

FACULDADE OSWALDO CRUZ
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA

GABRIELA SÁPIO CAO
JOÃO GABRIEL DOS SANTOS SOUZA
LAUANY DOS SANTOS SILVA
LEONARDO CASTELETI
WEMILY MOREIRA DE OLIVEIRA

**PROPOSTA DE USINA PILOTO PARA PRODUÇÃO DE BIODIESEL A PARTIR DA
AMÊNDOA DE BABAÇU**

SÃO PAULO
2021

GABRIELA SÁPIO CAO
JOÃO GABRIEL DOS SANTOS SOUZA
LAUANY DOS SANTOS SILVA
LEONARDO CASTELETI
WEMILY MOREIRA DE OLIVEIRA

**PROPOSTA DE USINA PILOTO PARA PRODUÇÃO DE BIODIESEL A PARTIR DA
AMÊNDOA DE BABAÇU**

Trabalho de conclusão de curso, apresentada ao curso da Faculdades Oswaldo Cruz como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química, sob orientação do Prof. Cleber Wanderlei Liria.

São Paulo

2021

Cao, Gabriela Sápio.

C236p Proposta de usina piloto para produção de biodiesel a partir da amêndoa de babaçu. / Gabriela Sápio Cao. – São Paulo – SP: FFCL-FOC, 2021.
53f.

Normas do Grupo Educacional Oswaldo Cruz, como parte dos requisitos exigidos para a conclusão do Curso de Engenharia Química.

Inclui Referências.

Orientadores: Prof.º Dr.º Cleber Wanderlei Liria.

1. Biocombustível 2. Biodiesel de babaçu 3. Transesterificação I. Casteleti, Leonardo II. Oliveira, Wemily Moreira de III. Silva, Lauany dos Santos IV. Souza, João Gabriel dos Santos V. Liria, Cleber Wanderlei (Orientador) VI. Título.

660 CDD



**GABRIELA SÁPIO CAO
JOÃO GABRIEL DOS SANTOS SOUZA
LAUANY DOS SANTOS SILVA
LEONARDO CASTELETI
WEMILY MOREIRA DE OLIVEIRA**

**PROPOSTA DE USINA PILOTO PARA PRODUÇÃO DE BIODIESEL A PARTIR
DA AMÊNDOA DE BABAÇU**

Monografia apresentada às Faculdades
Oswaldo Cruz como parte dos requisitos
exigidos para a conclusão do Curso de
Engenharia Química.

Trabalho aprovado em 08 de setembro de 2021.

Profa. Ma. Maria Cristina Ricci Queiroz
Faculdades Oswaldo Cruz
(Banca Examinadora)

Profa. Dra. Cristina Chiyoda Koshima
Faculdades Oswaldo Cruz
(Banca Examinadora)

Prof. Dr. Cleber Wanderlei Liria
Faculdades Oswaldo Cruz
(Orientador)

Prof. Dr. Luís Fernando Pereira
Faculdades Oswaldo Cruz
(Docente de Trabalho de Conclusão de Curso)

**São Paulo
2021**

“The best way to predict the future is to create it.”

Abraham Lincoln

RESUMO

Mediante a degradação do meio ambiente e as necessidades do setor energético, a busca por alternativas de energias renováveis tem crescido, onde os biocombustíveis têm sido alvo de interesse do mercado, e sua variedade de matérias primas chama bastante atenção. O babaçu é uma palmeira nativa brasileira, pertencente à família botânica Arecaceae, em que apresenta grande potencial para a produção de biodiesel devido suas propriedades físico-químicas, boa estabilidade térmica e oxidativa e através das amêndoas deste fruto é feita a extração do óleo, processo de cultura extrativista realizada pelas mulheres conhecidas como quebradeiras de coco. O biodiesel é definido como uma mistura de ésteres monoalquílicos de ácidos graxos, podendo ser obtido através da reação de transesterificação, onde seus reagentes são o óleo vegetal com um álcool de cadeia curta, e um catalisador. Portanto, este trabalho tem como objetivo a apresentação de uma proposta de usina de produção de biodiesel e seus processos, possíveis melhorias e reaproveitamento, assim como os benefícios do uso do babaçu como matéria-prima.

Palavras-chave: Biocombustível. Biodiesel de babaçu. Transesterificação.

ABSTRACT

Due to the degradation of the environment and the increasing demand of the energy sector, the search for renewable energy sources has increased. One of the main alternatives in the market are the biofuels, given the possibility to produce them with varied raw materials. The babaçu is a native Brazilian palm tree, it belongs to the family of the Arecaceae, which shows a great potential for the production of biofuels due to its physical and chemical properties and good thermal and oxidative stability. The oil in these trees is extracted from its fruit almonds, a process of extractive culture performed by women usually known as coconut breakers. The biodiesel is defined as a mixture of fatty acids monoalkyl esters, which can be obtained through a transesterification reaction, where the reagents are: vegetable oil with a short-chain alcohol and a catalyser. Therefore, this work will present a proposal for a biofuel production plant and its processes, possible improvements and reuse, as well as the benefits of the use of babaçu as raw material.

Keywords: Biofuel. Babaçu Biodiesel. Transesterification.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	– Mata dos Cocais localizada no Nordeste.	12
Figura 2	– Cortes: Transversal (a) e longitudinal (b). Componentes: Epicarpo (a), Mesocarpo (b), Endocarpo (c) e Amêndoa (d).	14
Figura 3	– Fluxograma de aplicação dos diversos componentes do babaçu.	15
Figura 4	– Fluxograma do processo de extração do óleo da amêndoa de babaçu.	19
Figura 5	– Reação de Transesterificação.	20
Figura 6	– Fluxograma do processo de produção de Biodiesel.	22
Figura 7	– Processo de produção do biodiesel a partir da extração.	22
Figura 8	– Etapas reacionais envolvidas na transesterificação de triglicerídeos.	23
Figura 9	– Rendimento de biodiesel metílico de babaçu em função do Tempo de reação sob catálise alcalina	29
Figura 10	– Fluxograma de blocos completo do processo de produção.	31
Figura 11	– Fluxograma de processo com identificação das correntes.	33
Figura 12	– Ânions carboxilatos presentes nos triglicerídeos.	35
Figura 13	– Fluxograma de processo e valores das correntes.	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Composição química do óleo de babaçu.	24
Tabela 2	– Vantagens e desvantagens do uso do Metanol.	25
Tabela 3	– Vantagens e desvantagens do uso do Etanol.	26
Tabela 4	– Percentuais de ácidos graxos e suas massas molares no óleo de babaçu . .	34
Tabela 5	– Tabela de balanço 1	36
Tabela 6	– Tabela de balanço 2	38

LISTA DE SÍMBOLOS

$Comp_{CH_3OH}^{bot}$	Composição de metanol no fundo da coluna
$Comp_{CH_3OH}^{top}$	Composição de metanol no topo da coluna
$[CH_3OH]$	Concentração de metanol
$\bar{\rho}_{biodiesel}$	Densidade média de biodiesel
η	Rendimento
$MM_{ác. graxo}$	Massa molar do ácido graxo
$MM_{C_3H_8O_3}$	Massa molar de glicerol
$\overline{MM}_{ác. graxo}$	Molar molar média do ácido graxo
$\overline{MM}_{ânion\ carboxila}$	Massa molar média do ânion de carboxila
$\overline{MM}_{biodiesel}$	Massa molar média de biodiesel
$\overline{MM}_{radical\ metil}$	Massa molar média do radical metil
\dot{m}	Vazão mássica
\dot{m}_{H_2O}	Vazão mássica de água
$\dot{m}_{H_2O}^{emul}$	Vazão mássica de água emulsionada no biodiesel
$\dot{m}_{H_2O}^{evap}$	Vazão mássica de água evaporada no secador
$\dot{m}_{H_2O}^{lav}$	Vazão mássica de água de lavagem
$\dot{m}_{H_2O}^{n.emul}$	Vazão mássica de água não emulsionada no biodiesel
$\dot{m}_{biodiesel}$	Vazão mássica de biodiesel
\dot{m}_{KOH}	Vazão mássica do catalisador
$\dot{m}_{F.Oleosa}$	Vazão mássica da fase oleosa

$\dot{m}_{C_3H_8O_3}$	Vazão mássica de glicerol
\dot{m}_{CH_3OH}	Vazão mássica de metanol
$\dot{m}_{CH_3OH}^{bot}$	Vazão mássica de metanol perdido no fundo da coluna
$\dot{m}_{CH_3OH}^{fs}$	Vazão mássica de metanol retida na fase superior
$\dot{m}_{CH_3OH}^{R1}$	Vazão mássica de metanol na saída do reator 1
$\dot{m}_{CH_3OH}^{R2}$	Vazão mássica de metanol na saída do reator 2
$\dot{m}_{CH_3OH}^{rec}$	Vazão mássica de metanol recuperado
$\dot{m}_{CH_3OH}^{sep}$	Vazão mássica de metanol separada
$\dot{m}_{CH_3OH}^{top}$	Vazão mássica de metanol recuperado no topo da coluna
$\dot{m}_{CH_3OH}^{tot}$	Vazão mássica total de metanol
$\dot{n}_{biodiesel}$	Vazão molar de biodiesel
$\dot{m}_{\acute{o}leo}$	Vazão mássica de óleo
$\dot{m}_{\acute{o}leo}^{nc}$	Vazão mássica de óleo não convertido
$\dot{n}_{F.Oleosa}$	Vazão molar da fase oleosa
$\dot{n}_{C_3H_8O_3}$	Vazão molar de glicerol
$\dot{n}_{\acute{o}leo}$	Vazão molar de óleo
$\dot{n}_{\acute{o}leo}^{nc}$	Vazão molar de óleo não convertido
\dot{m}_{prod}^{bot}	Vazão mássica do produto de fundo
\dot{m}_{prod}^{top}	Vazão mássica do produto de topo
\dot{V}_{H_2O}	Vazão volumétrica total de água
$\dot{V}_{F.Oleosa}$	Vazão volumétrica da fase oleosa

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVO E METODOLOGIA	13
3	CARACTERÍSTICAS DO FRUTO E EXTRAÇÃO DO ÓLEO	14
3.1	FINALIDADES E USO DO FRUTO	14
3.2	EXTRAÇÃO DO ÓLEO DAS AMÊNDOAS DE BABAÇU	15
3.3	EXTRAÇÃO POR SOLVENTE	16
3.4	EXTRAÇÃO POR PRENSA FRIA	17
3.5	EXTRAÇÃO ARTESANAL	18
4	PRODUÇÃO DO BIODIESEL	20
4.1	DESCRIÇÃO DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE BIODIESEL	20
5	REAÇÃO DE TRANSESTERIFICAÇÃO	23
5.1	FATORES QUE INTERFEREM NA REAÇÃO DE TRANSESTERIFICAÇÃO	24
5.1.1	Triglicerídios	24
5.1.2	Tipos de álcool	24
5.1.3	Relação Molar óleo:álcool	26
5.2	TIPOS DE CATÁLISES	26
5.2.1	Catálise Alcalina Homogênea	27
5.2.2	Catálise Ácida Homogênea	27
5.2.3	Catálise Enzimática	28
5.3	TEMPO E TEMPERATURA DE REAÇÃO	28
6	PROJETO DE USINA PILOTO	30
6.1	PROCESSO DESDE A EXTRAÇÃO ATÉ O PRODUTO FINAL	30
6.2	CONDIÇÕES ADOTADAS PARA A PRODUÇÃO DE BIODIESEL	32
6.2.1	Balanco de massa	32
7	RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
8	CONSIDERAÇÕES FINAIS	47
	REFERÊNCIAS	49

1 INTRODUÇÃO

Devido aos efeitos da mudança climática em nosso planeta, a conscientização tornou-se necessária a fim de encontrar formas mais eficientes e sustentáveis no desenvolvimento sem que comprometa a capacidade das próximas gerações. No setor energético não é diferente, e a inconstância dos valores do petróleo fez com que os países buscassem alternativas de combustíveis renováveis com baixo impacto ambiental, buscando substituir a utilização de combustíveis fósseis por biocombustíveis. No Brasil, cerca de 35% da energia gerada é proveniente de petróleo e derivados, e outras não renováveis (MME, 2020). O óleo diesel é um dos derivados de petróleo mais consumidos no Brasil, sendo empregado no transporte terrestre, transporte ferroviário, transporte aquático, na alimentação de equipamentos industriais e em termoelétricas para a geração de energia. Sendo assim, a substituição dos combustíveis fósseis pelo uso do biodiesel, seria uma solução eficaz pois além de ser uma fonte renovável, apresenta excelente potencial econômico e social devido à abundância em certas regiões do país.

Segundo a ANP - Agência Nacional do Petróleo (2020), o biodiesel é um combustível renovável obtido a partir da reação de transesterificação onde os triglicerídeos presentes nos óleos e gordura animal, ao reagirem com um álcool primário, gera dois produtos: o éster e a glicerina. O biocombustível é uma excelente alternativa, pois após a combustão parte da energia é destinada ao funcionamento de um sistema como um motor, e outra retorna na forma de CO₂ realimentando o ciclo, uma vez que as plantas capturam todo o gás carbônico. A cada tonelada de gás carbônico reduzida, gera créditos de carbono vinculados ao Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) resultante do Protocolo de Kyoto.

Sabe-se que grande parte das máquinas agrícolas e parte dos veículos de transporte, são movidos a óleo diesel misto, que passou a ter adição obrigatória de 13% de biodiesel, de acordo com a ANP - Agência Nacional do Petróleo (2021). A substituição completa pelo biodiesel é uma alternativa econômica, que possibilita o produtor rural utilizar seu próprio produto como combustível.

O babaçu é uma das mais importantes representantes das palmeiras brasileiras, pertencente à família botânica Arecaceae, seu fruto possui capacidade de fornecer uma ampla variedade de produtos, uma vez que, todas as partes da planta podem ser reaproveitadas. Encontradas em regiões específicas do país, é uma planta característica da zona de transição entre as florestas úmidas da bacia Amazônica e as terras semiáridas do nordeste brasileiro.

