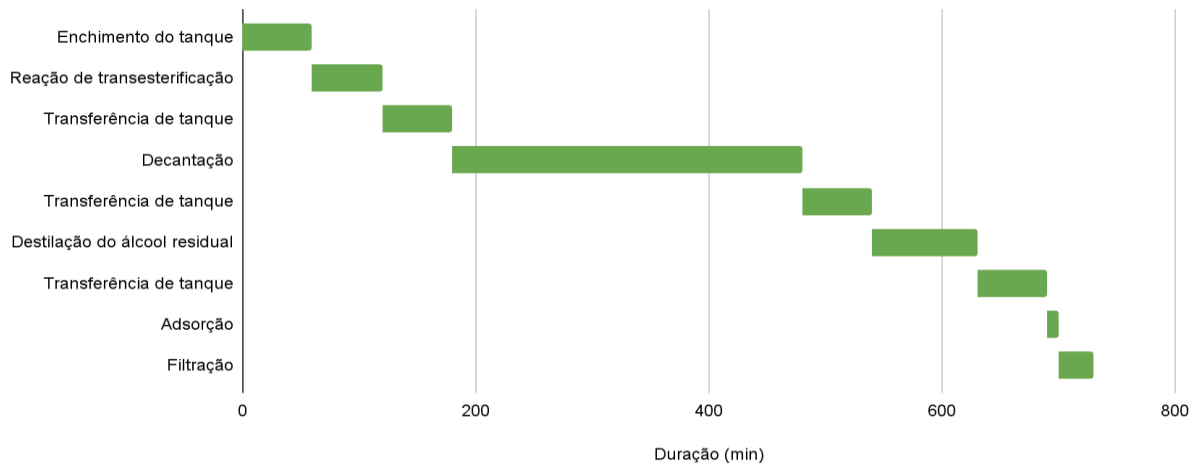
Tabela 16 - Duração das etapas do processo de produção do biodiesel

Processo	Duração (min)
Enchimento do tanque	60
Reação de transesterificação	60
Transferência de tanque	60
Decantação	300
Transferência de tanque	60
Destilação do álcool residual	90
Transferência de tanque	60
Adsorção	10
Filtração	30

Fonte: Autoria própria (2023).

A partir dos dados apresentados, foi construído o Diagrama de Gantt do processo.

Figura 7 - Diagrama de Gantt



Fonte: Autoria própria (2023).

A partir da análise do gráfico, pode-se concluir que o principal gargalo do processo é a etapa de decantação, que dura 5 horas. Isso pode ser otimizado com o uso de tanques paralelos, para que mais de uma batelada de produção possa decantar simultaneamente. No entanto, apesar do aumento de produção, isso acarreta em mais custos com equipamentos (tanques, válvulas, tubulação, etc.), que devem ser levados em conta antes de uma possível modificação da planta.

5.9 ANÁLISE DE RISCOS (WHAT IF?)

Existem várias técnicas que podem ser utilizadas para identificação de riscos, como por exemplo o What If. O What If é uma técnica de identificação de riscos com o objetivo de prever e evitar prejuízos reduzindo a possibilidade do acontecimento de eventos negativos (Silva, 2012). Assim, seguindo esse método, foram mapeados no Quadro 1 os principais pontos de atenção dentro do processo e formas de prevenir e minimizar riscos.

Quadro 1 - Identificação de riscos

Risco	Controle
Contaminação dos reagentes	Isolamento dos tanques, testes de qualidade na matéria-prima
Reações químicas espontâneas	Isolamento dos tanques, testes de qualidade na matéria-prima
Fogo e explosão dos tanques	Isolamento dos tanques, investimento em sistemas de monitoramento de pressão e temperatura
Mal funcionamento das bombas	Manutenção preventiva, estoque de equipamentos e peças reserva
Mal funcionamento de válvulas	Manutenção preventiva, estoque de equipamentos e peças reserva
Derramamentos	Isolamento dos tanques, manutenção preventiva, investimento em tanques de contenção, treinamento e capacitação dos funcionários para ações emergenciais
Exposição a inalação ou contato	Ventilação do ambiente, uso de EPIs adequados, treinamento dos funcionários
Saponificação do catalisador	Isolamento dos tanques, secagem do óleo de soja
Aumento exagerado da temperatura na reação	Investimento em sistemas de monitoramento de pressão e temperatura
Explosão por aumento da pressão interna no tanque	Investimento em sistemas de monitoramento de pressão e temperatura

Fonte: Autoria própria (2023).

Dessa forma, a aplicação da técnica What If permite identificar de maneira clara os principais riscos envolvidos no processo de produção de biodiesel, bem como as medidas de controle mais adequadas para cada situação, reforçando a importância de ações preventivas, monitoramento contínuo e capacitação da equipe. Assim, a

adoção desses cuidados é essencial para reduzir a probabilidade de falhas, aumentar a segurança do processo e garantir uma operação mais eficiente e confiável.