De acordo com LIMA (2005) “Nos Estados do Maranhão e Tocantins e parte dos Estados do Piauí, Goiás, Mato Grosso e Pará, há predominância de imensas florestas de babaçu, algo em torno de 17 milhões de hectares”. Assim, partes da população dessas regiões, vivem da extração artesanal do fruto, o qual possui valor comercial.

O coco de babaçu possui muitas utilidades, e sua composição, caracterizada em quatro partes, pode ter diferentes objetivos e funções. Das amêndoas pode-se extrair o óleo, sendo este, uma excelente matéria-prima para a produção de biodiesel devido as suas características qualitativas. Através de sua casca, por exemplo, pode-se produzir etanol, ração animal e até artesanatos.

Figura 1 – Mata dos Cocais localizada no Nordeste.



Fonte: R7, 2019.

Na etapa de produção de biodiesel, a reação de transesterificação exerce um grande papel, onde há alguns fatores que influenciam o rendimento da produção de biodiesel como os triglicerídeos, que são as matérias primas principais podendo ser óleos e gorduras de origem animal ou vegetal; os tipos de álcool, que são álcoois de cadeia curta, normalmente metanol ou etanol; a relação molar óleo:álcool, no qual trabalha-se com excesso de álcool para que se obtenha um maior grau de conversão de óleo em biodiesel; os tipos de catálises, que são alcalina, ácida e enzimática; a temperatura de reação, pois quanto maior a temperatura, maior a velocidade de reação, sendo sua elevação limitada ao ponto de ebulição do álcool utilizado, e o tempo de reação pois nos instantes iniciais ocorre grande parte da conversão de óleo em biodiesel para estabilização da reação.

2 OBJETIVO E METODOLOGIA

O objetivo deste trabalho é a apresentação de uma proposta de planta para usina de produção de biodiesel de amêndoas de babaçu, em escala piloto, analisando os benefícios relacionados ao uso do babaçu como matéria-prima, a funcionalidade dos equipamentos, operações unitárias, conversões químicas, assim como, possíveis melhorias.

A metodologia aplicada para realização deste trabalho foi de natureza quali-quantitativa, a fim de compreender os benefícios do coco de babaçu, sua cadeia extrativa/produzida, bem como a viabilidade de seu uso para a produção.

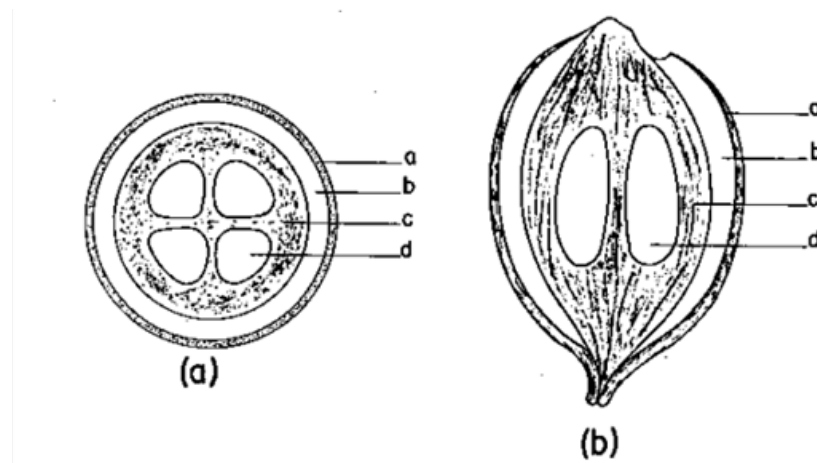
Para este projeto de usina piloto, foram considerados inicialmente, processos básicos de produção de biodiesel e através de pesquisas bibliográficas e exploratórias, foram analisados de maneira crítica, a necessidade de acrescentar equipamentos e novos processos visando maior rendimento e qualidade dentro dos parâmetros utilizados. Após os estudos dos materiais, foi realizado o levantamento e a coleta das principais informações e dados dando início ao processo de construção e elaboração da estrutura textual.

3 CARACTERÍSTICAS DO FRUTO E EXTRAÇÃO DO ÓLEO

A palmeira do babaçu pode atingir alturas de 10 a 30 metros, sua frutificação inicia-se no 8º ano de vida e a produtividade absoluta é atingida por volta do 15º ano de vida. Em relação a produção em cada época do ano, o ápice do florescimento ocorre entre os meses de janeiro a abril, e o amadurecimento dos cocos entre os meses de agosto e dezembro. Cada palmeira pode conter aproximadamente 3 a 5 cachos, e para cada cacho a produção varia de 300 a 500 cocos (CARRAZZA; ÁVILA; SILVA, 2012).

O coco de babaçu normalmente apresenta o formato oval e coloração castanha. Este é composto por quatro partes, em que sua composição em porcentagem em peso subdivide-se nas seguintes partes correspondentes: 12,6% ao epicarpo; 20,4% ao mesocarpo; 58,4% ao endocarpo e 8,7% às amêndoas. O epicarpo, mesocarpo e endocarpo constituem a casca, correspondendo a 91,4% do fruto (CARRAZZA; ÁVILA; SILVA, 2012).

Figura 2 – Cortes: Transversal (a) e longitudinal (b).
Componentes: Epicarpo (a), Mesocarpo (b),
Endocarpo (c) e Amêndoa (d).

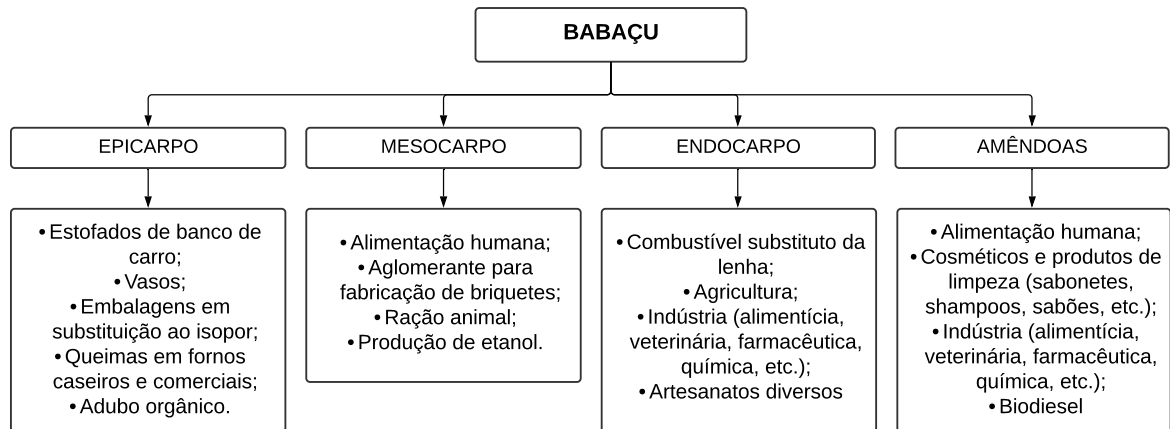


Fonte: Emmerich, 1987 apud Souza, 2012.

3.1 FINALIDADES E USO DO FRUTO

Cada parte correspondente ao coco do babaçu pode ser destinada à produção de diversos produtos em diferentes segmentos, como demonstrado no fluxograma da Figura 3.

Figura 3 – Fluxograma de aplicação dos diversos componentes do babaçu.



Fonte: Modificado de Ferreira, 2005 apud CARRAZZA, Ávila e SILVA, 2012.

3.2 EXTRAÇÃO DO ÓLEO DAS AMÊNDOAS DE BABAÇU

Como abordado anteriormente, as partes que compõem o babaçu possuem diferentes aplicações. Dessa forma, as amêndoas (8,7% do fruto) são utilizadas como matéria prima para produção de biodiesel. Antes de iniciar a produção do biodiesel, deve-se primeiramente extrair o óleo da amêndoa presente no coco de babaçu.

Para a obtenção do óleo primeiramente é preciso obter-se a amêndoa, o processo da obtenção da mesma é feito de maneira manual e tradicional pelas mulheres da região conhecidas como quebradeiras de cocos, sendo um sistema de subsistência. A primeira etapa realizada para a extração é a coleta dos cocos das palmeiras. Os cocos assim que maduros caem ao chão e então são coletados, já aqueles que estão maduros, mas não vieram a cair ainda, utilizam-se varas para cutucar os cachos ou são arremessados pedaços de pau, técnica conhecida como rebolo, para soltar o fruto. A retirada do cacho inteiro para a coleta dos cocos não é uma técnica recomendada, devido sua interação ecológica que prejudica a função da planta e desperdiça muitos frutos ainda verdes (CARRAZZA; ÁVILA; SILVA, 2012).

Assim que coletados os cocos passam para etapa da “quebra” para retirada das amêndoas. A quebra do fruto pode ocorrer nas casas das próprias quebradeiras ou nos babaçuais, onde os cocos coletados são amontoados nos pés das palmeiras e quebrados (CARRAZZA; ÁVILA; SILVA, 2012).

Tradicionalmente para a quebra do coco são utilizados machados e porretes. O coco é apoiado sobre a lamina do machado, que está preso entre as pernas das quebradeiras, e com o

auxílio do porrete quebra-se o coco. Além desta, há outras maneiras de fazer a quebra, como golpear o coco com pedras sobre uma superfície dura ou utilizar máquinas para serra o coco (processo semi-mecanizado), esta última prática devido ao alto custo entre outros fatores não é tão disseminada (CARRAZZA; ÁVILA; SILVA, 2012).

Segundo Carrazza; Silva; Ávila (2012) extraídas as amêndoas nos próprios babaçuais, essas são transportadas pelas quebradeiras em um saco em suas cabeças, denominados “pacará” ou “cofos”, cestos feitos com palhas de babaçu com capacidade de armazenar até 10 quilogramas de amêndoas. No entanto, quando a quebra ocorre em suas próprias casas o transporte do coco inteiro costuma ser feito por animais de carga, contudo ainda sim algumas quebradeiras levam os cocos pendurados em suas cabeças. As amêndoas ou os cocos inteiros são transportados geralmente para as próprias casas das quebradeiras, onde são armazenados amontoados em seus quintais ou dentro de sacos.

As amêndoas obtidas pelas quebradeiras normalmente são destinadas para pequenas indústrias locais produtoras de óleo cru ou também, podem seguir para produção do óleo realizado pelas próprias quebradeiras, conhecido como processo tradicional.

O óleo de babaçu pode ser extraído de diferentes formas, algumas delas são a extração por solvente, por prensa fria e a de maneira artesanal (tradicional), realizada pelas quebradeiras de cocos. A seguir será comentado sobre cada método, mas é importante dizer que dentre todos os métodos o mais utilizado é o artesanal.

3.3 EXTRAÇÃO POR SOLVENTE

No mundo existem muitos tipos de plantas oleaginosas que são utilizadas para a produção de Biodiesel, entre elas estão o algodão, girassol, pinhão manso, mamona, soja e o babaçu. Para se extrair a óleo dessas plantas e frutos os tipos de solventes mais utilizados são etanol, metanol, hexano e éter etílico (BIODIESILBR ON LINE, 2008, P.1 apud GOMES et al., 2013).

O processo de obtenção do óleo da amêndoa do babaçu através da utilização de um solvente começa com o preparo da matéria-prima. Normalmente as amêndoas são mantidas a temperaturas baixas e em seguida são trituradas para facilitar a ação do solvente. As amostras trituradas são colocadas em contato com o solvente em um recipiente onde são mantidas sob agitação, para manter as partes sólidas da mistura em suspensão. A partir desse momento o óleo das amêndoas começa a ser extraído (GOMES et al., 2013).

De acordo com o estudo realizado por (GOMES et al., 2013), sobre a determinação de condições ideais para o processo de extração por solvente do óleo da amêndoa do babaçu, percebe-se que há alguns fatores que interferem no rendimento da obtenção do óleo. Variantes como temperatura, razão solvente/amostra, entre outras influenciam na quantidade de óleo extraído. Logo, quando estudado esses fatores é possível determinar condições ideais para operação.

3.4 EXTRAÇÃO POR PRENSA FRIA

Indica-se a prensagem a frio para sementes ou amêndoas que apresentam de 30% a 50% de óleo, como o amendoim, girassol, gergelim, canola ou colza, mamona, babaçu, castanha-do-pará, amêndoas em geral, que possuem umidade baixa (abaixo de 10%), e sejam constituídas de material fibroso (ANTONIASSI, 2021).

As prensas utilizadas para extração do óleo podem ser prensas contínuas, denominadas “expeller”, ou prensas hidráulicas, para processos descontínuos. As prensas contínuas possuem uma rosca ou parafuso sem fim que esmaga a amêndoa, e libera o óleo. Já as prensas hidráulicas contêm um cilindro perfurado onde um êmbolo se desloca e realiza pressão no insumo, que fica armazenado dentro de um pano, saco ou lona (ANTONIASSI, 2021).

Antes de iniciar a extração, é recomendável realizar uma seleção na matéria prima, pois melhora a qualidade do óleo, e caso o material apresentar fungos, o óleo poderá ser contaminado por microtoxinas. Além disso, é preciso que o material passe por um tratamento térmico para inativação enzimática, que adequa a umidade antes da extração e desnatura as proteínas para liberação do óleo. Dependendo da matéria prima e experiência das empresas a prensagem pode ser realizada diretamente (ANTONIASSI, 2021).

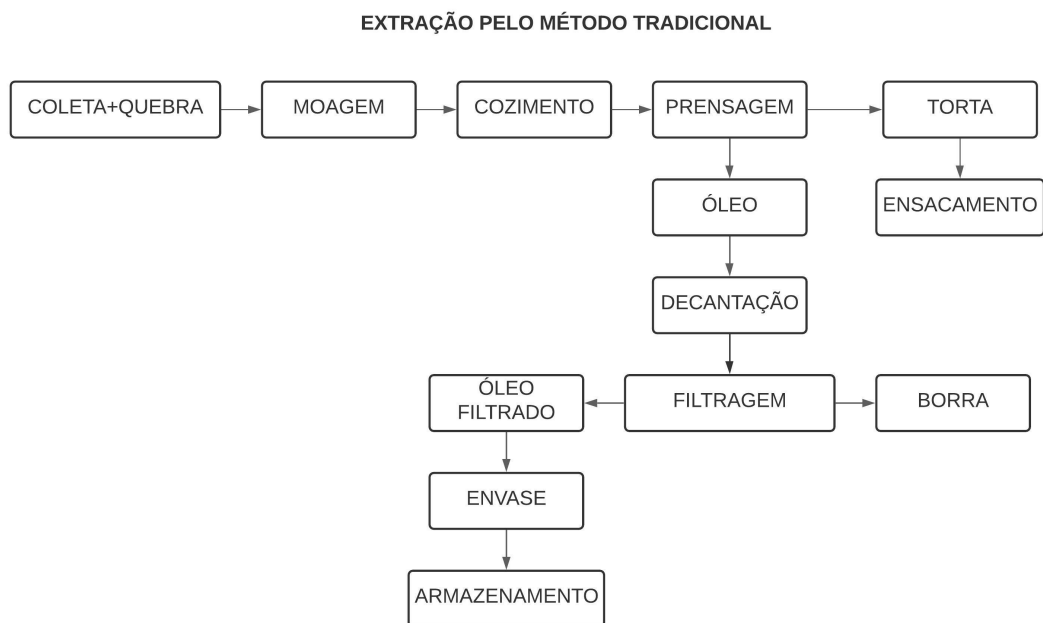
A extração mecânica pode ser combinada com a extração por solvente orgânico, sendo a extração por solvente seguida da extração por prensagem mecânica, chamado de processo misto. Este apesar de apresentar um custo maior em relação aos outros processos, é o que apresenta maior eficiência, uma vez que o teor de óleo residual na torta é menor (SILVA et al., 2017).

3.5 EXTRAÇÃO ARTESANAL

A partir da obtenção das amêndoas pelas quebradeiras, essas seguem para a moagem, que consiste na trituração das mesmas em moinhos ou pilões, o que facilita na etapa seguinte de cozimento. Em seguida elas são cozidas, para que as amêndoas amoleçam, viabilizando a liberação do óleo, pode ser utilizada uma chaleira onde se dilui o sumo ou o farelo da amêndoa, adquirindo o óleo bruto. Após o cozimento, é preciso separar o óleo da torta, para isso é feita a prensagem. Podem ser utilizados nessa etapa extrator manual de vegetais, que possui desvantagens devido a manutenção constante e baixo teor de aproveitamento comparado com outros equipamentos, pois seu uso propicia a retenção de óleo na torta. A fim de buscar melhorias, a Fundação Mussambê desenvolveu uma prensa hidráulica manual, que apresenta dois extratores, em que o sistema é pressurizado por um macaco hidráulico de 50 toneladas, em que possui 50% de rendimento. Esse equipamento apresenta produtividade de 150 litros/dia de óleo. Além desse, outras extratoras de óleo também são utilizados como prensa extratora de óleo a vapor, entre outras (CARRAZZA; ÁVILA; SILVA, 2012).

Separados, óleo e torta, a torta é ensacada e o óleo é decantado, para retirar os resíduos e impurezas que ainda possam estar presentes. Posteriormente este é filtrado, para um refino mais minucioso, em que é feita a retirada da borra, que pode ser usada como subproduto do processo. Por fim, envaza-se o óleo em bombonas plásticas ou tambores de aço, e recomenda-se armazená-los em locais cobertos, arejados e secos (CARRAZZA; ÁVILA; SILVA, 2012).

Figura 4 – Fluxograma do processo de extração do óleo da amêndoa de babaçu.



Fonte: Baseado em Carrazza, 2012.

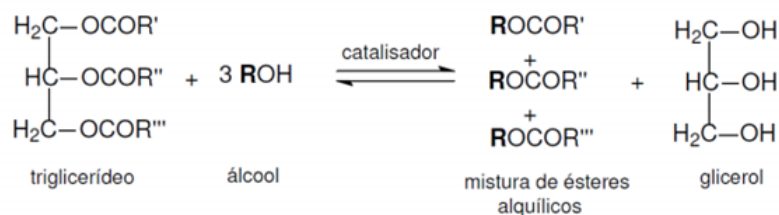
4 PRODUÇÃO DO BIODIESEL

A produção de biodiesel a partir do óleo de coco de babaçu é bem parecida com o biodiesel a partir de outras oleaginosas e, tem como principal etapa a reação de transesterificação. Além dessa etapa, existem diversas operações unitárias para a preparação e reciclo dos reagentes e purificação do produto.

4.1 DESCRIÇÃO DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE BIODIESEL

O processo de obtenção do biodiesel, inicia-se com a reação em bateladas seguido de etapas de operações unitárias. O óleo produzido a partir da extração das amêndoas do babaçu, fica armazenado no tanque de óleo neutro e para ser alimentado ao reator, o óleo deve estar desumidificado e com o teor de acidez dentro da especificação. No tanque de mistura acontece a mistura do catalisador com metanol ou etanol. O objetivo é solubilizar o catalisador que se encontra na fase sólida no álcool, que está na fase líquida. O óleo neutro (éster – triglicerídeos) junto com o álcool de cadeia curta (metanol ou etanol) e o catalisador alcalino (NaOH ou KOH) são alimentados ao reator 1 onde ocorre a reação de transesterificação. A reação principal é apresentada abaixo:

Figura 5 – Reação de Transesterificação.



Fonte: Machado, 2013 apud Santos et al, 2015.

Na reação de transesterificação formam-se uma mistura de ésteres alquílicos (biodiesel) e o glicerol (glicerina), a reação ocorre em sistema de bateladas, portanto, o tempo de reação é um fator importante para o grau de conversão da reação. Como essa reação é de equilíbrio tem-se uma mistura de produtos e reagentes não convertidos que formam duas fases distintas: uma fase superior formada pelo biodiesel e resíduo de óleo não convertido, e outra fase inferior formada por glicerina, excesso de álcool e catalisador (MACHADO, 2013 apud SANTOS et al., 2015). A mistura bifásica é transferida para o decantador 1.

No decantador 1 é onde ocorre a primeira separação do biodiesel com a glicerina. A glicerina mais o álcool são retirados por baixo, pois essa mistura apresenta maior densidade que o biodiesel e são transferidos para o tanque de glicerina bruta. O biodiesel é encaminhado para o reator 2, onde é novamente misturado com álcool e mais o catalisador para aumentar o grau de conversão da reação de transesterificação. As condições reacionais são as mesmas do reator 1. Na sequência, tem o decantador 2 que tem a mesma função do decantador 1: separar o biodiesel da glicerina bruta. A mistura de glicerina e álcool é enviada para o tanque de glicerina bruta e o biodiesel segue para a sua purificação.

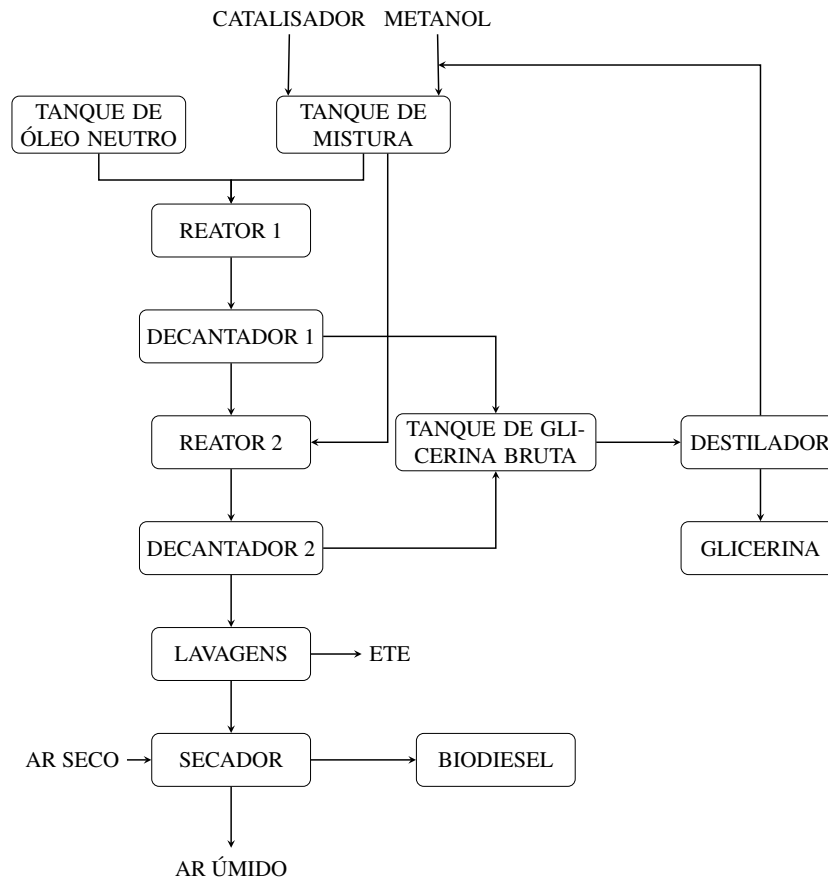
O tanque de glicerina bruta recebe a mistura de glicerina, álcool e catalisador dos decantadores 1 e 2. Essa mistura é enviada para o destilador, onde o objetivo é receber a glicerina bruta para recuperar o álcool, já que ele é mais volátil que a glicerina e reciclá-lo para o tanque de mistura. A glicerina pode ser purificada para ser aproveitada em outros processos.

A fase oleosa, produto da reação, é enviada para as etapas de lavagens, as operações de decantação, lavagem e secagem são necessárias para a remoção de substâncias indesejadas do meio e para a obtenção, apenas, do produto desejado o biodiesel. A primeira lavagem é realizada com água acidulada para neutralizar um eventual excesso de alcalinidade devido à presença do catalisador alcalino. As outras etapas de lavagens são realizadas com água neutra. Sendo assim, a lavagem faz parte da etapa de purificação do produto onde são retirados resíduos de glicerina, sabões e ácidos graxos. A etapa de lavagem é repetida de duas a cinco vezes dependendo da quantidade de impurezas no biodiesel. As águas de lavagem obtidas após a etapa de purificação contêm basicamente resíduos de sabões de sódio ou potássio, além dos ácidos graxos, glicerina, álcoois (metanol ou etanol) e outros contaminantes e por isso, precisam ser tratadas para que possam ser reutilizadas ou descartadas, sendo essas encaminhadas para a Estação de Tratamento de Efluentes (ETE).

Por fim, a fase oleosa é enviada ao secador para que os resíduos de água sejam evaporados por aquecimento, e então, a fase oleosa, biodiesel, pode ser armazenada em reservatório próprio para posterior análise de qualidade.

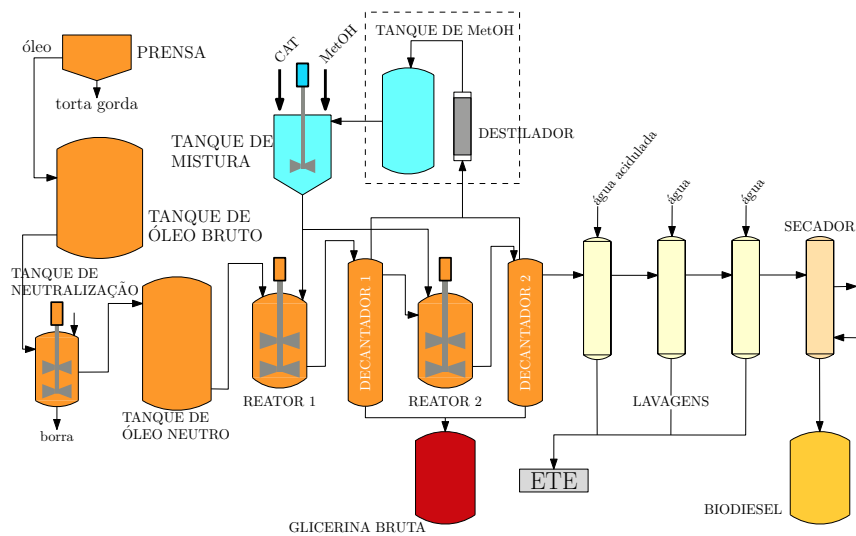
O processo de produção do biodiesel completo, desde a extração do óleo da amêndoa de babaçu até o biodiesel, pode ser observado nas figuras a seguir. Sendo a primeira a representação do diagrama de blocos e a segunda o fluxograma de processos simplificado de produção de biodiesel.

Figura 6 – Fluxograma do processo de produção de Biodiesel.



Fonte: Baseado em Beta EQ, 2017.

Figura 7 – Processo de produção do biodiesel a partir da extração.