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como principal objetivo desenvolver um projeto conceitual e básico de produção de biodiesel com a etapa de purificação por adsorção com amido de milho, a fim de apresentar conhecimentos e conceitos adquiridos durante o curso de Engenharia Química.

O diagrama de blocos e o fluxograma do processo mostram as etapas de produção do biodiesel, equipamentos e matérias primas.

Através do balanço de massa, foi determinado que uma batelada precisa de 4.000 kg de óleo de soja, 879,73 kg de metanol e 68 kg de metilato de sódio para gerar 4.100,53 kg de biodiesel, o que gera como subproduto 185,60 kg de glicerina. A partir do balanço de energia, determinou-se a quantidade de calor em cada etapa do processo e o dimensionamento dos equipamentos utilizados.

O valor total estimado para os custos fixos do processo, incluindo compra de equipamentos, galpão e instalação foi US\$ 904.500,00. A depreciação anual do custo dos equipamentos é de US\$150.900,00. O custo variável estimado para produção de um litro de biodiesel, incluindo matérias primas e utilidades, é de US\$1,06.

Utilizando o diagrama de Gantt, concluiu-se que o gargalo do processo está na decantação da glicerina, com duração de 5 horas.

REFERÊNCIAS

ANP. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Análise de Conjuntura - Boletim Trimestral do Mercado de Combustíveis**. Brasília: ANP, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/boletins-anp/boletins/btpvc-1/2025/boletim-trimestral-4.pdf>. Acesso em: 9 dez. 2025.

ANP. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Nota Técnica nº 10/2021/SBQ-CPT-CQC/SBQ/ANP-DF**: especificações nacionais do biodiesel (B100). Brasília, DF: Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2021.

ANP. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Painel Dinâmico de Produtores de Biodiesel 2020**. Brasília: ANP, 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/paineis-dinamicos-da-anp/paineis-e-mapa-dinamicos-de-produtores-de-combustiveis-e-derivados/painel-dinamico-de-produtores-de-biodiesel>. Acesso em: 4 mai. 2025.

ANP. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Resolução ANP nº 920, de 4 de abril de 2023**: estabelece a especificação do biodiesel e as obrigações quanto ao controle da qualidade a serem atendidas pelos agentes econômicos que comercializem o produto em território nacional. Brasília, DF: Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2024.

ARZANI, F. A.; GOMES, M. C. S.; PEREIRA, N. C. Biodiesel: produção por transesterificação etílica do óleo de canola e separação do glicerol por ultrafiltração. **Revista de Saúde, Meio Ambiente e Sustentabilidade**, v. 8, n. 1, 2013.

ATADASHI, I. M.; AROUA, M. K.; AZIZ, A. A. High quality biodiesel and its diesel engine application: a review, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 14, p. 1999–2008, 2010.

BARRADAS, O. P. *et al.* Criteria for bioreactor comparison and operation standardisation during process development for mammalian cell culture. **BMC proceedings**, v. 7, 2013.

BP. **Statistical review of world energy**. 70 ed. London: BP, 2021. Disponível em: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2021-full-report.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2024.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Alexandre Silveira destaca importância de investimentos em biocombustíveis durante evento da Frente Parlamentar do Biodiesel**. Brasília, DF: Ministério de Minas e Energia, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/alexandre-silveira-destaca-importancia-de-investimentos-em-biocobustiveis-durante-evento-da-frente-parlamentar-do-biodiesel>. Acesso em: 13 mai. 2025.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Biodiesel**. Brasília, DF: Ministério de Minas e Energia, 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-e-fornecimento-de-biocombustiveis/biodiesel>. Acesso em: 13 mai. 2025.

BRASIL. Receita Federal do Brasil. **Instrução Normativa RFB nº 1.700, de 14 de março de 2017**. Dispõe sobre o Imposto sobre a Renda das Pessoas Jurídicas (IRPJ) e a Contribuição Social sobre o Lucro Líquido (CSLL). Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 15 mar. 2017.

BRASIL. Secretaria de Comunicação Social. **Programa Nacional de Biodiesel completa 20 anos promovendo transição energética aliada à Lei do Combustível do Futuro**. Brasília, DF: Secretaria de Comunicação Social, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/secom/pt-br/assuntos/noticias/2025/janeiro/programa-nacional-de-biodiesel-completa-20-anos-promovendo-transicao-energetica-aliada-a-lei-do-combustivel-do-futuro>. Acesso em: 1 mai. 2025.

CAMARGOS, R. R. S. **Avaliação da viabilidade de se produzir biodiesel através da transesterificação de óleo de grãos de café defeituosos**. 2005. 105 f. Dissertação (Mestre Engenharia Química) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

CARTONI, C. R. **Avaliação de catalisadores alcalinos na produção de biodiesel metílico derivado do óleo de soja: análise térmica, econômica e ambiental**. 2009. Dissertação (Mestrado em Novos Materiais e Química Fina) - Escola de Engenharia de Lorena, University of São Paulo, Lorena, 2009.