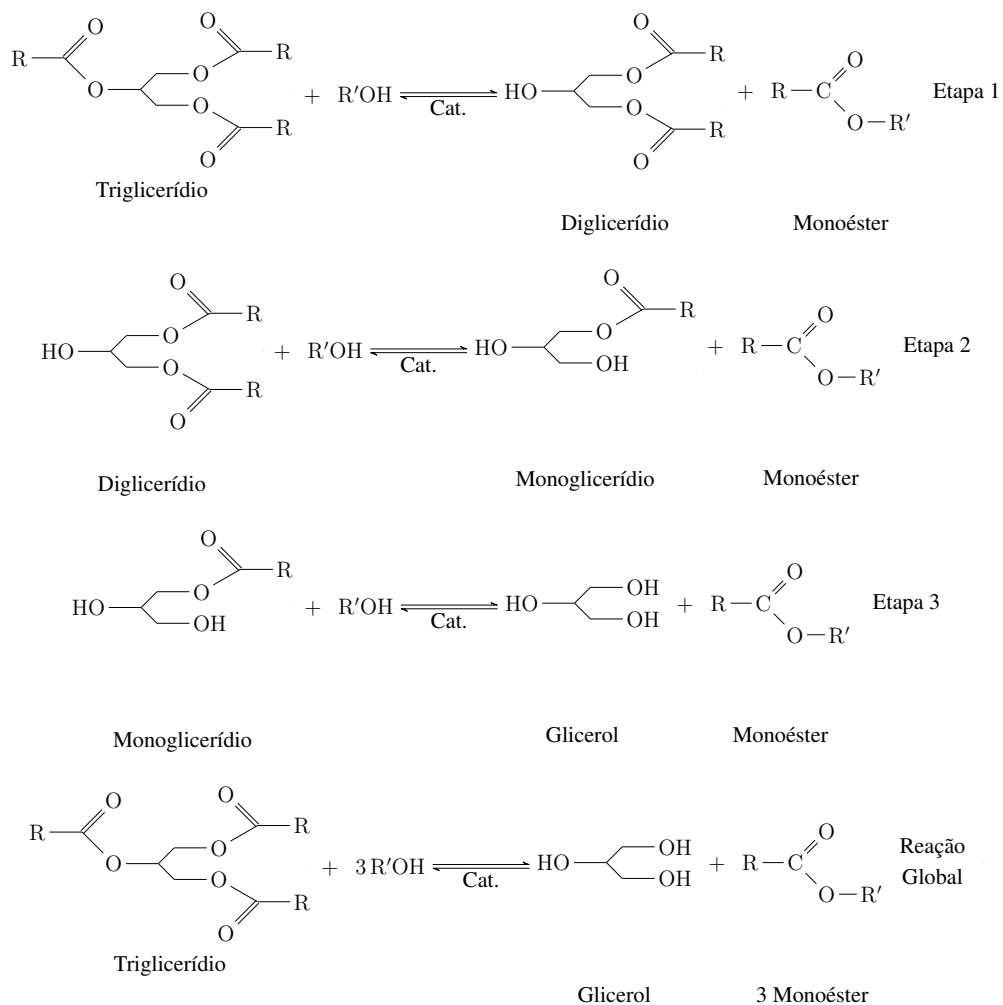
Fonte: Beta EQ, 2017.

5 REAÇÃO DE TRANSESTERIFICAÇÃO

A reação de transesterificação, também conhecida como alcoólise, é a principal etapa do processo, pois a formação de biodiesel ocorre nessa fase. Todas as outras etapas, antes e depois da reação, são realizadas para que seus produtos sejam adequadamente separados e purificados.

Essa reação acontece em três etapas: inicialmente, uma molécula de triglicerídeo reage com uma molécula de álcool formando um composto intermediário chamado diglicerídeo e uma molécula de monoéster (biodiesel); em seguida, uma molécula de diglicerídeo reage com uma segunda molécula de álcool e forma um monoglicerídeo e outra molécula de monoéster; finalmente, uma molécula de monoglicerídeo reage com uma terceira molécula de álcool que forma uma molécula de glicerol e de monoéster (MENEGHETTI S; MENEGHETTI M; BRITO, 2013). Todas essas etapas, podem ser observadas na Figura 8.

Figura 8 – Etapas reacionais envolvidas na transesterificação de triglicerídeos.



Fonte: Baseado em Meneghetti, S; Meneghetti, Brito, 2013.

5.1 FATORES QUE INTERFEREM NA REAÇÃO DE TRANSESTERIFICAÇÃO

Os fatores que interferem na reação de transesterificação são: triglicerídios que variam de acordo com o tipo de óleo, tipo de álcool, relação molar entre o óleo e o álcool, tipo de catalisador, e tempo e temperatura de reação.

5.1.1 Triglicerídios

Os triglicerídeos, que são os triésteres, pelos quais se obtém o biodiesel, são encontrados em óleos e gorduras tanto de origem vegetal ou animal. O óleo de babaçu possui a composição química extremamente favorável para a produção de biodiesel, pois o ácido graxo de maior presença na sua composição é o ácido láurico (C12:0) que possui cadeia saturada, que interage melhor com o álcool e com o catalisador, que resulta no biodiesel, de elevado grau de qualidade (LIMA et al., 2007).

Tabela 1 – Composição química do óleo de babaçu.

Ácido graxo	Contribuição percentual
Ácido caprílico (C8:0)	5,0%
Ácido cáprico (C10:0)	6,0%
Ácido láurico (C12:0)	44,0%
Ácido mirístico (C14:0)	17,0%
Ácido palmítico (C16:0)	8,0%
Ácido esteárico (C18:0)	4,5%
Ácido oléico (C18:1)	14,0%
Ácido linoléico (C18:2)	2,0%

Fonte: Lima et al, 2007.

5.1.2 Tipos de álcool

O álcool utilizado normalmente é de cadeia curta sendo o mais comum o metanol e o etanol. O metanol proporciona uma reação com maior rendimento e a sua separação no final é mais fácil do que a separação do etanol, porque o etanol pode criar uma emulsão mais estável

do que o metanol na interface entre a fase do óleo e a fase da glicerina o que vai dificultar a separação das fases; por outro lado, o etanol tem vantagens econômicas e ambientais, pois, ele é produzido em larga escala no Brasil a partir de uma fonte renovável que é a cana de açúcar (MENEGHETTI S; MENEGHETTI M; BRITO, 2013).

A rota metílica é a mais utilizada mundialmente, pois a disponibilidade de metanol é maior do que a de etanol, além de possuir custo menor e ser mais reativo (PIETRE, 2006). Nas Tabelas 2 e 3, são apresentadas as vantagens e desvantagens do uso do metanol e etanol, respectivamente.

Tabela 2 – Vantagens e desvantagens do uso do Metanol.

Metanol	
Vantagens	Desvantagens
Apresenta menor consumo comparado ao etanol.	Apesar de ser produzido da biomassa, é tradicionalmente um produto fóssil, além de ser bastante tóxico.
É mais barato que o etanol.	Apresenta um maior risco de incêndio.
É mais reativo.	Transporte é controlado pela Polícia Federal, por se tratar de matéria-prima para a extração de drogas.
Os equipamentos do processo da planta com a rota metílica é cerca de 1/4 do volume dos equipamentos da rota etílica para a mesma produtividade.	A atual produção de metanol só garante o estágio inicial de um programa de âmbito nacional.

Fonte: Pietre, 2006.

Tabela 3 – Vantagens e desvantagens do uso do Etanol.

Etanol	
Vantagens	Desvantagens
Produção alcooleira no Brasil já consolidada.	Os ésteres etílicos possuem maior afinidade à glicerina, dificultando a separação.
Produz Biodiesel com maior índice de cetano e maior lubrificidade, se comparado ao Biodiesel metílico.	Possui azeotropia, quando misturado em água. Com isso sua desidratação requer maiores gastos energéticos e investimento com equipamentos.
Se for feito a partir da biomassa (como é o caso de quase toda a totalidade da produção brasileira), produz um combustível 100% renovável, com maior geração de empregos no meio rural.	Os equipamentos de processo da planta com rota metílica é cerca de um quarto do volume dos equipamentos para a rota etílica, para uma mesma produtividade e mesma qualidade.
Não é tóxico como o metanol.	Dependendo do preço da matéria prima, os custos de produção de Biodiesel etílico podem ser até 100% maiores que o metílico.
Menor risco de incêndios	

Fonte: Pietre, 2006.

5.1.3 Relação Molar óleo:álcool

Pela estequiometria da reação de transesterificação são necessários três mols de álcool para reagir com um mol de triglicerídeo, entretanto como a reação é reversível torna-se necessário trabalhar com excesso de álcool para formar a reação mais favorável a formação do produto e aumentar seu rendimento. Normalmente, trabalha-se com uma relação molar de 1:6 entre triglicerídeo e álcool (BARROS; JARDINE, 2021). Outra alternativa para formar a reação mais favorável a formação do produto é a remoção de um dos produtos do meio reacional, o que também favorece a formação de produtos (PIETRE, 2006).

5.2 TIPOS DE CATÁLISES

Os catalisadores são substâncias que alteram a velocidade de reações químicas sem serem consumidos de forma significativa (SANTOS; MÓL, 2016). A catálise visa aumentar a taxa de reação através do uso de um catalisador.

A síntese de biodiesel para ocorrer a uma velocidade adequada em escala industrial, é preciso o uso de catalisadores. Existem cinco tipos de catálises que podem ser aplicadas para a reação de transesterificação, são elas: Catálise Alcalina Homogênea, Catálise Ácida Homogênea, Catálise Alcalina Heterogênea, Catálise Ácida Heterogênea e Catálise Enzimática.

5.2.1 Catálise Alcalina Homogênea

A catálise alcalina homogênea é o tipo mais utilizado para a reação de transesterificação em escala industrial, sendo os mais utilizados o hidróxido de sódio (NaOH), o hidróxido de potássio (KOH) e os metóxidos alcalinos (MENEGETTI S; MENEGETTI M; BRITO, 2013).

A rota alcalina homogênea permite alcançar altos rendimentos com tempos curtos de reação, porém, o uso desse catalisador requer que a matéria prima tenha alto grau de pureza, pois a presença de ácidos graxos livres, por exemplo, leva ao consumo do catalisador e a ocorrência de saponificação. A presença de água mesmo em pequenas proporções pode levar a hidrólise dos triglicerídeos e posteriormente a formação de ácidos graxos livres, o que também levará a saponificação (PIETRE, 2006).

Experimentos realizados na temperatura de 60°C e relação molar 6:1 álcool e óleo e dosagens de 1% e 1,5% de catalisador KOH apresentaram como rendimentos os seguintes resultados, respectivamente, 88,34% e 83,00%, ou seja, uma dosagem menor de catalisador resultou em um rendimento maior (SANTOS et al., 2015).

5.2.2 Catálise Ácida Homogênea

Os principais catalisadores utilizados são: o ácido sulfúrico e derivados do ácido sulfônico. Apesar de apresentar altos rendimentos, suas reações são lentas (por volta de 4000 vezes mais lenta do que a catálise alcalina homogênea) e precisam de altas temperaturas e com longos tempos de reação: tempo acima de 3 horas e temperaturas maiores do que 100°C (GOODWIN et al., 2005 apud PIETRE, 2006).

Em um estudo realizado no qual foi conduzida uma síntese de biodiesel a partir do óleo de coco de babaçu com metanol e catálise ácida, foi verificado um exemplo de como esse tipo de catálise ocorre de maneira lenta. No estudo com a resina sulfônica foi obtido um rendimento

máximo de 76% e com o ácido sulfúrico o rendimento máximo foi de 44% e nos dois casos o tempo de reação foi de 8 horas, a temperatura de 65°C.

A grande vantagem da catálise ácida em relação a catálise alcalina, é que o catalisador ácido não sofre interferência na presença de ácidos graxos livres, portanto, não é necessária uma matéria prima com alto grau de pureza (LACHTER et al., 2003 apud PIETRE, 2006). A catálise ácida pode ser usada antes da catálise alcalina a fim de esterificar os ácidos graxos livres presentes na matéria prima.

5.2.3 Catálise Enzimática

Na catálise enzimática pode-se observar uma diferença entre as catálises alcalinas e ácidas, como por exemplo, não há problema para a separação do glicerol, e os ácidos graxos livres são convertidos facilmente em ésteres, enquanto que nas outras catálises ocorre o contrário. Entretanto, o custo das enzimas ainda é muito alto e o tempo de reação é maior do que o da catálise homogênea alcalina. As enzimas mais utilizadas para catalisar a reação de transesterificação são as lipases com rendimento de 95% a 98% (PIETRE, 2006).

5.3 TEMPO E TEMPERATURA DE REAÇÃO

A reação de transesterificação pode ocorrer em diversas temperaturas, sendo que em temperaturas mais altas ocorrem maiores rendimentos em menor tempo de reação. Contudo, se a temperatura da reação ultrapassar a temperatura de ebulição do álcool, ocorrerá a vaporização do mesmo e o rendimento da reação será prejudicado, pois o equilíbrio da reação será deslocado no sentido dos reagentes (MARTINS et al., 2015).

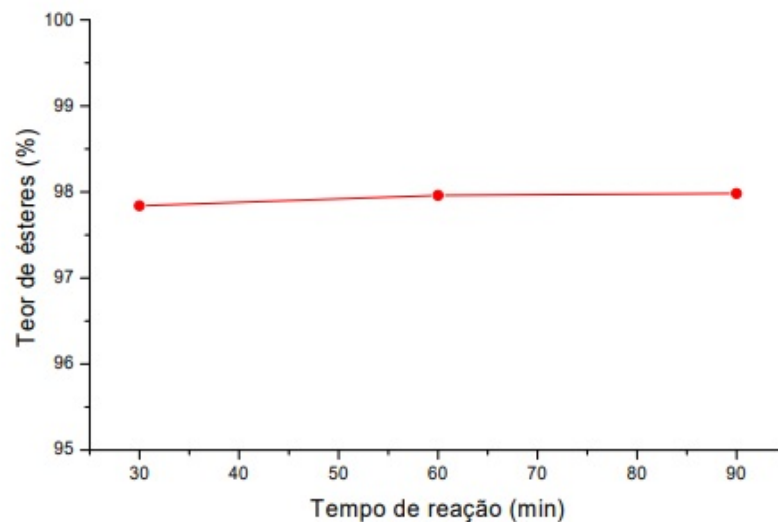
Por exemplo, para as reações que trabalharem com o metanol, é aconselhável operar com temperaturas entre 60 e 70°C. Já pela catálise alcalina, não se deve ultrapassar a temperatura de 60°C, pois acima disso, o processo de saponificação dos glicerídeos podem ser acelerados e anteceder a reação de transesterificação. Portanto, a temperatura de reação é influenciada diretamente pelos tipos de álcool e pelo catalisador empregado (THOMAS, 2017).

O tempo de reação é uma variável importante, pois a reação de transesterificação é do tipo reversível e o equilíbrio da reação pode ocorrer em tempos variáveis. Foi observado que para a produção de biodiesel de babaçu tanto pela via metílica como para etílica, com a razão

molar álcool:óleo e dosagem de catalisador constantes, não ocorreram variações significativas no rendimento após 60 minutos de reação (SANTOS, 2008).

A figura 9 apresenta o rendimento (teor de ésteres) da produção de biodiesel metílico de babaçu via catálise alcalina em função do tempo de reação.

Figura 9 – Rendimento de biodiesel metílico de babaçu em função do Tempo de reação sob catálise alcalina



Fonte: Santos, 2008.

Conforme observado na 9, durante os 30 minutos iniciais da reação, a produção de ésteres eleva-se rapidamente chegando a um grau de conversão de quase 98%. De 30 a 60 minutos, acontece um pequeno aumento na conversão chegando a 98% e então ocorre a estabilização, mantendo o grau de conversão constante até o final da reação aos 90 minutos. Portanto, pode se concluir que nos primeiros minutos da transesterificação, a reação acontece em alta velocidade de produção de ésteres e a partir dos 30 minutos, a velocidade diminui e o processo mantém-se estável aos 60 minutos.

6 PROJETO DE USINA PILOTO

Tendo em vista o conteúdo apresentado ao longo do trabalho, pelo fato do babaçu ser uma matéria-prima com alto potencial para a produção de biodiesel, neste tópico será apresentado um projeto de uma usina piloto.

A proposta da planta de produção em escala piloto é um planejamento teórico com base em dados e estudos bibliográficos, de maneira exploratória e quantitativa. O desenvolvimento do projeto consiste na apresentação do processo produtivo de biodiesel através das amêndoas de babaçu, abordando as etapas do processo, as funcionalidades dos equipamentos, operações unitárias, principais reações, além de sugerir melhorias e aproveitamento de resíduos.

6.1 PROCESSO DESDE A EXTRAÇÃO ATÉ O PRODUTO FINAL

Para o início da produção do biodiesel faz-se necessário a extração do óleo a partir da amêndoa do babaçu, portanto, para a obtenção da amêndoa é realizada a compra das mesmas com as quebradeiras de coco, mulheres da região que realizam a coleta e quebra dos cocos de maneira artesanal.

Compradas as amêndoas, estas seguem para a extração do óleo na própria usina, com base na extração artesanal conforme mostra a seção 3.5, as quais são submetidas aos processos de cozimento, moagem e por fim, a prensagem a fim de obter-se o óleo (matéria prima principal) para a produção de biodiesel.

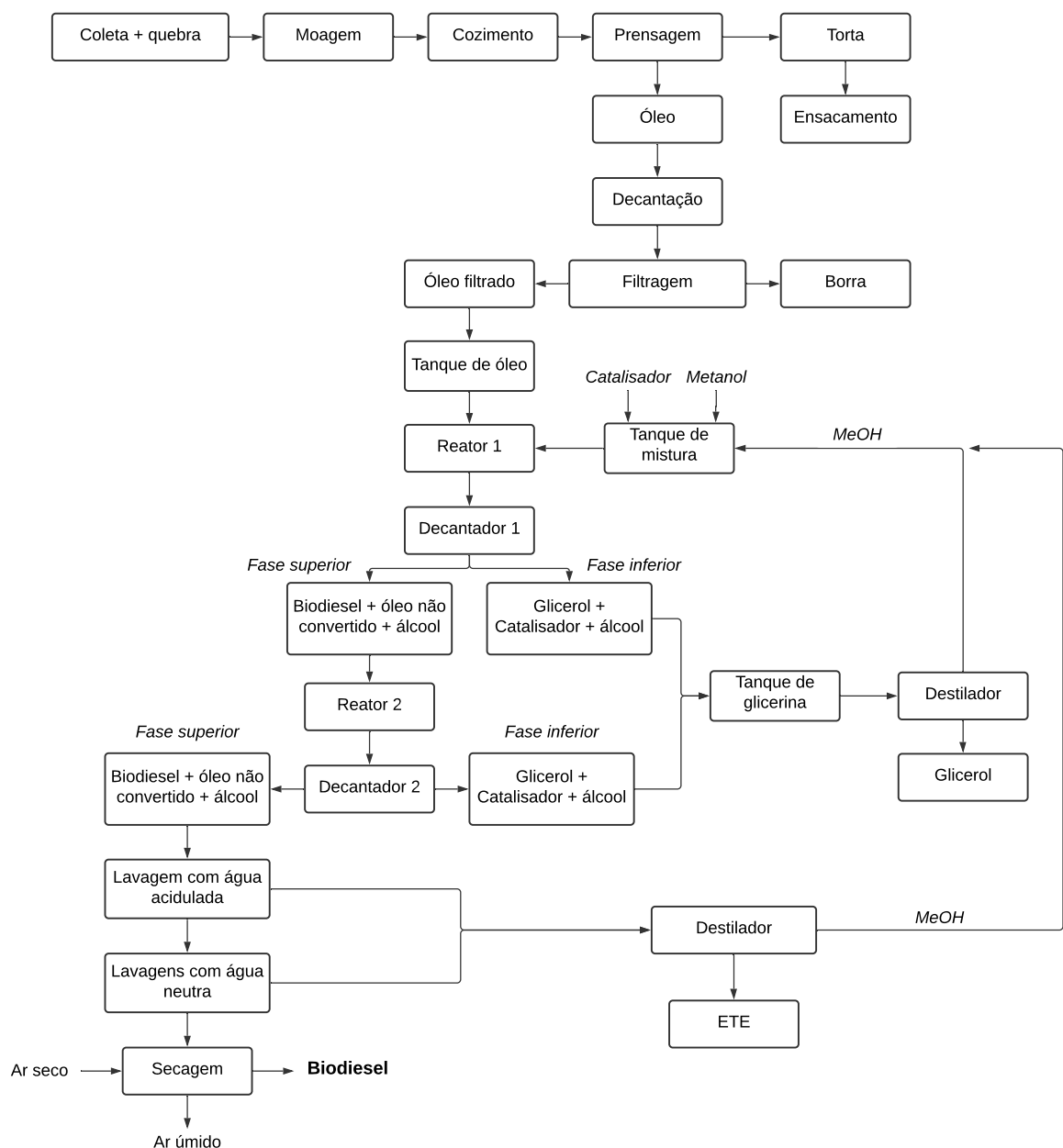
Este método para extração do óleo foi adotado, pois procura-se um método mais simples e econômico para a obtenção do óleo, porém o método de extração por solvente como apresentado na seção 3.3 apesar de apresentar um custo maior, possui maior eficiência na extração. Vale ressaltar também que a fim de melhorar o rendimento há a possibilidade da combinação desses dois métodos, tendo a extração tradicional seguida da extração por solvente.

O primeiro estágio de produção no qual as amêndoas são submetidas, é a moagem. Essa etapa consiste na trituração das amêndoas através de um moinho, para assim facilitar o cozimento na fase seguinte. O cozimento é realizado em um equipamento denominado de cozinhador ou caldeirão, o qual visa o rompimento das paredes celulares das amêndoas para melhor liberação do óleo. A introdução do vapor na unidade acarreta o aumento também da temperatura. A faixa de ganho de temperatura das amêndoas trituradas varia de $70^{\circ}C$ a $105^{\circ}C$.

Obtido o óleo, este segue para a decantação e filtragem, separando-o da borra presente. Logo após, é armazenado no tanque de óleo, iniciando a produção de biodiesel, composta pelas etapas de conversão química nos reatores e operações unitárias.

A figura 10 mostra o fluxograma de blocos da usina piloto, apresentado de maneira geral para melhor visualização e compreensão do processo como um todo. Esta usina é constituída por equipamentos de transformações físicas como: tanques, decantadores, secador e destiladores, e por equipamentos de transformações químicas, como os reatores.

Figura 10 – Fluxograma de blocos completo do processo de produção.



Fonte: Autores, 2021.

6.2 CONDIÇÕES ADOTADAS PARA A PRODUÇÃO DE BIODIESEL

Nesta etapa será apresentada as condições e métodos adotados para a produção de biodiesel a partir do óleo de babaçu.

O álcool escolhido para o processo foi o metanol, pois é a rota mais utilizada mundialmente, além de possuir um custo menor, sendo também mais reativo. Para a utilização do álcool metílico recomenda-se trabalhar com temperaturas entre 60 °C e 70 °C.

A relação molar óleo de amêndoa de babaçu: álcool metílico considerada foi de 1:6, sendo necessário trabalhar com excesso de álcool para obter um maior grau de conversão e formação de um produto mais favorável.

O catalisador utilizado foi o hidróxido de potássio (KOH), um catalisador homogêneo básico, sendo o tipo mais utilizado para reações de transesterificação em escala industrial, visto que permite alcançar um bom rendimento em um curto período de tempo. Na utilização deste catalisador a temperatura não deve ultrapassar 60 °C, pois acima disso, pode ocorrer aceleração no processo de saponificação dos glicerídeos. O valor da dosagem do hidróxido de potássio (KOH) adotado foi de 1 %, com rendimento de 88,34 %.

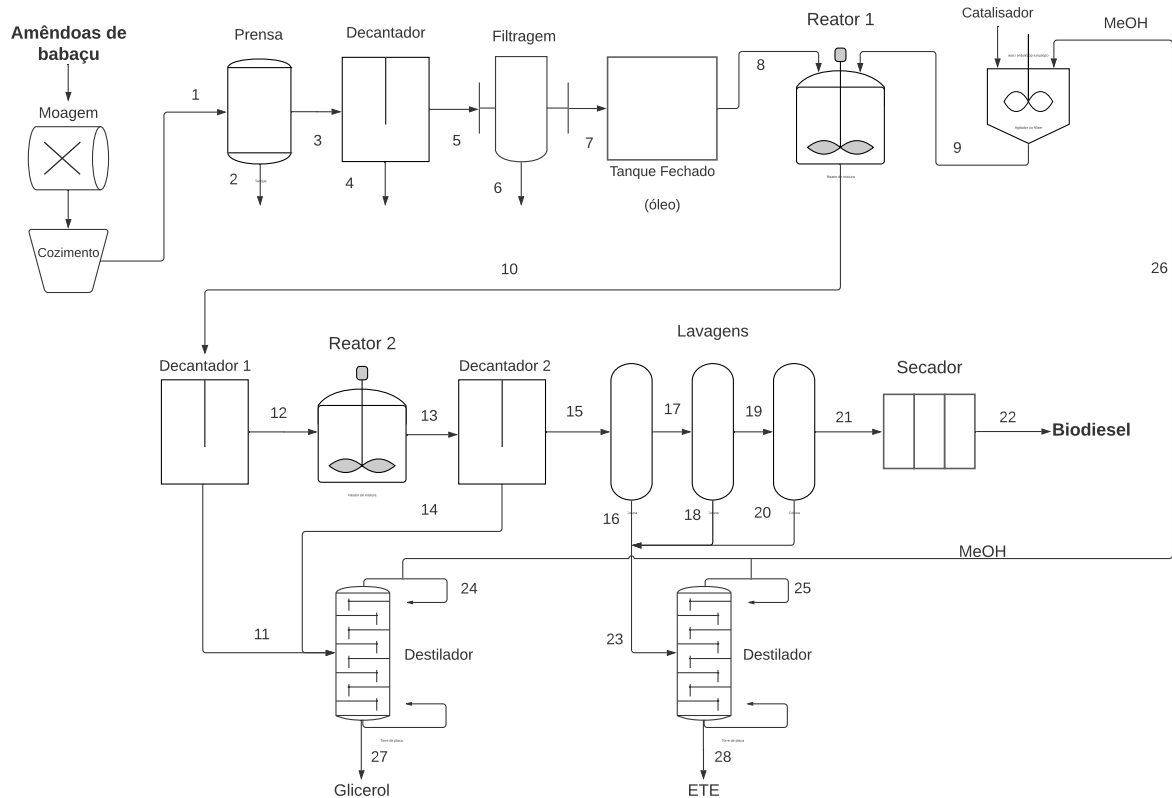
Portanto, foram utilizados como base no estudo a relação: razão molar óleo de babaçu: álcool metílico 1:6, 1 % de catalisador homogêneo básico (KOH), rendimento de 88,34 % e temperatura de 60 °C conforme (SANTOS et al., 2015) apresentado na seção 5.2.1.

A Figura 11 apresenta o fluxograma de processos da usina piloto de produção de biodiesel a partir do óleo de amêndoas do babaçu, desde a matéria prima comprada até o produto final.

6.2.1 Balanço de massa

Para o balanço de massa do processo, foi adotado uma base de cálculo de 100 kg/h de amêndoas de babaçu. Estas alimentam a corrente 1 de prensagem, onde são extraídos 62,8 % de óleo de acordo com (STACHIW et al., 2016) e 37,8 % de torta. Os cálculos a seguir foram feitos com base no fluxograma de processos, e as correntes a seguir podem ser vistas na Figura 11.

Figura 11 – Fluxograma de processo com identificação das correntes.



Fonte: Autores, 2021.

Corrente 1 = 100 kg/h (amêndoas)

Corrente 2 = Torta

Corrente 3 = óleo extraído ($\eta = 62,8\%$)

Corrente 1 = Corrente 2 + Corrente 3

$$100 = \text{Corrente 2} + (0,628 \times 100)$$

Corrente 2 = 37,2 kg/h

Corrente 3 = 62,8 kg/h

Em seguida, esse óleo é alimentado no decantador, onde ocorre a separação da fase líquida, dos resíduos sólidos que sedimentam. Nesta etapa, foi admitido que não houve a presença de sólidos sedimentáveis, portanto, será considerado que a corrente que alimenta o decantador tem o mesmo valor e composição da corrente que alimenta o filtro.