CASTELLANOS, R. A. G. **Principios básicos de escalado**. Matanzas: Editorial Universitaria, Centro de Estudios de Combustión y Energía – CECYEN, 2000. 139 p.

CAVALLARI, P. I. **Avaliação dos processos de purificação do biodiesel por via seca**. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) – Universidade de São Paulo, Lorena, 2012.

CETESB. **Consulta completa – produto**. [2025?]. Disponível em: https://sistemasinter.cetesb.sp.gov.br/produtos/produto_consulta_completa.asp?qualpagina=2&sqlQuery=sp%5FTBPRODIDENTIFICACAO%5Fsel. Acesso em: 7 set. 2025.

COSTA, B. J.; OLIVEIRA, S. M. M. **Dossiê Técnico – Produção de Biodiesel**. SBRT – Serviço Brasileiro de Respostas Técnicas. Paraná: Instituto de Tecnologia do Paraná, 2006. Disponível em: <https://sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/sbrr/Dossies/producao-de-biodiesel,3bb46cb060d32810VgnVCM100000d701210aRCRD>. Acesso em: 3 mai. 2025.

DEMIRBAS, A. **Biodiesel: a realistic fuel alternative for diesel engines**. London: Springer, 2008.

DEMIRBAS, A. Progress and recent trends in biodiesel fuels. **Energy Conversion and Management**. v. 50, n. 1, p. 14–34, 2009.

DUARTE, V. H. *et al.* Biocombustíveis: uma revisão sobre o panorama histórico, produção e aplicações do biodiesel. **Meio Ambiente (Brasil)**, v. 4, n. 2, 31 jul. 2022.

ERDMANN, R. H. **Administração da produção**: planejamento, programação e controle. Florianópolis: Papa Livro, 2000.

FACCINI, C. S. **Uso de adsorventes na purificação de biodiesel de óleo de soja**. 2008. Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

FREITAS, S. M. Biodiesel à base de óleo de soja é a melhor alternativa para o Brasil?. **Informações Econômicas**, São Paulo, v. 34, n.1, jan. 2004.

FOUST, A. S. *et al.* **Princípios das Operações Unitárias**. 2. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2012. 670 p.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. Energias renováveis: um futuro sustentável. **Revista USP**, São Paulo, n. 72, p. 6-15, 2007.

GOMES, M. G. **Purificação de biodiesel utilizando adsorventes naturais**. 2015. 103 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Exatas e da Terra) - Universidade Federal de Uberlândia, 2015.

HUNGRIA, L. H. Biodiesel. *In*: **Capítulo 5: biodiesel**, 2022. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/359083356_Biodiesel. Acesso em: 5 out. 2025.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Energy Statistics Data Browser**. 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser?country=WORLD&fuel=Energy%20supply&indicator=TESbySource>. Acesso em: 3 mai. 2025.

LEUNG, D. Y.; WU, X.; LEUNG, M. K. H. A review on biodiesel production using catalyzed transesterification. **Applied Energy**, v. 87, p.1083-1095, 2010.

LOH, H. P.; LYONS, J.; WHITE, C. W. **Process equipment cost estimation**. 2001. National Energy Technology Lab (NETL), Morgantown, United States, 2001.

MOFIJUR, M. *et al.* Effect of nanocatalysts on the transesterification reaction of first, second and third generation biodiesel sources-a mini-review. **Chemosphere**, v. 270, 2021.

OCAMOTO, A. N. *et al.* **Indústria da produção de biodiesel**. 2018. 195 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Apucarana, 2018.

PARENTE, E. J. S. **Biodiesel**: uma aventura tecnológica num país engraçado. 2003. Disponível em: <http://www.xitizap.com/Livro-Biodiesel.pdf>. Acesso em: 30 out. 2025.

RUTHVEN, D. M. **Encyclopedia of Separation Technology**, 1. ed. New York: John Wiley and Sons, 1997. 1707 p.

SANTOS, S. F.; BORSCHIVER, S.; SOUZA, V. Mapping sustainable structural dimensions for managing the Brazilian biodiesel supply chain. **Journal of Technology Management & Innovation**, v. 9, n. 1, p. 27-43, 2014.

SCHUCHARDT, U.; SERCHELI, R.; VARGAS, R. M. Transesterification of vegetal oils: a review. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v.9, p.199-210, 1998.

SILVA, V. F. **Análise de risco na construção – guia de procedimentos para gestão**. 2012. 127 f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto, Porto, Portugal, 2012.

SIMONETTI, E. A. N. **Óxidos mistos como catalisadores heterogêneos para reações de transesterificação do óleo de soja com etanol e metanol**. Dissertação (Mestrado em Processos Catalíticos e Biocatalíticos) - Universidade de São Paulo, Lorena, 2011.

THOMAS, M. F. **Tempo de mistura e consumo de potência na agitação de líquidos em tanque com impulsor mecânico**. 2019. 61 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Santa Cecília, Santos, 2019.