A corrente que sai do decantador segue para filtragem, onde foi assumido 5 % de produção de borra 3,14 kg/h, e obtido 59,66 kg/h de óleo filtrado, sendo essa a corrente de alimentação do reator 1.

$$\text{Corrente 3} = \text{Corrente 5} = 62,8 \text{ kg/h}$$

$$\text{Corrente 6} \rightarrow 5\% \text{ de formação de borra}$$

$$\text{Corrente 7} = \text{óleo extraído}$$

$$\text{Corrente 5} = \text{Corrente 6} + \text{Corrente 7}$$

$$62,8 = (0,05 \times 62,8) + \text{Corrente 7}$$

$$\text{Corrente 7} = 59,66 \text{ kg/h}$$

Para os cálculos de conversão de biodiesel, a corrente que está apresentada em vazão mássica, será convertida em vazão molar.

Para calcular a vazão molar será necessário obter o valor de massa molar média do óleo de babaçu Equação (1), sendo primeiramente calculada a massa molar média dos ânions carboxilatos Equação (2), a partir da massa molar e porcentagem dos ácidos graxos adotados.

A tabela 4 indica as porcentagens e massas molares dos ácidos graxos presentes no óleo de babaçu.

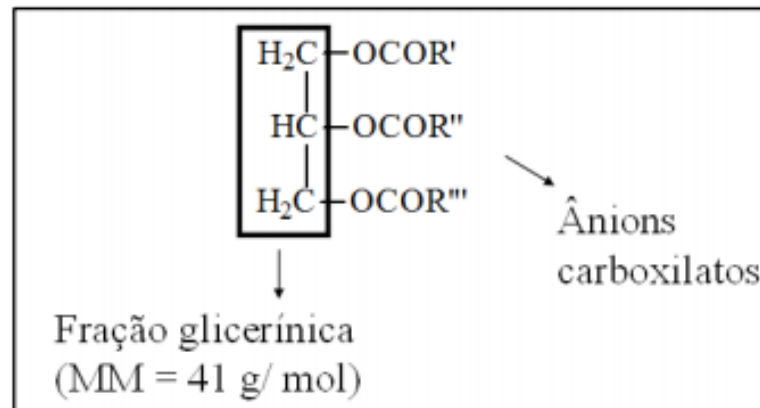
Tabela 4 – Percentuais de ácidos graxos e suas massas molares no óleo de babaçu

Tipos de ácido	Massa Molar	%
Ácido caprílico	144	5 %
Ácido cáprico	172	6 %
Ácido láurico	200	44 %
Ácido mirístico	228	17 %
Ácido palmítico	256	8 %
Ácido esteárico	284	4 %
Ácido oléico	282	14 %
Ácido linoléico	289	2 %

Fonte: Nascimento et al., 2009.

A figura 12 apresenta os ânions dos ésteres que formam o biodiesel.

Figura 12 – Ânions carboxilatos presentes nos triglicerídeos.



Fonte: Ciconello, 2018.

Para obter o valor da massa molar média do biodiesel, primeiramente será calculada a massa molar média dos ânions carboxilatos (Equação 1), a partir da massa molar e porcentagem dos ácidos graxos. Este valor será utilizado posteriormente para dar sequência na determinação da vazão de biodiesel.

$$\overline{MM}_{\text{ânion carboxila}} = \frac{\sum [MM_{\text{ác. graxo}} - MM_H] \times P}{100} \quad (1)$$

Sendo que:

$\overline{MM}_{\text{ânion carboxila}}$ = Massa molar média dos ânions carboxilatos (g/mol).

$\overline{MM}_{\text{ác. graxo}}$ = Massa molar de cada ácido graxo (g/mol).

\overline{MM}_H = Massa molar do hidrogênio (g/mol).

P = porcentagem do ácido graxo no óleo (%).

Calculando a massa molar média do ânion carboxila foi obtido o valor de:

$$\overline{MM}_{\text{ânion carboxila}} = 220,3 \text{ g/mol}$$

Encontrada a massa molar média do ânion carboxila, pode-se calcular a massa molar média do óleo de acordo com a seguinte equação:

$$\overline{MM}_{\text{óleo}} = 3 \times \overline{MM}_{\text{ânion carboxila}} + \overline{MM}_{\text{fração glicerínica}} \quad (2)$$

$$\overline{MM}_{\text{óleo}} = 701,9 \text{ g/mol ou kg/kmol}$$

A massa molar média do óleo de babaçu a partir da Equação (2) foi de 701,9 g/mol considerando a massa molar da fração de glicerínica 41 g/mol, como mostra a Figura 12. Para realizar o cálculo estequiométrico no reator 1, foi necessário converter a vazão mássica para vazão molar para facilitar os cálculos e levar em consideração a massa molar.

$$\text{Corrente 8} = \frac{\text{Corrente 7}}{\overline{MM}_{\text{oleo}}}$$

$$\text{Corrente 8} = \frac{59,66 \text{ kg/h}}{701,9 \text{ kg/kmol}} = 0,085 \text{ kmol/h}$$

$$\text{Corrente 8} = 85 \text{ mol/h}$$

No reator 1 acontece a primeira reação de transesterificação. No início, a vazão molar de entrada no reator é de 85 kmol/h de óleo (corrente 8), como a reação é reversível, foi necessário trabalhar com excesso de álcool 1:6, dessa maneira, a entrada de metanol e de catalisador foi de 0,4062 kmol/h e 0,475 kg/h respectivamente. O catalisador corresponde a 1 % em massa em relação ao óleo de babaçu alimentado. Nesse começo não há a presença de éster e glicerol.

Na reação, o rendimento considerado foi de 88,34 % conforme a seção 5.2.1, assim são consumidos 75,1 mol/h de óleo e 225,3 mol/h de metanol, gerando 225,3 mol/h de éster e 75,1 mol/h de glicerol. Na saída do reator 1, há a presença de 9,9 mol/h de óleo e 284,7 mol/h de metanol, juntamente com 0,5966 kg/h de catalisador, 225,3 mol/h de biodiesel e 75,1 mol/h de glicerol.

Os cálculos realizados podem ser vistos na Tabela 5 a seguir, onde foram feitos os balanços da primeira reação de transesterificação.

Tabela 5 – Tabela de balanço 1

	Óleo [mol/h]	3 Metanol [mol/h]	→	3 Éster [mol/h]	Glicerol [mol/h]
Início	85	$6 \times 85 = 510$		0	0
Reação	$85 \times 0,8834 = 75,1$	$75,1 \times 3 = 225$		$75,1 \times 3 = 225$	75,1
Equilíbrio	$85 - 75,1 = 9,9$	$510 - 225,3 = 284,7$		225,3	75,1

Fonte: Autores, 2021.

Do reator 1 sai uma corrente reacional (corrente 10) formada por biodiesel, glicerol, óleo, metanol não convertidos e o catalisador. Essa corrente é enviada ao decantador 1 para separar a mistura em duas fases.

No decantador 1, acontece a primeira separação da fase superior da fase inferior. A fase superior é composta por óleo de babaçu, metanol emulsionado que não reagiu e biodiesel, que será enviada para a alimentação do reator 2. As vazões mássicas dos compostos são de 53,297 kg/h de biodiesel, 6,956 kg/h de óleo não convertido e 3,644 kg/h de metanol emulsionado, pois foi adotado que 40 % do metanol fica retido na fase superior (COSTA, 2009). Logo, a vazão total da fase superior é de 63,898 kg/h.

Corrente 12 : → Fase Superior

$$\dot{m}_{\text{biodiesel}} = 0,2253 \text{ kmol/h} \times 236,6 \text{ kg/kmol} = 53,297 \text{ kg/h}$$

$$\dot{m}_{\text{óleo}}^{nc} = 0,0099 \text{ kmol/h} \times 701,9 \text{ kg/kmol} = 6,956 \text{ kg/h}$$

$$\dot{m}_{\text{CH}_3\text{OH}}^{R1} = 0,2847 \text{ kg/h} \times 32 \text{ kg/kmol} = 9,111 \text{ kg/h}$$

$$\dot{m}_{\text{CH}_3\text{OH}}^{fs} = 0,40 \times \dot{m}_{\text{CH}_3\text{OH}}^{R1}$$

$$\dot{m}_{\text{CH}_3\text{OH}}^{fs} = 0,40 \times 9,111 = 3,644 \text{ kg/h}$$

$$\text{Corrente 12} = 53,297 + 6,956 + 3,644 = 63,898 \text{ kg/h}$$

A fase inferior é composta pelo glicerol, catalisador e metanol. Essa fase será enviada para o tanque de glicerina bruta. As vazões mássicas dos compostos são de 6,908 kg/h de glicerol, 0,5966 kg/h de catalisador e 5,467 kg/h de metanol, pois foi adotado 60 % que fica retido na fase inferior (COSTA, 2009). Portanto, a vazão total da fase inferior é de 12,971 kg/h.

Corrente 11 : → Fase Inferior

$$\dot{m}_{\text{CH}_3\text{OH}}^{sep} = 0,60 \times \dot{m}_{\text{CH}_3\text{OH}}^{R1}$$

$$\dot{m}_{\text{CH}_3\text{OH}}^{sep} = 0,60 \times 9,111 = 5,467 \text{ kg/h}$$

$$\dot{m}_{\text{KOH}} = 0,5966 \text{ kg/h}$$

$$\dot{m}_{\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3} = \dot{n}_{\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3} \times \text{MM}_{\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3}$$

$$\dot{m}_{\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3} = 0,0751 \text{ kmol/h} \times 92 \text{ kg/kmol} = 6,908 \text{ kg/h}$$

$$\text{Corrente 11} = 5,467 + 0,5966 + 6,908 = 12,971 \text{ kg/h}$$

No reator 2 ocorre o mesmo procedimento que no reator 1, o objetivo é converter em biodiesel o óleo que não foi convertido anteriormente.

No início, a vazão molar de entrada é de 9,9 mol/h de óleo, 173,4 mol/h de metanol, 0,008 11 kg/h de catalisador (1 % em massa em relação ao óleo de babaçu alimentado), 225,3 mol/h de biodiesel e não há presença de glicerol.

Na reação, o rendimento é de 88,34 %, assim são consumidos 8,75 kmol/h de óleo e 26,3 mol/h de metanol, gerando 26,3 mol/h de biodiesel e 8,75 kmol/h de glicerol.

Na saída do reator 2 há a presença de 1,15 mol/h de óleo, 147,1 mol/h de metanol, 251,6 mol/h de biodiesel, 8,75 mol/h de glicerol e 0,06 kg/h de catalisador compondo a corrente 13.

Os cálculos realizados podem ser vistos na Tabela 6, onde foram feitos os balanços da segunda reação de transesterificação.

Tabela 6 – Tabela de balanço 2

	Óleo [kmol/h]	3 Metanol [kmol/h]	→ 3 Éster [kmol/h]	Glicerol [kmol/h]
Início	9,9	173,4	225,3	0
Reação	$9,9 \times 0,8834 = 8,75$	$3 \times 8,75 = 26,3$	$3 \times 8,75 = 26,3$	8,75
Equilíbrio	$9,9 - 8,75 = 1,15$	$173,4 - 26,3 = 147,1$	215,60	8,75

Fonte: Autores, 2021.

Essa corrente é enviada ao decantador 2 para novamente separar a mistura reacional em duas fases. No decantador 2, que tem a mesma função do decantador 1, ou seja, separar a fase superior da fase inferior. A fase superior que contém biodiesel, óleo e metanol foi enviada para as lavagens (corrente 15). As vazões mássicas dos compostos são de 59,51 kg/h de biodiesel, 0,811 kg/h de óleo e 1,883 kg/h de metanol, pois foi adotado 40 % do metanol que fica retido na fase superior (COSTA, 2009). A vazão total da fase superior é de 61,34 kg/h.

Corrente 15 : → Fase Superior

$$\dot{m}_{\text{biodiesel}} = 0,2515 \text{ kmol/h} \times 236,6 \text{ kg/kmol} = 59,11 \text{ kg/h}$$

$$\dot{m}_{\text{óleo}}^{nc} = 0,00116 \text{ kmol/h} \times 701,9 \text{ kg/kmol} = 0,811 \text{ kg/h}$$

$$\dot{m}_{\text{CH}_3\text{OH}}^{R2} = 0,1471 \text{ kg/h} \times 32 \text{ kg/kmol} = 4,7069 \text{ kg/h}$$

$$\dot{m}_{\text{CH}_3\text{OH}}^{fs} = 0,40 \times \dot{m}_{\text{CH}_3\text{OH}}^{R2}$$

$$\dot{m}_{\text{CH}_3\text{OH}}^{fs} = 0,40 \times 4,7069 = 1,883 \text{ kg/h}$$

$$\text{Corrente 15} = 59,11 + 0,811 + 1,883 = 61,34 \text{ kg/h}$$

A fase inferior contém glicerol, catalisador e metanol que será enviada para o tanque de glicerina bruta. As vazões mássicas são de 0,81 kg/h de glicerol, 2,82 kg/h de metanol e 0,0081 kg/h de catalisador. A vazão total é de 3,64 kg/h.

Corrente 14 : → Fase Inferior

$$\dot{m}_{\text{CH}_3\text{OH}}^{\text{sep}} = 0,60 \times \dot{m}_{\text{CH}_3\text{OH}}^{\text{R2}}$$

$$\dot{m}_{\text{CH}_3\text{OH}}^{\text{sep}} = 0,60 \times 4,7069 = 2,82 \text{ kg/h}$$

$$\dot{m}_{\text{KOH}} = 0,0081 \text{ kg/h}$$

$$\dot{m}_{\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3} = \dot{n}_{\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3} \times \text{MM}_{\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3}$$

$$\dot{m}_{\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3} = 0,00876 \text{ kmol/h} \times 92 \text{ kg/kmol} = 0,805 \text{ kg/h}$$

$$\text{Corrente 14} = 2,82 + 0,0081 + 0,805 = 3,64 \text{ kg/h}$$

Na etapa das lavagens, foi necessário repetir a operação três vezes para alcançar uma maior pureza no biodiesel. Na síntese de biodiesel pela rota alcalina homogênea normalmente são consumidos 3 L de água de lavagem para cada 1 L de biodiesel produzido. Essas águas de lavagem devem passar por um processo de destilação para recuperar o metanol que estava emulsionado no biodiesel e enviadas para a estação de tratamento de efluentes (BONI et al., 2007 apud AFONSO; YOKOYAMA; CAMMAROTA, 2017).

Portanto, será necessário determinar a vazão mássica de biodiesel para depois determinar a sua vazão volumétrica. Para calcular a vazão mássica, foi necessário utilizar o valor da massa molar média do biodiesel.

Na lavagem com água acidulada, entra uma corrente de 0,2527 kmol/h de biodiesel e óleo não convertido. O objetivo dessa primeira lavagem é neutralizar os possíveis resíduos de KOH que podem ter ficado emulsionados junto com o metanol.

Da saída do reator 2, para simplificação de cálculos, as vazões de biodiesel e óleo não convertido foram somadas e considerada uma vazão total de fase oleosa para cálculo da vazão da água de lavagem.

$$\dot{n}_{\text{biodiesel}} = 0,2515 \text{ kmol/h}$$

$$\dot{n}_{\text{óleo}}^{nc} = 0,00116 \text{ kmol/h}$$

$$\dot{n}_{\text{F.Oleosa}} = \dot{n}_{\text{biodiesel}} + \dot{n}_{\text{óleo}}^{nc} = 0,2527 \text{ kmol/h}$$

Para obtenção da vazão mássica da fase oleosa foi necessário obter a massa molar média do biodiesel:

$$\overline{MM}_{\text{biodiesel}} = \overline{MM}_{\text{ânion carboxila}} + \overline{MM}_{\text{radical metil}}$$

$$\overline{MM}_{\text{ânion carboxila}} = 220,3 \text{ g/mol}$$

$$\overline{MM}_{\text{radical metil}} = 15 \text{ g/mol}$$

$$\overline{MM}_{\text{biodiesel}} = 220,3 + 15 = 235,3 \text{ kg/kmol}$$

$$\dot{m}_{\text{F.Oleosa}} = \dot{n}_{\text{F.Oleosa}} \times \overline{MM}_{\text{biodiesel}}$$

$$\dot{m}_{\text{F.Oleosa}} = 0,2515 \text{ kmol/h} \times 235,3 \text{ kg/kmol}$$

$$\dot{m}_{\text{F.Oleosa}} = 59,46 \text{ kg/h}$$

$$\bar{\rho}_{\text{biodiesel}} = 0,88 \text{ g/cm}^3 = 880 \text{ kg/m}^3$$

$$\dot{V}_{\text{F.Oleosa}} = \dot{m}_{\text{F.Oleosa}} / \bar{\rho}_{\text{biodiesel}}$$

$$\dot{V}_{\text{F.Oleosa}} = 59,46 / 880$$

$$\dot{V}_{\text{F.Oleosa}} = 0,0676 \text{ m}^3/\text{h}$$

Portanto, para cada 1 L de óleo tem se 3 L de água:

$$\dot{V}_{\text{H}_2\text{O}}^{lav} = 3 \times \dot{V}_{\text{F.Oleosa}}$$

$$\dot{V}_{\text{H}_2\text{O}}^{lav} = 3 \times 0,0676$$

$$\dot{V}_{\text{H}_2\text{O}}^{lav} = 0,2027 \text{ m}^3/\text{h}$$

A vazão volumétrica de água de lavagem obtida deve ser convertida em vazão mássica:

$$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}^{lav} = 0,2027 \text{ m}^3/\text{h} \times 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}^{lav} = 202,7 \text{ kg/h}$$

Foi considerado que em todas as etapas de lavagens, 0,5 % da água ficou emulsionada na fase oleosa (COSTA, 2009).

$$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{emul}} = 0,005 \times 202,7$$

$$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{emul}} = 1,01 \text{ kg/h}$$

O restante da água, solubiliza o metanol que estava emulsionado na fase oleosa:

$$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{n.emul}} = 0,995 \times 202,7$$

$$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{n.emul}} = 201,6 \text{ kg/h}$$

A vazão de água de lavagem não emulsionada com o metanol é a corrente 23, formada pela soma das correntes 16, 18 e 20.

$$\text{Corrente 23} = \dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{n.emul}} + \dot{m}_{\text{CH}_3\text{OH}}$$

$$\text{Corrente 23} = 201,6 + 1,88$$

$$\text{Corrente 23} = 203,56 \text{ kg/h}$$

Antes de ser direcionada para a ETE, a água de lavagem deve passar por uma coluna de destilação para fazer a recuperação do metanol:

$$\text{Corrente 23} = 203,56 \text{ kg/h}$$

$$\dot{m}_{\text{CH}_3\text{OH}} = 1,88 \text{ kg/h}$$

$$[\text{CH}_3\text{OH}] = 1,88/203,56$$

$$[\text{CH}_3\text{OH}] = 0,009325 \text{ (0,9325 \%)}$$

Para o balanço de massa na coluna de destilação para recuperação do metanol: 99,95 % de metanol no topo da coluna e 0,05 % de metanol no fundo da coluna (COSTA, 2009).

$$\text{Corrente 25} = \dot{m}_{\text{prod}}^{\text{top}}$$

$$\text{Corrente 28} = \dot{m}_{\text{prod}}^{\text{bot}}$$

Balanço Material Total (BMT):

$$\text{Corrente 23} = \text{Corrente 25} + \text{Corrente 28}$$

$$203,56 = \text{Corrente 25} + \text{Corrente 28}$$

Balanço Material Parcial (BMP) para o metanol:

$$10,009\,325 \times \text{Corrente 23} = 0,9995 \times \text{Corrente 25} + 0,0005 \times \text{Corrente 28}$$

$$0,009\,325 \times 203,56 = 0,9995 \times \text{Corrente 25} + 0,0005 \times (203,56 - \text{Corrente 25})$$

$$1,900 = 0,9995 \times \text{Corrente 25} + 0,102 - 0,0005 \times \text{Corrente 25}$$

$$0,9990 \times \text{Corrente 25} = 1,796$$

$$\text{Corrente 25} = 1,798 \text{ kg/h}$$

$$\text{Corrente 28} = 203,56 - 1,798$$

$$\text{Corrente 28} = 201,76 \text{ kg/h}$$

Vazão de metanol recuperado no topo da coluna na corrente 25:

$$\dot{m}_{\text{CH}_3\text{OH}}^{\text{top}} = \text{Comp}_{\text{CH}_3\text{OH}}^{\text{top}} \times \dot{m}_{\text{prod}}^{\text{top}}$$

$$\dot{m}_{\text{CH}_3\text{OH}}^{\text{top}} = 0,9995 \times 1,798$$

$$\dot{m}_{\text{CH}_3\text{OH}}^{\text{top}} = 1,797 \text{ kg/h}$$

Vazão de metanol perdido no fundo da coluna na corrente 28:

$$\dot{m}_{\text{CH}_3\text{OH}}^{\text{bot}} = \text{Comp}_{\text{CH}_3\text{OH}}^{\text{bot}} \times \dot{m}_{\text{prod}}^{\text{bot}}$$

$$\dot{m}_{\text{CH}_3\text{OH}}^{\text{bot}} = 0,0005 \times 201,76$$

$$\dot{m}_{\text{CH}_3\text{OH}}^{\text{bot}} = 0,101 \text{ kg/h}$$

Portanto, o metanol recuperado da água de lavagem é de 1,797 kg/h e será encaminhado para o tanque de mistura. Nessa operação, uma corrente de 0,101 kg/h de metanol é perdida no fundo da coluna de destilação junto com a água de lavagem que vai para a Estação de Tratamento de Esgoto (ETE). A corrente total de água mais metanol que vai para ETE é de 201,76 kg/h.

Com relação ao glicerol, da fase inferior dos decantadores, que contém metanol e catalisador, pode ser considerado que o metanol é completamente recuperado. As fases inferiores são enviadas para o tanque de glicerina bruta e na sequência acontece a recuperação do metanol.

Do decantador 1:

$$\text{Corrente 11} = 0,5966 + 5,467 + 6,908$$

$$\text{Corrente 11} = 12,971 \text{ kg/h}$$

Do decantador 2:

$$\text{Corrente 14} = 0,0081 + 2,82 + 0,805$$

$$\text{Corrente 14} = 3,64 \text{ kg/h}$$

Portanto, o metanol recuperado na corrente 24 é de:

$$\dot{m}_{\text{CH}_3\text{OH}}^{\text{rec}} = 5,467 + 2,82 = 8,287 \text{ kg/h}$$

Dessa maneira, o metanol total reciclado para o processo é o metanol recuperado da glicerina bruta e o metanol recuperado da água de lavagem. A vazão total na corrente 26 é de:

$$\dot{m}_{\text{CH}_3\text{OH}}^{\text{tot}} = \text{Corrente 24} + \text{Corrente 25}$$

$$\dot{m}_{\text{CH}_3\text{OH}}^{\text{tot}} = 8,287 + 1,88$$

$$\dot{m}_{\text{CH}_3\text{OH}}^{\text{tot}} = 10,167 \text{ kg/h}$$

O glicerol que vai para a recuperação é constituído de glicerol mais catalisador. Somando as correntes dos dois decantadores, o valor total da corrente é de:

$$\text{Corrente 27} = 6,908 + 0,5966 + 0,805 + 0,008$$

$$\text{Corrente 27} = 8,3176 \text{ kg/h}$$

A fase oleosa, depois de passar pelas águas de lavagem, é enviada para o secador para separar a água emulsionada e finalmente liberar o produto final, o biodiesel purificado. A vazão que entra no secador é a mesma que sai das águas de lavagem:

$$\text{Corrente 21} = \dot{m}_{F,\text{Oleosa}} + \dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{emul}}$$

$$\text{Corrente 21} = 59,46 + 1,01$$

$$\text{Corrente 21} = 60,47 \text{ kg/h}$$

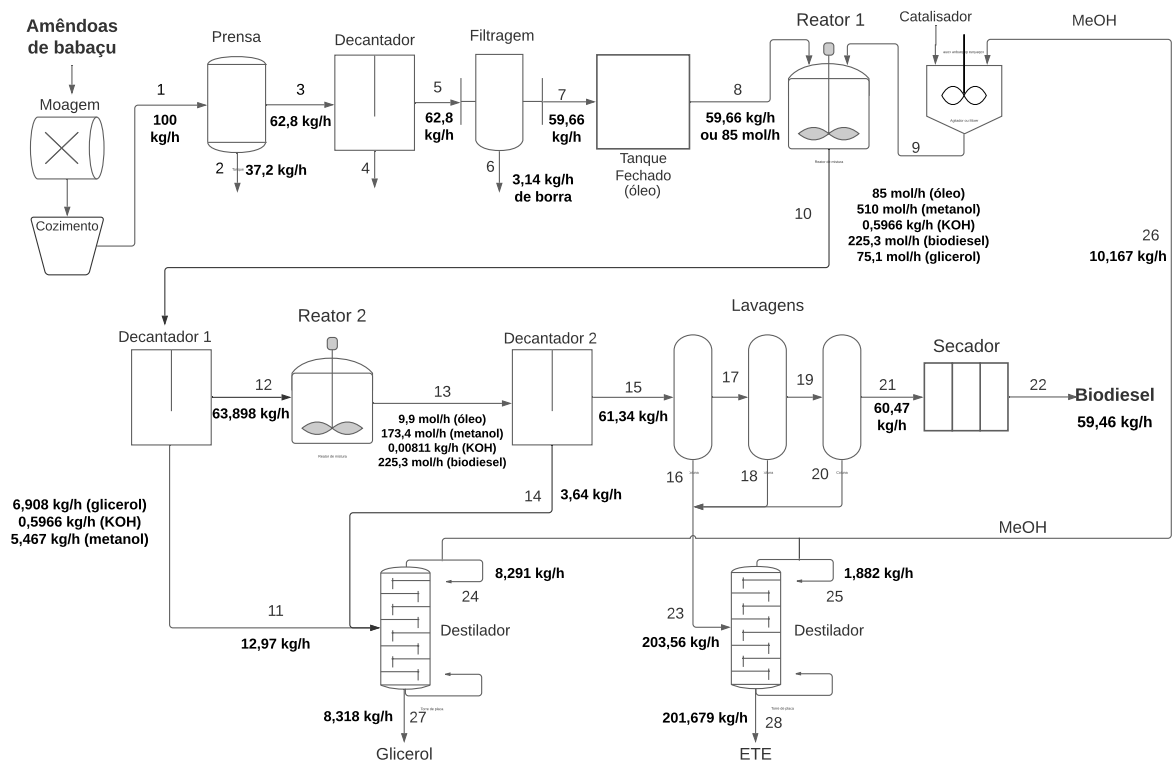
$$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{evap}} = 1,01 \text{ kg/h} \therefore$$

$$\text{Corrente 22} = 60,47 \text{ kg/h} - 1,01 \text{ kg/h}$$

$$\text{Corrente 22} = 59,46 \text{ kg/h}$$

A figura 13 apresenta o fluxograma de processo com os valores das correntes para melhor identificação dos dados. Os valores em kmol/h mostrados nas saídas dos reatores foram convertidos para vazão molar no início dos cálculos, como citado nesta seção, para facilitar o balanço material.

Figura 13 – Fluxograma de processo e valores das correntes.



Fonte: Autores, 2021.

A partir de uma carga de 100 kg/h de amêndoas de babaçu, considerando que após a prensagem obteve-se 62,8 kg/h de óleo, foi possível produzir 59,46 kg/h de biodiesel, além do reaproveitamento de metanol que seria descartado juntamente com as águas de lavagem.

7 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As operações iniciais foram baseadas no trabalho manual das quebradeiras de coco, e o balanço de massa realizado começou a partir da operação de prensagem. Os valores de rendimento obtidos em cada operação foram retirados de literaturas consultadas.

Independentemente do tipo de matéria prima, foram observados graus de conversão de óleo em biodiesel maiores que 90% nas pesquisas realizadas, porém para a realização desse trabalho foi levado em conta uma referência de produção de biodiesel a partir óleo de babaçu em que o rendimento observado foi de 88,34%. Também é importante ressaltar que os parâmetros reacionais da operação adotados foram: 1% de catalisador alcalino (KOH), temperatura de 60°C, relação molar óleo: álcool de 1:6 e o álcool escolhido foi o metanol.

A base de cálculo adotada para realização do balanço de massa foi de uma alimentação de 100 kg/h de amêndoas de babaçu. Todos os cálculos realizados para as operações unitárias foram em base mássica e somente nos reatores foi adotado a base molar para análise da reação de transesterificação.

As operações unitárias aplicadas depois da reação de transesterificação foram essenciais para garantir a pureza do produto obtido, reciclar o metanol que foi utilizado em excesso na reação com o objetivo de aumentar o grau de conversão do óleo de babaçu e minimizar o custo com o consumo de reagentes. Dessa maneira tornando o processo viável em escala industrial.

Na operação de prensagem, foi-se considerado um rendimento de 62,8% de óleo extraído, fornecendo uma vazão de produção igual a 62,8 kg/h de óleo de babaçu. Na sequência, essa corrente passou pelo processo de filtração, com o intuito de realizar a separação de resíduos sólidos que ficaram presentes no óleo após a prensagem. Dessa maneira, o óleo filtrado enviado para o reator de transesterificação foi de 59,66 kg/h. É importante ressaltar, que o grau de acidez do óleo de babaçu foi considerado dentro da especificação, para que a reação de transesterificação por catálise alcalina homogênea fosse realizada.

A reação de transesterificação foi realizada em duas etapas, sendo entre o reator 1 e o reator 2. Em base molar, no reator 1 foi alimentado 0,0850 kmol/h de óleo de babaçu e obtido 0,2253 kmol/h de biodiesel.

No decantador 1, houve um processo de separação entre a fase superior e inferior. A superior é formada por óleo, biodiesel e cerca de 40% de metanol emulsionada, já a inferior é formada por glicerol, metanol e catalisador. Após a separação de fase no decantador 1, uma corrente de 0,0099 kmol/h de óleo de babaçu foi alimentado ao reator 2 e foi produzido mais

0,0263 kmol/h de biodiesel. Novamente a mistura reacional passou por um processo de separação de fases no decantador 2.

Como o biodiesel produzido continha metanol emulsionado e resíduos de catalisador foi feita uma lavagem, primeiro com água acidulada e outras duas etapas com água neutra para a sua purificação. Dessa operação, cerca de 0,5% da água utilizada ficou emulsionada na corrente do biodiesel purificado, resultando em uma vazão convertida em base mássica no valor de 60,47 kg/h. Em seguida, ocorreu a operação de secagem para a evaporação dessa água emulsionada e o biodiesel total produzido foi de 59,46 kg/h.

Sobre o metanol utilizado, cerca de 40% ficaram emulsionado no biodiesel e o restante junto com o glicerol. Em ambos os casos, a sua recuperação aconteceu em colunas de destilação: na primeira, o metanol foi separado do glicerol e na segunda foi separado das águas de lavagens. A quantidade de metanol necessária ao processo para atender a proporção óleo:metanol de 1:6 em base mássica foi de 21,87 kg/h e o total de metanol reciclado ao processo foi de 10,17 kg/h, portanto cerca de 46,50% do metanol utilizado no processo foi reciclado.

Sobre o glicerol, subproduto do processo foi gerado uma corrente de 7,713 kg/h contaminada com catalisador e resíduos do processo que pode ser destinada para a purificação e reaproveitamento para outras indústrias. Portanto, em um processo que utiliza do trabalho manual das quebradeiras e depois da aplicação das operações unitárias e processos químicos, este inicia através de 59,66 kg/h de óleo de amêndoa de babaçu, e ao fim obteve-se 59,46 kg/h de biodiesel, pode-se considerar uma taxa de conversão de 99,66%.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Partindo do ponto de vista ambiental, vimos que as reservas diminuem enquanto o consumo de derivados do petróleo aumenta, e a queima desses produtos contribui de forma significativa com as emissões atmosféricas. Leva-se em consideração também, os problemas políticos e econômicos os quais afetam o preço do barril de petróleo, refletindo diretamente no preço de seus produtos finais.

O biodiesel é uma fonte de energia renovável, e sua produção colabora com o desenvolvimento de regiões produtivas. No Brasil, há muitas terras cultiváveis, com uma enorme variedade de oleaginosas, o que favorece a economia pois contribui para a geração de empregos no setor primário, ampliando o mercado de trabalho, salvo a importância para o desenvolvimento social e valorização dos recursos energéticos de grande importância para autonomia do país e desenvolvimento sustentável.

O incentivo a atividade produtiva pode ser considerado um caminho capaz de mudanças no quesito pobreza, pois a potencialização da cadeia produtiva do babaçu, favorece a geração de empregos, o compromisso ambiental, social, e a busca por novas tecnologias com o intuito de valorização de novas formas e técnicas de organizar o trabalho já desempenhado principalmente pelas mulheres quebradeiras-de-coco, trazendo dignidade e segurança para o ofício.

Das amêndoas de babaçu pode ser extraído um óleo que tem características físico-químicas que permitem obter um biodiesel de excelente qualidade, pois na composição química do óleo de babaçu predominam os triglicerídeos de cadeia saturada que fazem com que esse biodiesel tenha maior estabilidade química e resistência a oxidação.

Devido as características físico-químicas do biodiesel, além de possuir alto número de cetano, índice responsável por medir a qualidade de ignição de um combustível quando utilizado em motores a diesel, entorno de 60 em comparação ao diesel (cerca de 48 a 52) conforme (BIODIESEL, 2011), o biodiesel queima muito melhor em motores de ciclo diesel do que o próprio diesel mineral, uma vez que os veículos atuais demandam combustíveis com elevado número de cetano. Este possui outras propriedades como não causar corrosão nos motores, possuir menor densidade que melhora a partida do veículo, entre outras. É nítido o quão importante é a adição desse combustível como complemento do diesel para futuramente termos seu uso integral nos motores, porém é necessário que haja demanda para futuramente chegarmos a essa meta e para isso é de extrema importância que o governo crie políticas de desenvolvimento e incentivo ao seu uso.

Além da produção do biodiesel há também a produção de subprodutos como o glicerol que apresenta grande aplicação na indústria química na síntese de resinas e ésteres, na indústria farmacêutica e na fabricação de cosméticos. A glicerina bruta advinda do processo, é vendida para empresas que a purificam e a utilizam nos processos industriais. Também há como subprodutos a borra e a torta que são usados na produção de ração animal, onde a torta de babaçu vem sendo usada como suplemento proteico na alimentação de bovinos de leite, no qual estimula o aumento do teor de gordura do leite produzido, e a principal aplicabilidade do suplemento vem sendo em ruminantes, já em animais não ruminantes sua utilização é pouco conhecida (ANDRIGUETO, 1999; SILVA, 2009 apud FERREIRA et al., 2011).

A partir dos parâmetros adotados para o processo como o uso do catalisador alcalino homogêneo, que apresenta um bom rendimento e entre as opções, melhor custo benefício para produção em larga escala, apesar dessa rota precisar de tratamento residual uma vez que o catalisador não pode ser recuperado, a relação molar óleo:álcool de 1:6, a adesão da temperatura de processo de $60^{\circ}C$ e a utilização de dois reatores. Obteve-se bons resultados, os quais contribuíram para a eficácia da reação.

Dessa maneira, comparando a quantidade de óleo alimentado ao processo com a quantidade de biodiesel produzido, em base mássica, foi encontrado um rendimento maior do que 90%, ou seja, houve uma alta produtividade no processo proposto. Portanto, pode ser concluído que o objetivo deste trabalho foi atingido, pois foi possível propor o projeto de uma usina piloto com uma alternativa de matéria prima para a produção de biodiesel que pudesse incentivar uma cultura produtiva local e que oferecesse um produto de alta qualidade e produtividade.

REFERÊNCIAS

AFONSO, Luana F.; YOKOYAMA, Lidia; CAMMAROTA, Magali C. II-208-Avaliação de Tecnologias de Tratamento para Reúso de Efluente na Indústria de Biodiesel, 2017.

ANP - AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, Gás Natural e Biocombustíveis. 2020. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-e-fornecimento-de-biocombustiveis/biodiesel>>. Acesso em: 29 mar. 2021.

ANP - AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, Gás Natural e Biocombustíveis. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/canais_atendimento/imprensa/noticias-comunicados/mistura-de-biodiesel-ao-diesel-passa-a-ser-de-13-a-partir-de-hoje-1-3>. Acesso em: maio 2021.

ANTONIASSI, Rosemar. Agência Embrapa de Informação Tecnológica. Prensagem em Pequena Escala. 2021. Disponível em: <<https://url.gratis/1FQvmk>>. Acesso em: maio 2021.

BARROS, Talita Delgrossi de; JARDINE, José G. Agência Embrapa de Informação Tecnológica. 2021. Disponível em: <<https://bityli.com/rUIFK>>. Acesso em: abr. 2021.

BETA EQ, Engenharia Química. Produção de biodiesel. 2017. Disponível em: <<https://betaeq.com.br/index.php/2017/06/19/producao-de-biodiesel/>>. Acesso em: abr. 2021.

BIODIESEL, BR. Propriedades Físicas e Químicas do Biodiesel. Set. 2011. Disponível em: <<shorturl.at/ahjJN>>. Acesso em: nov. 2021.

BONI, Ld et al. Tratamento físico-químico da água de lavagem proveniente da purificação do biodiesel. Tche-química, v. 7, p. 41–50, 2007.

CARRAZZA, L. R.; ÁVILA, J. C. C.; SILVA, M. L. da. Manual Tecnológico de aproveitamento integral do fruto e da folha do babaçu (*Attalea spp.*) Brasília - DF. Instituto Sociedade, População e Natureza (ISPN), 2012.

CICONELLO, Wellinton dos Santos. Produção de biodiesel a partir de óleo residual de frango. 2018. B.S. thesis – Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

COSTA, Regiane Adelina Borella. Estudo das eficiências de operação e consumo de energia em plantas de produção de biodiesel. 2009. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo.

FERREIRA, Edvaldo Francisco et al. Utilização de subprodutos do babaçu na nutrição animal. PUBVET, PUBVET, v. 5, art–1136, 2011.

GOMES, Ana Carolina Galvão et al. Cinética de extração do óleo de babaçu visando a produção de biodiesel. Enciclopédia Biosfera, v. 9, n. 17, 2013.

GOODWIN, James G. et al. Synthesis of biodiesel via acid catalysis. Industrial & engineering chemistry research, ACS Publications, v. 44, n. 14, p. 5353–5363, 2005.

LACHTER, Elizabeth R. et al. Transesterificação dos óleos de coco de babaçu e soja com metanol em presença de resinas sulfônicas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CATÁLISE. [S.l.: s.n.], 2003. v. 12.

LIMA, José Renato de Oliveira et al. Biodiesel de babaçu (*Orbignya sp.*) obtido por via etanólica. Química Nova, SciELO Brasil, v. 30, n. 3, p. 600–603, 2007.

LIMA, P.C.R. Biodiesel: Um novo combustível para o Brasil, Brasília – DF: Consultoria Legislativa, fev. 2005. Disponível em: <https://bd.camara.leg.br/bd/bitstream/handle/bdcamara/1141/biodiesel_combustivel_lima.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: mar. 2021.

MARTINS, Glêndara et al. Otimização da transesterificação de óleo de soja produzido no estado do Tocantins. Enciclopédia Biosfera, v. 11, n. 21, 2015.

MENEGHETTI S, P.; MENEGHETTI M, R.; BRITO, Y. C. A reação de transesterificação, algumas aplicações e obtenção de biodiesel. Revista Virtual de Química, v. 5, n. 1, p. 63–73, 2013.

MME, MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Resenha energética brasileira. Ano Base 2019. Edição de 30 de Maio 2020. Disponível em: <shorturl.at/ahjJN>. Acesso em: maio 2021.

NASCIMENTO, Ulisses Magalhães et al. Otimização da produção de biodiesel a partir de óleo de coco babaçu com aquecimento por microondas. Eclética Química, SciELO Brasil, v. 34, n. 4, p. 37–48, 2009.

PIETRE, M. K. de. Produção de biodiesel usando catalisadores homogêneos e heterogêneos ácidos e básicos. Universidade Estadual do Norte Fluminense, 2006.

R7. Conhecimento Científico. 2019. Disponível em: <<https://bityli.com/pNX9U>>. Acesso em: mar. 2021.

SANTOS, Alcides et al. Avaliação físico-química de óleo residual de castanha - do brasil (*Bertholletia excelsa* HBK) e sua conversão em biodiesel. Enciclopédia Bioesfera, v. 11, n. 22, 2015.

SANTOS, JR de J. Biodiesel de babaçu: avaliação térmica, oxidativa e misturas binárias. Universidade Federal da Paraíba, 2008.

SANTOS, Wildson; MÓL, Gerson. Química Cidadã. 3. ed. [S.l.]: AJS, 2016. v. 2.

SILVA, Amauri Castro et al. Extração e caracterização físico-químicas de óleo de amêndoas de coco babaçu (*attalea speciosa*) de Timon-MA. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, 2017.

SOUZA, Iracema Pinto de. Avaliação da implantação de uma unidade de extração do óleo do coco babaçu para o desenvolvimento sustentável de comunidades tradicionais da região amazônica, 2012.

STACHIW, Rosalvo et al. Potencial de produção de biodiesel com espécies oleaginosas nativas de Rondônia, Brasil. *Acta Amazonica, SciELO Brasil*, v. 46, p. 81–90, 2016.

THOMAS, Nathieli. Parâmetros cinéticos de reações de transesterificação metanólica de óleos vegetais determinados por análise termogravimétrica. 2017. Diss. (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná.