



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA NUCLEAR  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES

ROSÁRIA FERREIRA DA SILVA

**ANÁLISE DO CONSUMO ENERGÉTICO DE UM SISTEMA DE EXTRAÇÃO DE  
ÓLEO DE MACAÚBA**

BELO HORIZONTE  
2023

ROSÁRIA FERREIRA DA SILVA

**ANÁLISE DO CONSUMO ENERGÉTICO DE UM SISTEMA DE EXTRAÇÃO DE  
ÓLEO DE MACAÚBA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciências e Técnicas Nucleares como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências e Técnicas Nucleares.

Área de concentração: Engenharia Nuclear e da Energia

Orientadora: Dra. Antonella Lombardi Costa  
Coorientador: Dr. Sebastián Giraldo Montoya

BELO HORIZONTE  
2023

S586a

Silva, Rosária Ferreira da.

Análise do consumo energético de um sistema de extração de óleo de macaúba [recurso eletrônico] / Rosária Ferreira da Silva. - 2023.  
1 recurso online (111 f. : il., color.) : pdf.

Orientadora: Antonella Lombardi Costa.  
Coorientadora: Sebastián Giraldo Montoya.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais,  
Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 103-111.  
Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia nuclear - Teses. 2. Energia - Teses. 3. Análise energética - Teses. 4. Óleos vegetais - Teses. 5. Macaúba - Teses.  
I. Costa, Antonella Lombardi. II. Montoya, Sebastián Giraldo . III.  
Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 621.039(043)




## FOLHA DE APROVAÇÃO

### **ANÁLISE DO CONSUMO ENERGÉTICO DE UM SISTEMA DE EXTRAÇÃO DE ÓLEO DA MACAÚBA**

### **ROSÁRIA FERREIRA DA SILVA**

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES, como requisito para obtenção do grau de Mestre em CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES, área de concentração ENGENHARIA NUCLEAR E DA ENERGIA.

Aprovada em 13 de julho de 2023, pela banca constituída pelos membros:

  
Prof.<sup>a</sup> Antonella Lombardi Costa - Orientadora  
Universidade Federal de Minas Gerais

Documento assinado digitalmente



SEBASTIAN GIRALDO MONTOYA  
Data: 19/07/2023 08:33:18-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Sebastian Giraldo Montoya - Coorientador  
Universidade Federal de Viçosa

Documento assinado digitalmente



CARLOS EDUARDO VELASQUEZ CABRERA  
Data: 14/07/2023 11:16:49-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Carlos Eduardo Velasquez Cabrera  
Universidade Federal de Minas Gerais



Prof.<sup>a</sup> Andrea Oliveira Souza da Costa  
Universidade Federal de Minas Gerais

Documento assinado digitalmente



BRUNA DE FATIMA PEDROSA GUEDES FLAI  
Data: 17/07/2023 22:55:02-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.<sup>a</sup> Bruna de Fátima Pedrosa Guedes Flausino  
Universidade Federal de Ouro Preto

Belo Horizonte, 13 de julho de 2023.

*Dedico este trabalho a todos os que me ajudaram ao longo desta caminhada.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, porque sem ele nada seria possível.

Aos meus pais, Jhon e Rozangela, pelo exemplo e apoio incondicional, que serviram de alicerce para as minhas realizações. A minha irmã, Carolina, por todo incentivo e suporte emocional.

A todos os meus familiares e amigos que estiveram ao meu lado ao longo desta caminhada, pela amizade, amor e atenção, dedicados a mim sempre que precisei. Em especial a minha amiga Flávia que me aconselhou em momentos cruciais.

Ao Victor, pelo apoio e incentivo, que foi fundamental para a conclusão desta etapa.

Agradeço a minha orientadora, Professora Antonella, pela confiança, paciência e apoio constante no desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus colegas de mestrado pelo companheirismo e amizade, pois compartilhamos inúmeros desafios, sempre com o espírito colaborativo.

As minhas colegas da PMI, em especial a Dalvonete, por não medirem esforços para me ajudar a superar todos os obstáculos e terem paciência nos momentos mais críticos.

Aos mestres e professores que plantaram e cultivaram a sementinha do conhecimento em mim, em especial a Professora Edyene e aos Professores Daniel e Estevão, por contribuírem com a minha formação acadêmica e profissional durante a minha graduação.

A Universidade Federal de Viçosa (UFV), em especial ao Departamento de Agronomia, pela parceria e colaboração para o desenvolvimento deste trabalho.

A todos os envolvidos na rede REMAPE (Rede Macaúba de Pesquisa), em destaque ao professor coorientador Sebastián Giraldo Montoya, por compartilhar o vasto conhecimento e as pesquisas desenvolvidas sobre a macaúba.

A empresa Acrotech por permitir a realização de uma visita técnica e disponibilizar os dados necessários para realização desta dissertação.

A todos os professores e servidores do Departamento de Engenharia Nuclear da Universidade Federal de Minas Gerais, por todo apoio técnico prestado e por me proporcionarem um ensino de alta qualidade. Às agências brasileiras de fomento CAPES, CNPq e FAPEMIG pelo suporte ao ensino e às pesquisas da UFMG.

Enfim, a todos que torceram e torcem por mim e que de alguma forma contribuíram e prestaram auxílio durante a execução deste trabalho.

Minha eterna gratidão, obrigada!

## RESUMO

A macaúba (*Acrocomia aculeata*) é uma palmeira nativa de regiões tropicais das Américas e é uma espécie promissora para exploração devido à alta produtividade de óleo e subprodutos possíveis de se obter através do processamento de seus frutos. Uma vez evidenciada a importância do óleo de macaúba, torna-se necessário avaliar os métodos existentes de extração a fim de se obter o melhor aproveitamento energético ao longo do processo. Neste contexto, o objetivo principal deste estudo foi realizar uma análise do consumo energético de um sistema de extração de óleo de macaúba com base no desenvolvimento de uma planta conceitual a partir de dados experimentais e dados da literatura. Também foi apresentado um panorama sobre o cultivo e processamento da espécie para diversos fins. Para este estudo, a primeira etapa consistiu em delimitar o sistema a ser analisado e todas as variáveis inerentes; para tal foi realizada a combinação entre as informações obtidas de uma planta piloto instalada na Universidade Federal de Viçosa (UFV), em Minas Gerais, e os dados disponíveis na literatura. Para a avaliação energética considerou-se a relação produção/consumo entre as entradas e saídas energéticas identificando-se os valores dos dispêndios utilizados na extração do óleo de macaúba e dos subprodutos em termos de energia útil. Foram elaborados diagramas representativos para cada etapa do processo. Para os dados de entradas, foram feitas considerações e definidos os termos de operação de cada equipamento empregado no processo e então foi determinada a demanda de energia elétrica necessária para cada etapa. As saídas energéticas foram definidas com base no poder calorífico superior e inferior dos subprodutos obtidos. Logo, obteve-se o consumo de energia de cada etapa isolada e do sistema como um todo. Considerou-se o processamento de 300 kg em um tempo de 134,26 horas, estimou-se o gasto total de 4.574,71 kWh em energia elétrica, e obteve-se uma produção final de 1152,95 kWh (de acordo com o poder calorífico dos produtos obtidos). Conclui-se que para a consolidação de uma cadeia produtiva sustentável é necessário aperfeiçoar o processo de extração, uma vez que o mesmo apresentou elevado consumo energético. Observou-se que dentre as etapas do processo de extração a etapa mais dispendiosa do ponto de vista energético é a secagem e que aprimorá-la é fundamental para ampliar a eficiência e obter o emprego consciente dos recursos energéticos empregados no processo de extração do óleo de macaúba.

**Palavras-chave:** energia; análise energética; processos; extração; óleo vegetal; macaúba.

## ABSTRACT

The macaúba (*Acrocomia aculeata*) is a native palm tree of America tropical regions and it is a promising species for exploitation due to the high productivity of oil and by-products possible to obtain through the processing of its fruit. Once the importance of macaúba oil is evidenced, it is necessary to evaluate the existing extraction methods in order to obtain the best energy use throughout the process. In this context, the main objective of this study was to perform an analysis of the energy consumption of a macaúba oil extraction system based on the development of a conceptual plant based on experimental data and data from the literature. An overview of the cultivation and processing of the species for various purposes was also presented. For this study, the first step consisted of delimiting the system to be analyzed and all the inherent variables; to this end, the information obtained from a pilot plant installed at the Federal University of Viçosa (UFV), in Minas Gerais, was combined with the data available in the literature. For the energy evaluation, the production/consumption ratio between energy inputs and outputs was considered, identifying the values of the expenditures used in the extraction of macaúba oil and by-products in terms of useful energy. Representative diagrams were prepared for each step of the process. For the input data, considerations were made and the terms of operation of each equipment used in the process were defined and then the demand for electrical energy required for each step was determined. The energy outputs were defined based on the upper and lower calorific value of the by-products obtained. Therefore, the energy consumption of each isolated step and of the system as a whole was obtained. It was considered the processing of 300 kg in a time of 134.26 hours, estimated the total expenditure of 4,574.71 kWh in electricity, and it was obtained a final production of 1,152.95 kWh (according to the calorific value of the products obtained). It is concluded that for the consolidation of a sustainable production chain it is necessary to improve the extraction process, since it presented high energy consumption. It was observed that among the stages of the extraction process the most expensive step from the energy point of view is drying and that improving it is fundamental to increase efficiency and obtain the conscious use of the energy resources used in the process of extraction of macaúba oil.

**Keywords:** energy; energy analysis; processes; extraction; vegetable oil; macaúba.



## **LISTA DE SIGLAS**

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANP - Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

ANVISA - Agência Nacional de Vigilância Sanitária

ASTM - American Society for Testing and Materials

GLP - Gás Liquefeito de Petróleo

PNPB - Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel

PUC Minas - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

REMAPE - Rede Macaúba de Pesquisa

SI - Sistema Internacional de Unidades

UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais

UFV - Universidade Federal de Viçosa

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\%m/m = (\text{massa de soluto}) / (\text{massa de solução (soluto + solvente)}) \times 100$

$\%W =$  Umidade da biomassa (% base úmida)

$\dot{m}_e =$  vazão mássica de entrada no volume de controle (kg/s)

$\dot{m}_s =$  vazão mássica de saída do volume de controle (kg/s)

$PCS_{úmido} =$  Poder Calorífico Superior da biomassa úmida (kJ/kg)

$\frac{d\dot{m}_{vc}}{dt} =$  taxa temporal da variação de massa no volume de controle (kg/s)

$\sum_e \dot{m}_e =$  Somatório das vazões mássicas de entrada no volume de controle (kg/s)

$m_0 =$  Massa inicial da amostra em gramas

$m_1 =$  Massa final da amostra em gramas

$\sum_s \dot{m}_s =$  Somatório das vazões mássicas de saída no volume de controle (kg/s)

$\Delta T =$  Variação da temperatura antes e após a combustão ( $^{\circ}C$ )

$c =$  Teor de carbono (kg carbono/kg biomassa)

$EE =$  Energia Elétrica (kWh)

$h =$  Teor de hidrogênio (kg hidrogênio/kg biomassa)

$I =$  Corrente elétrica (A)

$k =$  constante do calorímetro utilizado (g)

$M =$  Massa de água utilizada no calorímetro (g)

$M_s =$  Massa seca do combustível (g)

$O =$  Teor de oxigênio (kg oxigênio/kg biomassa)

$P_e =$  Potência elétrica (W)

$s =$  Teor de enxofre (kg enxofre/kg biomassa)

$t =$  Tempo (h)

$U =$  Tensão elétrica (V)

$w =$  Teor de umidade (kg água/kg biomassa);

$PCI =$  Poder Calorífico Inferior (kJ/kg)

$PCS =$  Poder Calorífico Superior da biomassa seca (kJ/kg)

$TU (\%) =$  Teor de umidade (%)

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Matriz Elétrica Brasileira 2021. ....	16
Figura 2. Matriz Energética Brasileira, 2021. ....	17
Figura 3. Óleo da polpa (esquerda) e amêndoa (direita) da macaúba. ....	22
Figura 4. Mapa de ocorrência natural da macaúba no Brasil. ....	27
Figura 5. Fruto da macaúba. ....	29
Figura 6. Semente pré-germinada da macaúba. ....	31
Figura 7. Protótipo de um sistema de armazenamento (visão frontal à esquerda e vista superior à direita). ....	34
Figura 8. Despoldador mecânico marca RM Ltda. para frutos da macaúba. Vista geral (esquerda) e câmara de despoldamento (direita). ....	36
Figura 9. Prensa Helicoidal, modelo SEM 610-GERT 60 II, marca SCOTT. ....	38
Figura 10. Aproveitamento dos subprodutos obtidos após processamento. ....	42
Figura 11. Gerações dos biocombustíveis. ....	44
Figura 12. Estufas utilizadas no processo de secagem da macaúba na UFV. ....	49
Figura 13. Despoldador mecânico. ....	50
Figura 14. Subprodutos obtidos na descascadeira/despoldadeira: da esquerda para direita: epicarpo, mesocarpo e (endocarpo + amêndoa). ....	50
Figura 15. Prensa Mecânica. ....	51
Figura 16. Extração em prensa hidráulica. ....	52
Figura 17. Maquinário para quebra do endocarpo e remoção da amêndoa da macaúba. ....	53
Figura 18. Óleos da polpa (esquerda) e amêndoa da macaúba (direita). ....	53
Figura 19. Sequência metodológica. ....	54
Figura 20. Fluxograma do processo de extração do óleo de macaúba. ....	55
Figura 21. Princípios da conservação de massa. ....	57
Figura 22. Mesa de secagem estática. ....	65
Figura 23. Despoldadeira. ....	69
Figura 24. Moinho Vieira MCO. ....	72
Figura 25. Prensa Extratora. ....	73
Figura 26. Filtro prensa industrial. ....	74
Figura 27. Volume de Controle 1 - Secagem (1): frutos frescos. ....	75
Figura 28. Volume de Controle 2 - Descascadeira/Despoldadeira (1): remoção epicarpo. ....	76

Figura 29. Volume de Controle 3 - Secagem (2): frutos descascados.....	76
Figura 30. Volume de Controle 4 - Descascadeira/Despolpadeira (2): remoção polpa. ....	77
Figura 31. Volume de Controle 5 - Moinho a Martelos: separação amêndoa/endocarpo. ....	77
Figura 32. Volume de Controle 6 - Secagem (3): amêndoa. ....	78
Figura 33. Volume de Controle 7 - Prensagem mecânica (1): extração óleo de amêndoa.....	78
Figura 34. Volume de Controle 8 - Filtro (1): óleo de amêndoa. ....	79
Figura 35. Volume de Controle 9 - Secagem (4): polpa.....	79
Figura 366. Volume de Controle 10 - Prensagem mecânica (2). ....	80
Figura 37. Volume de Controle 11 - Filtro (2): óleo de polpa.....	80
Figura 38. Distribuição mássica para 300 kg de frutos frescos. ....	82
Figura 39. Produtos e subprodutos obtidos após o processamento em (kg).....	86
Figura 40. Gasto energético por equipamento.....	99

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Evolução do marco legal do biodiesel. ....	18
Tabela 2. PCS e PCI para diversas fontes de combustível. ....	19
Tabela 3. Produtividade média do óleo por hectare das principais oleaginosas. ....	21
Tabela 4. Composição em ácidos graxos livres do fruto da macaúba (%). ....	23
Tabela 5. Limites máximos estabelecidos pela ANVISA para óleos vegetais. ....	24
Tabela 6. Características físico-químicas dos óleos da macaúba. ....	25
Tabela 7. Características físico-químicas da macaúba, dendê e babaçu. ....	25
Tabela 8. Distribuição por espécie do gênero <i>Acrocomia</i> pelos Estados de ocorrência. ....	28
Tabela 9. Usos e potencialidades das partes do fruto da <i>Acrocomia aculeata</i> . ....	39
Tabela 10. Aplicações dos principais derivados do fruto da macaúba. ....	42
Tabela 11. Considerações realizadas sobre a umidade. ....	67
Tabela 12. Tempo de secagem. ....	68
Tabela 13. Tempo observado em visita técnica para descascar os frutos. ....	70
Tabela 14. Tempo de funcionamento Descascador/Despolpador ....	71
Tabela 15. Tempo de funcionamento Prensagem mecânica. ....	73
Tabela 16. Tempo estimado para filtração dos óleos. ....	74
Tabela 17. Proporcionalidade mássica utilizada. ....	81
Tabela 18. Composição mássica em base seca das frações dos frutos da macaúba. ....	82
Tabela 19. Variação mássica da macaúba. ....	83
Tabela 20. Balanço de massa global após processamento dos frutos da macaúba. ....	84
Tabela 21. Balanço de massa - Polpa + Endocarpo. ....	84
Tabela 22. Balanço de massa - extração do óleo de amêndoa. ....	85
Tabela 23. Balanço de massa - extração do óleo de polpa ....	85
Tabela 24. Teor de Óleo de amêndoa da macaúba. ....	87
Tabela 25. Massas iniciais para cada volume de controle. ....	88
Tabela 26. Especificações técnicas dos equipamentos. ....	89
Tabela 27. Consumo de Energia Elétrica kWh. ....	89
Tabela 28. Massas finais para cada volume de controle. ....	90
Tabela 29. Valores PCS encontrados na bibliografia pesquisada. ....	90
Tabela 30. Resultados da média aritmética dos valores do PCS considerados neste estudo. ..	92
Tabela 31. Composição elementar utilizada neste estudo. ....	93

Tabela 32. Resultados calculados para o PCI.....	93
Tabela 33. Valores considerados para o balanço de massa. ....	94
Tabela 34. Produção Energética. ....	95
Tabela 35. Equivalência MJ para kWh.....	96
Tabela 36. Entradas e Saídas - processamento de 300 kg de frutos de macaúba. ....	97
Tabela 37. Produção energética final após o processamento de 300 kg de macaúba.....	98

## SUMÁRIO

SUMÁRIO .....	6
1. INTRODUÇÃO.....	8
1.1 Justificativa.....	10
1.2 Objetivos.....	12
1.2.1 Objetivo Geral .....	12
1.2.2 Objetivos Específicos .....	13
1.3 Organização da dissertação.....	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	14
2.1 Cenário energético e análise energética .....	14
2.1.1 Cenário energético.....	14
2.1.2 Análise energética.....	19
2.2 Aspectos gerais das oleaginosas .....	20
2.2.1 Óleo vegetal.....	20
2.2.2 Ácidos graxos .....	22
2.2.3 Características físico-químicas .....	23
2.3 Macaúba.....	26
2.3.1 Características gerais .....	26
2.3.2 Distribuição geográfica.....	27
2.3.3 Palmeiras e fruto da macaúba .....	28
2.4 Processamento e obtenção do óleo de macaúba.....	30
2.4.1 Cultivo e Colheita.....	30
2.4.2 Armazenamento pós-colheita .....	32
2.4.3 Secagem.....	34
2.4.4 Descascadeira/ Despoldador.....	36
2.4.5 Processo de Quebra .....	37
2.4.6 Extração do Óleo .....	37
2.5 Usos potenciais dos óleos de macaúba e seus subprodutos.....	38
2.5.1 Usos não energéticos .....	39
2.5.2 Usos energéticos .....	42
3. METODOLOGIA .....	47
3.1 Planta Conceitual .....	47
3.1.1 Coleta de dados durante visita técnica .....	47
3.2 Metodologia de análise do consumo e potencial energético .....	54
3.2.1 Balanço de massa.....	56
3.2.2 Consumo Energético.....	58
3.2.3 Potencial Energético .....	59
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	62
4.1 Planta Conceitual .....	62
4.1.1 Secagem.....	64

4.1.2	Descascadeira/Despolpadeira (Epicarpo-Polpa-Endocarpo) .....	68
4.1.3	Etapa de Quebra.....	71
4.1.4	Extração.....	72
4.1.5	Filtragem.....	73
4.2	Análise Energética .....	75
4.2.1	Diagrama de blocos .....	75
4.2.2	Balanço de massa.....	81
4.2.3	Avaliação Energética.....	87
4.2.4	Consumo Energético.....	88
4.2.5	Potencial Energético .....	89
4.2.6	Análise Energética – Consumo x Produção.....	95
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	101
5.1	Sugestão para trabalhos futuros .....	102
6.	REFERÊNCIAS .....	103



## 1. INTRODUÇÃO

A macaúba (*Acrocomia aculeata*) é uma palmeira nativa de florestas tropicais sendo encontrada em todo território nacional, com maiores proporções nos Estados de Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul (QUEIROGA *et al.*, 2016). Tem capacidade de se desenvolver em locais onde os fatores ambientais são desafiadores, como por exemplo, temperaturas elevadas, alta radiação solar e prolongada falta de chuva sazonal (PIRES, 2013).

Não existe um consenso entre os autores sobre a identidade taxonômica da macaúba, por isso, muitas espécies são tratadas como sinônimos. A primeira classificação da *Acrocomia aculeata* foi realizada em 1763 por Jacquin (Jacq.), sendo incluído no gênero *Acrocomia* por Martius (Mart.) em 1824, alterando sua nomenclatura para *A. sclerocarpa* (LIMA *et al.*, 2018).

A macaúba tem-se apresentado com uma espécie promissora para exploração, devido à alta produtividade de óleo e aos subprodutos possíveis de se obter através do processamento de seus frutos. As pesquisas sobre a macaúba intensificaram-se por volta da década de 80, devido à implantação do Pro Óleo, programa que estimulava a substituição do óleo diesel por óleos vegetais no Brasil.

Logo, após um período estagnação, voltou a ganhar destaque em 2004 com o Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB), devido ao incentivo e busca por diversificação das matérias primas para a obtenção do biodiesel, de forma sustentável e com enfoque na inclusão produtiva e desenvolvimento rural sustentável, promovendo a geração de emprego e renda.

O biodiesel é uma das soluções energéticas renováveis que vem se consolidando mundialmente ao longo dos anos, por se tratar de uma fonte energeticamente sustentável. Essa ascensão é caracterizada por inúmeros benefícios econômicos, ambientais e sociais que sua utilização propicia. Ainda assim, alguns autores defendem que o óleo de macaúba possui propriedades que direcionam o seu uso na dieta humana, ainda que possua potencial para a produção de biodiesel e área cosmética (CICONINI, 2012).

O crescimento na busca por fontes renováveis de energia coloca as espécies oleaginosas em destaque. Diversos estudos foram realizados nos últimos anos, objetivando o

aumento da produtividade de diversas palmeiras oleaginosas, tais como licuri, tucumã, jerivá e macaúba.

Uma vez evidenciada a importância do óleo de macaúba, torna-se necessário avaliar os métodos existentes de extração a fim de se obter o melhor aproveitamento energético ao longo do processo. Neste contexto, este estudo teve como objetivo principal realizar uma análise do consumo energético de um sistema de extração de óleo da macaúba, apresentando o panorama sobre o cultivo e processamento da espécie para diversos fins.

Com a finalidade de aprofundar os conhecimentos sobre o cultivo da espécie e os processos de extração do óleo da macaúba, foram realizadas duas visitas técnicas à Universidade Federal de Viçosa (UFV), Minas Gerais, onde existe a rede REMAPE (Rede Macaúba de Pesquisa) a qual é uma aliança em conjunto da UFV, Institutos de Pesquisa e Empresas do âmbito público e privado, em prol dos avanços acerca de estudo e aplicação da cultura. A UFV é pioneira no Brasil em pesquisa e desenvolvimento com a cultura da macaúba, tendo publicado diversos resultados importantes de trabalhos liderados principalmente pelo professor Sérgio Yoshimitsu Motoike e sua equipe.

No presente trabalho, foram observados os processos de: cultivo; colheita; secagem; descascadeira; despoldadeira; extração por prensagem; separação da amêndoa e extração de seu óleo. Desta forma, utilizaram-se dos dados coletados como ponto de partida para a elaboração de rota de extração de óleo de macaúba. Posteriormente realizou-se um levantamento bibliográfico de informações relevantes e complementares às coletadas previamente, sobre os processos envolvidos na extração do óleo de macaúba, e então se apresentou uma rota industrial para o processamento da macaúba.

Ao longo de todo processo, desde o plantio à extração e refino do óleo de macaúba, existem diversos fluxos de energia. Pode-se citar a energia solar utilizada no cultivo, o trabalho realizado por homens e pelos maquinários ao longo de todo o cultivo e processos de extração. Para este estudo a primeira etapa consistiu em delimitar o sistema a ser analisado, optou-se por avaliar os fluxos energéticos a partir da etapa de secagem dos frutos. Em seguida delimitaram-se as variáveis de entradas e saída, tais como, massa, temperatura, composição elementar e o tempo necessário para o desenvolvimento de cada etapa. Posteriormente elaboraram-se os diagramas representativos e aplicaram-se as equações matemáticas baseadas nos princípios da primeira lei da termodinâmica.

Contudo este estudo apresentou uma metodologia de análise do consumo energético do processo de extração do óleo de macaúba da planta em estudo, na qual, foi possível apresentar através de uma visão sistemática todo o processo de extração e identificar algumas áreas a serem aprimoradas. Obtendo desta forma o melhor aproveitamento e uso consciente dos recursos energéticos empregados no processo de extração.

### 1.1 Justificativa

Ao longo dos anos, observa-se um aumento nas necessidades energéticas, tal fato está atrelado ao desenvolvimento de diversas atividades humanas, como agricultura, pecuária, atividade industrial, entre outras. Neste cenário, busca-se obter o uso consciente e eficiente dos recursos disponíveis para que as fontes utilizadas sejam capazes de atender à demanda crescente.

Uma das principais problemáticas a serem consideradas acerca do desenvolvimento sustentável é o suprimento de energia. No Brasil, esta preocupação se intensificou a partir das duas crises do petróleo em (1973 e 1979), acarretando o aumento de pesquisas voltadas para a diversificação da matriz energética com a ampliação e inserção de fontes alternativas de energia (PINHEIRO, 2020).

A matriz energética mundial é composta predominantemente por combustíveis fósseis e não renováveis como petróleo, carvão e gás natural, as fontes de origem renovável representam apenas 15%. No território nacional, temos um cenário um pouco melhor, em que quase metade da matriz energética é composta por fontes de origem renovável, com o montante de 47,4 % (EPE, 2023).

As reservas não renováveis são limitadas, além de que sua utilização em ampla escala está associada a diversos problemas ambientais, como por exemplo, o efeito estufa. Consoante a isso temos o aumento da demanda de energia devido a alguns fatores, tais como, crescimento populacional e desenvolvimento tecnológico, o que implica a necessidade de ampliar o uso de fontes renováveis de energia.

A bioenergia é um dos tipos de energia renovável, sendo obtida a partir da biomassa energética, tanto de origem vegetal, quanto animal. Iniciativas que envolvam bioenergia em um nível local proporcionam benefícios econômicos através da geração de emprego e conseqüentemente de renda para diversas famílias rurais (MALODE *et al.*, 2021).

Carvalho (2010) cita que o conceito de bioenergia também está associado à capacidade de sistemas agrícolas fornecerem energia de forma renovável e que inúmeros produtos agrícolas foram e estão sendo estudados como fonte de óleo para o biodiesel. O Brasil possui fatores favoráveis para o cultivo de diversas espécies vegetais como clima favorável, dimensões territoriais, mão de obra, entre outros (COSTA, 2016).

O consumo de óleos vegetais se intensificou no país a partir de políticas públicas que visam sua utilização como fonte de energia renovável, por se tratar de um insumo importante para produção de biocombustíveis. No entanto, além do seu uso na produção de biocombustíveis, existem outras aplicabilidades para os óleos vegetais, podendo ser utilizados na indústria farmacêutica, cosmética e alimentícia. Evidencia-se a importância de realizar estudos para aprimorar os processos de extração independente do segmento empregado.

Atualmente a demanda de óleo vegetal é suprida principalmente por óleo de palma, sendo o mais comercializado, representando 58% das exportações nas transações internacionais. Em relação ao consumo, o óleo de palma também está em posição de destaque sendo o óleo mais consumido, correspondente a 35,7% da demanda mundial. (ZEFERINO; RAMOS, 2023).

A demanda de óleo vegetal é crescente, no entanto a oferta não ocorre na mesma proporção, sendo fundamental ampliar e diversificar tais culturas. Neste cenário uma grande vantagem é que o dendê necessita de condições climáticas bem definidas em que a temperatura e o regime de chuvas não estão sujeitos a variações desproporcionadas, sendo encontrado predominantemente no norte do país (CETEC, 1983). Já a macaúba se adapta com facilidade em ambientes com deficiência nutricional e hídrica, áreas degradadas e em processos de recuperação (SOUZA, 2013). Logo, como as culturas podem ser cultivadas em regiões distintas, sendo, que uma não irá substituir a outra e sim complementar na oferta de óleos vegetais.

Importante ressaltar que a expansão dos cultivos de macaúba em campo aberto poderia ser realizada considerando as imensas áreas de pastagens degradadas do Brasil, estimadas em mais de 50 milhões de ha, onde a espécie é plenamente adaptada (LOPES E FAVARO, 2021) com possibilidade de contribuir para a recomposição de áreas de proteção ambiental e manutenção da biodiversidade pelo aproveitamento econômico de maneira sustentável.

Considerando a alta produtividade de óleo e sua aplicabilidade nos setores energéticos e industriais, é fundamental desenvolver estudos para expandir o conhecimento sobre a

macaúba. Apesar de ser uma espécie com grande potencial, os esforços para sua domesticação se iniciaram nos anos de 2007 (SOUZA, 2013).

Para que a macaúba possa se estabelecer como fonte de óleo vegetal é fundamental o desenvolvimento de tecnologias para toda a cadeia produtiva, uma vez que a execução de cada etapa influencia na qualidade final do óleo obtido e apesar de todo avanço ainda existem pontos a serem aprimorados em todo o processo de extração, nos quais, pode-se citar o aperfeiçoamento dos equipamentos ampliando a eficiência dos mesmos, aprimoramento das condições de armazenamento dos frutos para que seja possível ampliar o período de armazenamento e promover ao mesmo tempo redução na umidade, entre outros, para então seja possível obter uma cadeia produtiva, sustentável e competitiva.

Existem diversos estudos acerca do desenvolvimento da macaúba e de sua aplicabilidade em diversos segmentos, mas percebe-se uma lacuna, quanto a avaliação do consumo energético necessário para o processamento. Neste contexto este estudo analisou o consumo energético no processo de extração do óleo de macaúba de uma planta de referência, a fim de aprofundar do ponto de vista energético as pesquisas sobre o tema e verificar a viabilidade do sistema proposto.

Este trabalho buscou avaliar a viabilidade da extração do óleo de macaúba, considerando o consumo energético necessário em relação ao potencial energético dos produtos e subprodutos gerados ao longo do processamento. A fim de avaliar se o processo em questão é eficiente do ponto de vista energético, identificar quais pontos podem ser aprimorados e definir qual a capacidade de processamento necessária para custear os gastos de processo.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho consistiu em propor uma metodologia para o cálculo do consumo energético em um sistema de extração de óleo da macaúba (*Acrocomia aculeata*), a fim de verificar a sistemática do processo e avaliar sua eficiência e viabilidade através da relação entre o consumo energético necessário e o potencial energético dos produtos e subprodutos obtidos.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Apresentar um panorama sobre o cultivo e processamento da macaúba para diversos fins no Brasil;

Discutir brevemente sobre o aproveitamento das oleaginosas nos segmentos energéticos e não energéticos;

Descrever a planta piloto desenvolvida na Universidade Federal de Viçosa para extração do óleo de macaúba caracterizando os processos envolvidos;

Analisar o gasto energético durante o processamento da macaúba em relação aos produtos e subprodutos obtidos com base no desenvolvimento de uma planta conceitual de extração de óleo.

### 1.3 Organização da dissertação

A presente dissertação está dividida em cinco capítulos, a saber:

O primeiro capítulo corresponde à introdução, com breve explanação sobre o tema principal e os adjacentes relacionados a este estudo, bem como os propósitos que o nortearão, deixando clara a relevância de sua construção e, por fim, a exposição da organização desta dissertação.

No segundo capítulo é apresentada a revisão bibliográfica pertinente à pesquisa, contextualizando os principais conceitos referentes ao tema proposto, como a análise energética, os processos para a extração de óleo, bem como, a caracterização do óleo de macaúba.

O terceiro capítulo apresenta a metodologia científica adotada explanando detalhadamente cada etapa desenvolvida, desde a delimitação das etapas de estudo, à escolha dos métodos, até a coleta de dados contendo todas as informações pertinentes para seu desenvolvimento e aplicação.

Em seguida, no quarto capítulo, são apresentados os resultados alcançados e a discussão em cada etapa analisada do processo de extração de óleo da macaúba.

Por fim, no quinto e último capítulo, apresentam-se as conclusões alcançadas, demonstrando a relevância do trabalho e sua contribuição frente à problemática discutida.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão abordados os principais temas relativos a presente dissertação, tais como a conceituação e a aplicabilidade da análise energética em processos.

### 2.1 Cenário energético e análise energética

Após uma breve introdução sobre o conceito de energia e o cenário energético brasileiro incluindo os biocombustíveis, passa-se à explanação sobre a aplicação da análise energética de processos de modo geral.

#### 2.1.1 Cenário energético

A energia é indispensável para a sobrevivência humana, sendo um recurso fundamental para realização de diversas tarefas essenciais na vida cotidiana e em processos produtivos.

Em termos físicos, no dicionário, energia é definida como “capacidade que um corpo ou um sistema físico tem de produzir trabalho”.

A energia pode ser armazenada no interior de sistemas, pode ser convertida de uma forma em outra e transferida entre sistemas, onde a quantidade total de energia sempre é conservada (MORAN & SHAPIRO, 2006). No balanço de energia, é necessário considerar a energia total de um sistema, sendo elas, energia potencial, cinética, interna, mecânica, entre outras.

A energia cinética está relacionada ao movimento, onde se considera a massa do objeto e a velocidade do sistema. A energia potencial representa a posição em relação a um campo potencial. Já a energia interna refere-se à função do movimento das moléculas e suas interações eletromagnéticas (MARCILIO, 2019).

Moran e Shapiro (2006) citam que a energia interna a partir de uma visão microscópica esta atribuída ao movimento e configuração das moléculas, átomos e partículas subatômicas da matéria no sistema. Parte da energia é devido a translação das moléculas e parte inclui a rotação das moléculas em relação aos seus centros de massa e a energia cinética associada aos movimentos de vibração dentro da molécula, além da energia armazenada nas ligações químicas.

A energia interna associada a energia cinética das moléculas é denominada de energia sensível ou calor sensível e a velocidade média e o grau de atividade das moléculas são proporcionais a temperatura. Já a energia interna associada à mudança de fase de um sistema é chamada de energia latente ou calor latente. Denomina-se como energia química ou de ligação quando a energia interna está associada as ligações dos átomos nas moléculas, e quando está relacionada com as ligações dentro do núcleo de um átomo é denominada de energia nuclear (ÇENGEL; GHAJAR, 2012)

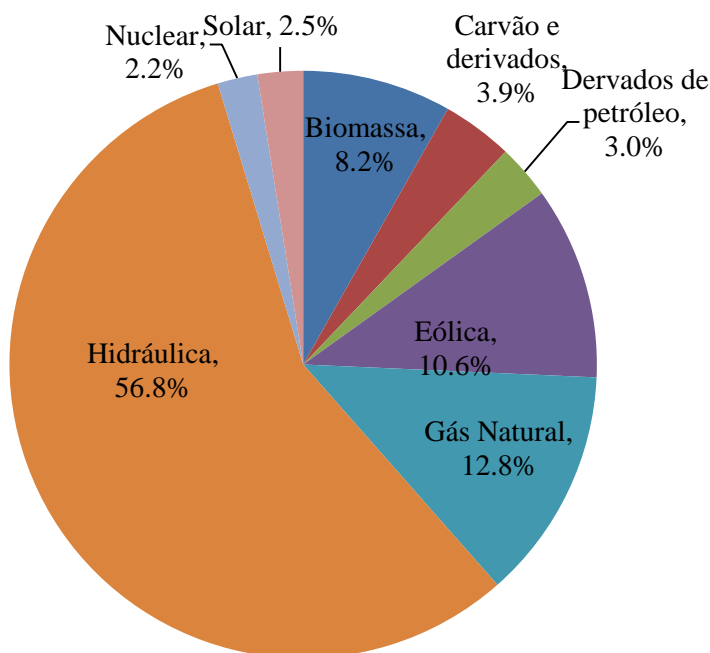
Neste âmbito, cabe pontuar também sobre os recursos energéticos usuais. As fontes energéticas disponíveis na natureza são denominadas de energia primária, dentre elas pode-se citar: petróleo, solar, eólica, entre outras. Podendo ser divididas em dois grupos, energia renovável e não renovável. Pode-se dizer que não é possível estabelecer um período temporal para o esgotamento das fontes renováveis de energia (NABAIS, 2015). Denomina-se matriz energética o conjunto de todas as fontes de energia disponíveis e viáveis economicamente para atender as demandas de um país.

A matriz elétrica nacional é apresentada na Figura 1, corresponde ao conjunto de fontes disponíveis apenas para a geração de energia elétrica. O Brasil possui uma matriz elétrica composta predominantemente por fontes renováveis, o que corresponde a 78,1% da oferta interna, sendo a fonte hídrica responsável pela maior parcela, com valor de 56,8% (EPE, 2023).

Gerou-se 656,1 TWh de energia elétrica no ano de 2021, e os setores que apresentaram o maior consumo foram industrial, residencial e comercial, correspondente a 79% da energia disponível (EPE, 2023).



Figura 1. Matriz Elétrica Brasileira 2021.



Fonte: BEN, 2022.

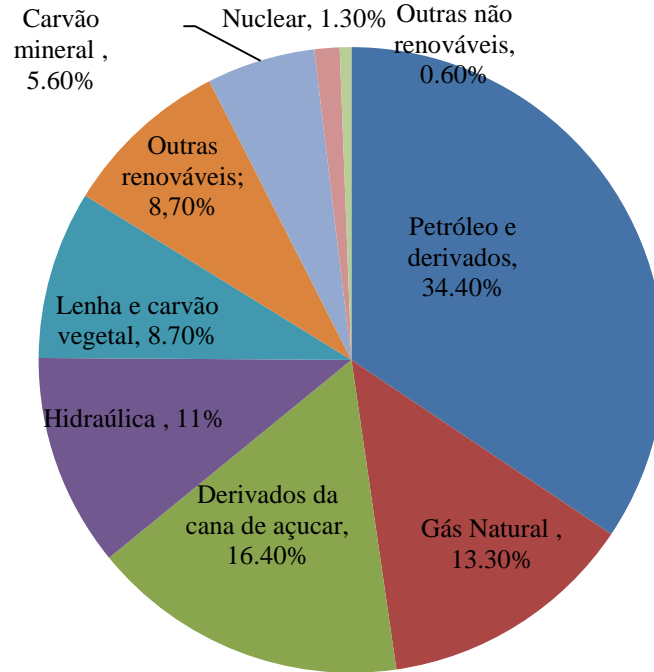
Já a Figura 2, apresenta a matriz energética nacional em 2021; nota-se que dentre as fontes energéticas utilizadas, 55,3 % correspondem a recursos não renováveis, predominando o uso de petróleo e seus derivados, 35%, seguindo do gás natural, 13%, e 44,7% oriundos de fontes renováveis (BEN, 2022). A matriz energética nacional se destaca por ser uma das mais limpas do mundo, devido às condições naturais do país.

Em termos de consumo, o setor que mais consome energia é o de transportes, tendo um consumo total de  $85.144 \cdot 10^3$  tep, sendo o óleo diesel a fonte predominante com  $38.391 \cdot 10^3$  tep, que é de origem não renovável (BEN, 2022).

Malode *et al.* (2021) afirma ainda que cerca de 70 % do combustível utilizado no setor de transportes é derivado do petróleo. O biodiesel substitui o óleo diesel de origem fóssil em motores automotivos ou estacionários; essa substituição pode ser total ou parcial, uma vez que pode ser utilizado isoladamente ou misturado ao óleo diesel.

No Brasil existem inúmeras iniciativas governamentais visando estimular o uso de combustíveis alternativos, dentre eles, os biocombustíveis. Os biocombustíveis possuem diversas características favoráveis se apresentando como uma opção atrativa economicamente e ambientalmente para integrar a matriz energética, dentre eles, merece destaque o biodiesel.

Figura 2. Matriz Energética Brasileira, 2021.



Fonte: BEN, 2022.

Os biocombustíveis, tais como o etanol e o biodiesel, têm uma participação muito importante na matriz energética uma vez que contribuem para a redução da emissão dos gases de efeito estufa ao diminuírem a participação da gasolina e do diesel. A Tabela 1 apresenta o marco legal do biodiesel no Brasil de 2005 até 2020 (EPE, 2020). É possível verificar que a primeira lei para adição de biodiesel no diesel (2%) é do ano 2005. O índice foi aumentando ao longo dos anos e hoje se encontra em 12% de acordo com a Resolução nº 3, de 20 de março de 2023, do Conselho Nacional de Política Energética – CNPE, com evolução prevista para 13% em 2024, 14% em 2025 e 15% em 2026, segundo essa mesma Resolução.

Segundo dados do Balanço Energético Nacional (BEN, 2022), houve um crescimento de 5,2 % na produção de biocombustível em 2021 em relação a 2020, alcançando 6.765.850 m<sup>3</sup>. A principal matéria-prima foi o óleo de soja (65%), seguido de outros materiais graxos (10,4%).

Tabela 1. Evolução do marco legal do biodiesel.

<b>Ano</b>	<b>Percentual</b>	<b>Legislação</b>
<b>2005</b>	2%	Lei n° 11.097/2005: Estabelece a regra de adição de biodiesel no diesel. Decreto n°5448/2005: Define um percentual mínimo de 2% de mistura.
<b>2008</b>	3%	Resolução CNPE n° 02/2008: Altera para 3% a partir de jul/2008.
<b>2009</b>	4%	Resolução CNPE n° 02/2009: Altera para 4% a partir de jul/2009.
<b>2010</b>	5%	Resolução CNPE n° 06/2009: Altera para 5% a partir de jan/2010.
<b>2014</b>	6%	Lei n° 13.033/2014: Altera para 6% a partir de jul/2014.
	7%	Lei n° 13.033/2014: Altera para 7% a partir de nov/2014.
<b>2017</b>	8%	Lei 13.263/2016 altera anualmente os percentuais para 8,9 e 10%. Resolução CNPE n°11/2016: Determina essas adições a partir de 1° de março de cada ano.
<b>2018</b>	10%	Resolução CNPE n° 16/2018: Prevê a elevação na mistura de 1% a.a. até o patamar de 15% em 2023.
<b>2019</b>	11%	A partir de set/2019
<b>2020</b>	12%	A partir de mar/2020
	10%	Resolução ANP n° 821/2020. Altera de 12% para 10% entre os dias 16 a 21 de junho.
	10%	Resolução ANP n° 824 – Altera de 12% para 10% de setembro a outubro 2020.
	11%	Aviso público ANP – N°08/2020 de – novembro de dezembro
<b>2021</b>	13%	A partir de mar/2021.
	10%	Resolução CNPE n°04/2021: Redução de 13% para 10% (L79).
	10%	Resolução CNPE n°10/2021: Redução de 13% para 10% (L80).
	12%	Resolução CNPE n°11/2021: Redução de 13% para 12% (L81).
	10%	Resolução CNPE n°16/2021: Redução de 13% para 10% (L82).
<b>2022</b>	10%	Resolução CNPE n°25/2021: Fixa o teor de 10% para o ano de 2022.
<b>2023</b>	10%	Resolução CNPE n°12/2022: Fixa em 10 % de jan. a mar/2023.
	12%	Resolução CNPE n° 03/2023: Altera a resolução n°16/2018 e prevê a adição de 1% a.a. até o patamar de 15% em 2026, com 12% a partir de 04/2023.
<b>2024</b>	13%	A partir de 04/2024.
<b>2025</b>	14%	A partir de 04/2025.
<b>2026</b>	15%	A partir de 04/2026.

Fonte: Adaptado de EPE, (2020).

Vale ressaltar o poder calorífico dos biocombustíveis em comparação como outros combustíveis para o setor de transporte. Na Tab. 2 são apresentados alguns valores com fins

de comparação, onde é possível verificar que o biodiesel apresenta valores próximos aos da gasolina e diesel e valores acima do álcool.

Tabela 2. PCS e PCI para diversas fontes de combustível.

<b>Fonte</b>	<b>PCS (kcal/kg)</b>	<b>PCI (kcal/kg)</b>
Biodiesel (B100)	9.345	9.000
Gasolina Automotiva	11.220	10.400
Gasolina de Aviação	11.290	10.600
Óleo diesel	10.750	10.100
Álcool Etílico Anidro	7.090	6.750
Álcool Etílico Hidratado	6.650	6.300
Querosene de Aviação	11.090	10.400

Fonte: BEN, 2022.

### 2.1.2 Análise energética

A análise energética se baseia nos princípios da primeira lei da termodinâmica (PETERS; PETRAKOPOULOU; DUFOUR, 2015). Ao se aplicar os princípios termodinâmicos é possível aperfeiçoar os processos e melhorar o desempenho deles; uma das formas é avaliar os meios de transferência de calor e massa.

Para aplicação da análise termodinâmica o primeiro passo é delimitar o sistema em estudo. Moran & Shapiro (2006) definem sistema como tudo aquilo que desejamos estudar, sendo distinguido de suas vizinhanças por uma fronteira especificada, podendo ser dividido basicamente em sistemas aberto, também denominado de volume de controle, no qual a massa pode cruzar a fronteira do sistema, e sistemas fechados em que não ocorre fluxo de massa. Um tipo especial de sistema fechado é o sistema isolado, que ocorre quando não há nenhum tipo de interação com as vizinhanças.

Após delimitar o sistema em estudo, é fundamental avaliar as propriedades e os processos envolvidos e, se preciso for realizar algumas considerações e simplificações para então determinar um modelo adequado para solução da problemática estudada.

Segundo Mazzucco (2013) o estado de um sistema é determinado por suas propriedades intensivas e tais propriedades definem a quantidade de energia que de um material pode ser transformada ou transferida.

A análise energética é uma ferramenta fundamental para aprimorar processos e torná-los economicamente mais viáveis. Esta análise pode quantificar a energia consumida e a energia indiretamente utilizada auxiliando na obtenção de indicadores de viabilidade técnico-econômica e ambiental.

## 2.2 Aspectos gerais das oleaginosas

O presente tópico consiste em uma breve introdução sobre os óleos vegetais, ácidos graxos e a caracterização físico-química, apresentando ainda as principais espécies de oleaginosas disponíveis.

### 2.2.1 Óleo vegetal

Óleos e gorduras são substâncias de origem vegetal ou animal. Os óleos são formados por ácidos graxos e se apresentam no estado líquido em condições ambientes (CICONINI, 2012). São triglicerídeos, constituídos por uma mistura de ácidos graxos saturados e insaturados (SUTILLE *et al.*, 2007). Compostos por uma molécula de glicerol associada a três moléculas de ácidos graxos, contendo em média 12 a 20 átomos de carbono (COSTA, 2016).

O consumo de óleos vegetais se intensificou no país a partir de políticas públicas que visam sua utilização como fonte de energia renovável, por se tratar de um insumo importante para a produção de biocombustíveis. Neste contexto ressalta-se o PNPB (Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel) que introduziu o biodiesel na matriz energética brasileira (ANP, 2020).

Os óleos vegetais podem ser utilizados como matéria-prima para a obtenção de biocombustíveis, uma vez que as moléculas de triglicerídeos presentes podem ser convertidas em ésteres metílicos de ácidos graxos através do processo de transesterificação ou esterificação catiônica (VELÁSQUEZ ARREDONDO *et al.*, 2012).

Ao longo dos anos, o aumento da demanda e o déficit na produção de óleos vegetais acarretou o aumento dos preços (NUNES, 2013). O óleo vegetal pode ser empregado principalmente em dois segmentos, sendo eles: alimentar e industrial. Os óleos vegetais ao serem submetidos ao aquecimento podem ocasionar reações de oxidação ou degradação, influenciando em sua aplicabilidade final. Para o emprego na indústria alimentícia é necessário que o óleo vegetal atenda algumas especificações sendo, portanto, fundamental realizar processos de refino e purificação.

A Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) estabeleceu através da Resolução RDC nº481 e a Instrução normativa – IN nº 87, ambas de 15 de março de 2021, no qual estabelece os requisitos sanitários para óleos e gorduras vegetais, bem como a lista de espécies vegetais autorizadas, as designações, a composição de ácidos graxos e os valores máxi-

mos de acidez e de índice de peróxido para óleos e gordura vegetais. Dentre as espécies permitidas estão palma, soja, pistache, colza, canola, entre outras (ANVISA, 2021)

Os óleos vegetais são obtidos normalmente através de frutos e sementes, e ao final do processo tem-se como subproduto além do óleo, uma torta proteica. Em geral, as fontes de matérias-primas são culturas voltadas para o setor alimentício; neste cenário, é fundamental a prospecção de novas espécies. Neste contexto, a macaúba (*Acrocomia aculeata*) tem-se mostrado como uma fonte promissora, uma vez que a extração do óleo pode ser realizada de todo o seu fruto. Dentre as espécies vegetais comestíveis, e que podem ser utilizadas na extração de óleo vegetal pode-se citar: soja, milho, dendê, girassol, entre outras (PIRES, 2013).

A Tab. 3 apresenta a produtividade média das principais oleaginosas. Observa-se que o rendimento da macaúba é superior ao da soja, babaçu e pequi, é similar ao do pinhão manso e inferior ao do dendê. Ainda assim, apresenta um rendimento que a coloca em destaque dentre as principais oleaginosas.

Queiroga *et al.* (2016) menciona que o rendimento pode ultrapassar quatro toneladas em produtividade de óleo no fruto. Estimou ainda que em plantios com 216 plantas/ha esperava-se uma produtividade entre 3175 e 4968 kg/ha/ano de óleo, correspondendo a um rendimento de 21% na extração.

A alta produtividade da macaúba é influenciada pela troca de gases entre a folha e a atmosfera. Captura a luz solar de forma eficiente e esta característica permite que a planta consiga priorizar e investir em crescimento e acúmulo de biomassa (PIRES, 2013).

Tabela 3. Produtividade média do óleo por hectare das principais oleaginosas.

<b>Oleaginosa</b>	<b>Rendimento Agrícola (Litros de óleo/ha)</b>
Soja	400 a 650
Dendê	5500 a 8000
Babaçu	1500 a 2000
Pequi	2600 a 3200
Macaúba	3500 a 4000
Pinhão Manso	3000 a 4000

Fonte: Adaptado de Melo, (2012).

É possível obter o óleo de macaúba de todo o seu fruto, mas em maiores quantidades do mesocarpo/polpa e da amêndoa. A composição química e suas propriedades diferem entre o óleo extraído na polpa e o extraído da amêndoa possibilitando uma diferente aplicação para ambos. A Fig. 3 apresenta os óleos vegetais obtidos da polpa (esquerda) e amêndoa (direita) da macaúba.

O óleo obtido da polpa possui maior teor de umidade o que contribui para maior atividade enzimática, acarretando a oxidação do óleo. Por outro lado, o óleo obtido da amêndoa possui características de óleo refinado com alto teor de acidez e conteúdos fosfolipídios, ou seja, são lipídios compostos que apresentam em sua composição glicerol ácido graxo, ácido fosfórico e compostos nitrogenados (SILVEIRA, 2014).

Figura 3. Óleo da polpa (esquerda) e amêndoa (direita) da macaúba.



Fonte: Autora, (2022).

### 2.2.2 Ácidos graxos

Os ácidos graxos são os principais componentes das membranas celulares dos óleos vegetais. A composição, natureza e propriedades dos ácidos graxos diferem de acordo com a origem do óleo vegetal.

Ácidos graxos são ácidos carboxílicos com cadeia carbônica longa, em geral, sem ramificações e com número par de carbonos; diferem-se pela quantidade de carbonos em sua cadeia e pelo número de insaturação (SILVEIRA, 2014).

A Tabela 4 apresenta a composição centesimal dos ácidos graxos livres do fruto da macaúba, ou seja, a porcentagem em massa de cada elemento presente em 100 partes de massas do fruto da macaúba. As diferenças apresentadas na composição dos perfis de ácidos graxos descritos pelo autor sugerem comportamentos distintos; para a polpa e casca da macaúba

as concentrações mais elevadas são de ácidos insaturados, seguido de ácidos oleico, enquanto para amêndoa as maiores concentrações são de ácidos saturados e láuricos.

Tabela 4. Composição em ácidos graxos livres do fruto da macaúba (%).

Ácidos Graxos	Macaúba			Dendê	Babaçu
	Casca	Polpa	Amêndoa	Amêndoa	Amendôa
Ácido Caprílico	-	-	6,2	2,7	6,8
Ácido Cáprico	-	-	5,3	7,0	6,3
Ácido Láurico	-	-	43,6	46,9	41
Ácido Mirístico	-	-	8,5	14,1	16,2
Ácido Palmítico	24,6	18,7	5,3	8,8	9,4
Ácido Palmitoleico	6,2	4,0	-	-	-
Ácido Esteárico	5,1	2,8	2,4	1,3	3,4
Ácido Oleico	51,5	53,4	25,5	18,5	14,2
Ácido Linoleico	11,3	17,7	3,3	0,7	2,5
Ácido Linolênico	1,3	1,5	-	-	-
Ácidos Saturados	29,7	21,5	71,2	80,8	83,3
Ácidos Insaturados	70,3	78,5	28,8	19,2	16,7

Fonte: CETEC, 1983 (Adaptado).

O óleo de macaúba possui uma proporção de ácido graxo monoinsaturado; tal característica está relacionada à redução de doenças cardiovasculares e controle de dislipidemias (CICONINI, 2012).

O óleo de amêndoa é referência como fonte de ácidos graxos, como o oleico, láurico e palmítico (ZANATTA, 2015). Possui alto teor lipídico e a presença de ácidos graxos de grande importância para indústria farmacêutica e cosmética (GOULART, 2014). A estabilidade e consistência do ácido láurico conferem um valor nobre para a indústria cosmética (CARVALHO, 2018).

### 2.2.3 Características físico-químicas

O conhecimento sobre as características físico-químicas dos óleos vegetais é fundamental para o dimensionamento de todo o processo produtivo. Além disso, através do estudo das características físico-químicas da matéria prima é possível verificar a viabilidade técnica e econômica. A caracterização físico-química dos óleos possibilita melhor direcionamento para diversas indústrias com interesse potencial (SILVEIRA, 2014).

Para determinar a qualidade dos óleos vegetais existem diversos parâmetros, tais como: índice de acidez; índice de iodo; índice de saponificação; peróxido; teor de água; material



volátil; estabilidade oxidativa; análise por espectroscopia na região ultravioleta e densidade relativa, entre outros parâmetros.

O índice de peróxido auxilia na determinação do grau de oxidação dos óleos e está relacionado com as insaturações presentes e que o índice de saponificação é um indicador de que o óleo possui ácidos graxos de pequena massa molecular média, já que é inversamente proporcional à massa molecular média dos ácidos graxos esterificados ao glicerol.

O índice de acidez quantifica os ácidos livres presentes em uma amostra (GOULART, 2014) além de indicar a hidrólise da molécula de triacilglicerol, que é a base da composição dos óleos vegetais (FAVARO et al., 2018). A estabilidade oxidativa determina a capacidade do óleo em resistir às reações de oxidações provocadas pelas reações do oxigênio com os ácidos graxos insaturados (GOULART, 2014).

Para a produção de biodiesel são aceitáveis valores inferiores a 2% de biodiesel, pois à medida que o índice de acidez se eleva ocorre redução no processo de esterificação. Logo, é indicado que a acidez se mantenha a níveis tão baixos quanto possível (GOULART, 2014).

Já para sua utilização na indústria alimentícia os valores são mais rigorosos. A Anvisa estipulou os limites máximos do índice de acidez e de peróxido para os óleos vegetais destinados ao consumo humano; são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Limites máximos estabelecidos pela ANVISA para óleos vegetais.

<b>Tipo de óleo ou gordura</b>	<b>Valor máximo de acidez</b>	<b>Índice de Peróxido</b>
Óleos e gorduras refinados	0,6 mg KOH/g	10 meq/kg
Óleos prensados a frio e não refinados	4,0 mg KOH/g	15 meq/kg

Fonte: ANVISA, (2021).

A Tabela 6 apresenta algumas características físico-químicas para o óleo da amêndoa e óleo de polpa da macaúba apresentados por Farias (2010); percebe-se que o índice de acidez do óleo de amêndoa está dentro das especificações estipuladas pela ANVISA, enquanto o óleo de polpa possui elevado teor de acidez.

Tabela 6. Características físico-químicas dos óleos da macaúba.

<b>Características Físico-químicas</b>	<b>Unidade</b>	<b>Amêndoa</b>	<b>Polpa</b>
Umidade e voláteis (105°C)	%m/m	0,43 ± 0,11	0,93 ± 0,24
Índice de acidez	%Ác. Oleico	0,29 ± 0,12	0,96 ± 0,33
Densidade	g/cm <sup>3</sup>	0,918 ± 0,004	0,926 ± 0,005
Sólidos insol. Em éter	%m/m	8,15 ± 1,12	17,1 ± 2,3
Índice de peróxido	mEqO <sub>2</sub> /kg	1,17 ± 0,37	1,62 ± 0,26

Fonte: Farias (2010).

A macaúba vem sendo investigada há bastante tempo. Um estudo muito relevante e minucioso sobre as oleaginosas nativas no Estado de Minas Gerais foi realizado há cerca de 40 anos (CETEC, 1983) e apresentou as características físico-químicas da macaúba, casca, polpa e amêndoa; do dendê, polpa e amêndoa e da amêndoa do babaçu, cujos resultados são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7. Características físico-químicas da macaúba, dendê e babaçu.

<b>Características Físico-Químicas</b>	<b>Macaúba</b>			<b>Dendê</b>		<b>Babaçu</b>
	<b>Casca</b>	<b>Polpa</b>	<b>Amêndoa</b>	<b>Polpa</b>	<b>Amêndoa</b>	<b>Amêndoa</b>
Teor de ácidos graxos livres (ácido oleico, %)	0,8-1,2	0,3-1,0	0,2-0,7	0,2	0,6	0,2
Densidade 25°/25°C (g/cm <sup>3</sup> )	0,9194	0,9256	0,9176	0,9118	0,9184	0,9153
Índice de refração (25°)	-	1,4662	-	-	-	1,4562
Índice de saponificação	194	192	221	197	248	249
Índice de Iodo	78	84	20	98	14-22	16
Poder Calorífico Superior (kcal/kg)	9380	9370	8520	9460	8790	8950
Viscosidade a 37,8 °C (cSt)	42,5	46,4	35,2	43,0	-	36,5
Insaponificáveis (%)	0,6	0,1	0,1	1,6	0,8	0,8
Índice de Peróxido (mEq/g)	14,3	8,0	9,4	18,3	-	10,0
Ponto de solidificação (°C)	14,8	16,0	24,5	15,0	23,8	26,5
Peso molecular médio	859	866	710	851	706	698

(cromatografia gasosa)						
Cor ASTM	3,5	3,0	1,0	1,0	0,5	0,5
Cinzas (%)	0,04	0,01	<0,01	0,01	-	0,03
C (%)	75,92	76,03	75,08	77,20	-	74,76
H (%)	11,63	11,51	11,65	11,72	-	11,57
O (%)	12,45	12,46	13,27	10,88	-	13,67

Fonte: CETEC, 1983.

Percebe-se a semelhança do óleo de amêndoa de macaúba com a amêndoa do dendê. E dentre as frações da macaúba percebe-se que a casca e a polpa têm características similares; tal fato é esperado, uma vez que parte do óleo da polpa é absorvida na superfície da casca.

### 2.3 Macaúba

Neste tópico serão apresentadas informações sobre o cenário atual da macaúba, discorrendo sobre a produção agrícola e sua distribuição geográfica.

#### 2.3.1 Características gerais

Pertence à família *Arecaceae*, ex-*Palmae*, e ao gênero *Acrocomia* e possui variações morfológicas dentro de uma mesma espécie devido à dispersão geográfica (CICONINI, 2012; CARGNIN; JUNQUEIRA; FOGAÇA, 2008).

Silva (2019) relata que existe uma grande variação fenotípica, em destaque as características morfológicas, entre plantas com origens distintas. E entre os respeitados institutos botânicos não possuem uma concordância sobre a taxonomia para determinar se os fenótipos são ecótipos, subespécies ou espécies diferentes da *Acrocomia*. Apesar dos conflitos sobre a nomenclatura, Queiroga et al. (2016) considerou que *Acrocomia* pode ser dividida em três principais espécies: *A. sclerocarpa*, *A. totai* e *A. intumescens*.

No Laboratório da Macaúba, do Departamento de Engenharia Química da Escola de Engenharia da UFMG, estudos iniciados há 10 anos vêm realizando pesquisas que analisam diversos aspectos relativos ao fruto: metodologia de coleta e armazenamento, composição e teor nutricional, rotas e análise da viabilidade econômica do processo industrial de extração do óleo, produção de alimentos e biodiesel (SILVA *et al.*, 2013; REZENDE *et al.*, 2016; REZENDE *et al.*, 2017).

### 2.3.2 Distribuição geográfica

A macaúba é uma palmeira nativa de regiões tropicais das Américas, estando ausente apenas nos países Equador e Peru (COSTA, 2016). Sendo encontrada em todo território nacional, com maiores proporções nos Estados de Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul (QUEIROGA *et al.*, 2016). Esta espécie tem capacidade de se desenvolver em locais onde os fatores ambientais são desafiadores, como por exemplo, temperaturas elevadas, alta radiação solar e prolongada falta de chuva sazonal (PIRES, 2013). Necessita de pouca água para se desenvolver (CARVALHO, 2010).

Considera-se que a macaúba apresenta grande potencial de produção devido ao elevado teor de óleo e a capacidade de adaptação a densas populações (CARGNIN; JUNQUEIRA; FOGAÇA, 2008). Seu cultivo ainda possibilita a integração com lavoura pecuária ou outros tipos de lavoura (MOREIRA; REZENDE; PASA, 2020).

O estado de Minas Gerais possui condições favoráveis à silvicultura, como condições de clima e solo, vasta extensão territorial e condições de mercado. Além de ser um dos principais estados de ocorrência da macaúba, tendo inclusive legislação de incentivo ao cultivo, extração, comercialização, consumo e transformação da macaúba, a Pró-macaúba Lei nº 19.485 (CARVALHO; SOUZA; MACHADO, 2011). A Figura 4 ilustra a distribuição da macaúba no mapa do Brasil e a Tabela 8 apresenta a distribuição do gênero da *Acrocomia* no território brasileiro.

Figura 4. Mapa de ocorrência natural da macaúba no Brasil.



Fonte: <http://www.umpedeque.com.br/arvore.php?id=710>

Tabela 8. Distribuição por espécie do gênero *Acrocomia* pelos Estados de ocorrência.

<b>Espécie</b>	<b>Estados de Ocorrência</b>
<i>A. acueleta</i>	MG, MS, PA, RJ e SP
<i>A. intumescens</i>	PE, AL, BA e PA
<i>A. glaucophylla</i>	AM, GO e MS
<i>A. mokayaba</i>	MT
<i>A. odorata</i>	MS
<i>A. ericantha e</i> <i>A. microcarpa</i>	AM
<i>A. wallaceana</i>	PA E AM
<i>A. totai</i>	MT, MS, PR

Fonte: Adaptado de Costa, 2016.

### 2.3.3 Palmeiras e fruto da macaúba

Melo (2012) descreve as características morfológicas da macaúba como: altura de 10 a 15 metros, seu tronco é cilíndrico com diâmetro de 20 a 30 centímetros, possui espinhos escuros e compridos. A Figura 5 apresenta os aspectos morfológicos gerais da macaúba.

A *Acrocomia totai* possui caule de 4 a 15 metros de altura com várias cintas de espinhos pretos com 5 a 8,5 centímetros de comprimento. As folhas possuem 150-235 centímetros de comprimento e possuem folíolos em grupos de 2 ou 3. As flores nascem em cachos entre as folhas. Já a *Acrocomia Sclerocarpa* possui em geral de 10 a 15 metros de altura, com estirpe ereto com 20-30 centímetros de diâmetro (QUEIROGA *et al.*, 2016).

Estudos apontam que os frutos são compostos em média por 20% de casca, 40% de polpa, 33% de endocarpo e 7% de amêndoa (CARGNIN; JUNQUEIRA; FOGAÇA, 2008). A casca também pode ser denominada de epicarpo, a polpa pode ser chamada de mesocarpo, e o endocarpo corresponde às castanhas e em seu interior, ou seja, as amêndoas. O fruto da macaúba é apresentado na Fig. 5.

Figura 5. Fruto da macaúba.



Fonte: Autora, (2022).

Goulart (2014) define o fruto como uma “drupa comestível globosa de formato esférico, ligeiramente achatado, constituído por epicarpo (casca) e mesocarpo fibrosos e endocarpo duro e denso (tegumento) com alto poder calorífico”.

Farias (2010) avaliou as propriedades sensoriais do fruto da macaúba, descrevendo-as como:

- a) Epicarpo: Corresponde à parte externa do fruto, possui estrutura fibrosa fina, dura e quebradiça que se rompe facilmente quando maduro. Sua coloração quando o fruto está em desenvolvimento é esverdeada e quando maduro varia de amarelo esverdeada a marrom claro. Casca inodora na parte externa e com odor característico da polpa na parte interna.
- b) Mesocarpo: Corresponde a parte carnosa do fruto. Quando os frutos estão imaturos possuem estrutura fibrosa crespa com coloração esbranquiçada inodora e insípida; quando maduros, apresentam coloração amarelada e secreta um líquido mucilaginoso e viscoso quando pressionada. O sabor é característico e agradável ao paladar.
- c) Endocarpo: O endocarpo fica aderido à polpa e envolve a amêndoa, possui parede óssea enegrecida. Possui estrutura maciça, dura e densa de coloração variando do marrom escuro ao negro.

- d) Endosperma: É a parte mais interna do fruto, possui forma esférica ou achatada, estrutura fibrosa, dura, esbranquiçada e recoberta por uma película fina de coloração marrom escura. Possuem sabor e odor característico de amêndoas de palmeiras.

## 2.4 Processamento e obtenção do óleo de macaúba

O tópico a seguir contém os detalhes sobre os processos envolvidos na obtenção do óleo de macaúba. A obtenção do óleo de macaúba se inicia com o cultivo da espécie e posterior colheita dos frutos; em seguida ocorrem os processos de secagem, descascamento, despulpamento, extração, filtragem e refino. Todos os processos serão descritos a seguir.

### 2.4.1 Cultivo e Colheita

MOURA, VENTRELLA & MOTOIKE (2010) citam que os dados sobre a estrutura da semente da macaúba e suas características tecnológicas eram escassos e reforçaram a necessidade de desenvolver e aperfeiçoar técnicas de propagação e melhoramento genético da espécie. Dessa forma, o professor Sergio Motoike e sua equipe, da UFV, vêm desenvolvendo uma série de pesquisas ao longo dos últimos quinze anos que envolvem estudos genéticos das sementes (MOURA, *et al.*, 2009; GRANJA *et al.*, 2018), desenvolvimento de novas culturas (PIRES *et al.*, 2013; MONTOYA *et al.*, 2016), entre várias outras pesquisas.

Para que a macaúba atinja o seu potencial de exploração evidencia-se a necessidade de ampliar os estudos sobre o conhecimento de seus hábitos, com o intuito de aumentar o rendimento das plantas e conhecimento sobre sua ecologia e silvicultura. Um dos meios para sua domesticação é através do melhoramento genético (CARVALHO; SOUZA; MACHADO, 2011).

Estudos mais recentes como o de Souza (2021) que avaliou a Ecofisiologia de bancos de sementes de macaúba corrobora para domesticação e ampliação dos conhecimentos sobre a cultura. A autora afirma que a espécie ainda se encontra em estado selvagem ou semidomesticada, e que os resultados encontrados em sua pesquisa ampliam os conhecimentos sobre a biologia das sementes da espécie e auxiliam na produção de mudas e manejo de plantios.

Souza (2013) desenvolve em seu trabalho uma tecnologia de avaliação e vigor para o armazenamento de sementes. O comportamento das sementes pós-colheita permite a adoção de medidas adequadas de manipulação, beneficiamento, secagem e métodos de armazenamen-

to a fim de manter a qualidade fisiológica até o plantio. Os testes de vigor determinam o potencial germinativo das sementes. As sementes podem ser classificadas de acordo com seu comportamento fisiológico como: ortodoxas, intermediárias e recalcitrantes.

As sementes da macaúba são obtidas diretamente na natureza, pela colheita dos frutos de plantas matrizes. Através dos métodos de pré-germinação é possível minimizar os efeitos da dormência das sementes; neste processo deve-se tomar cuidado com as estruturas precursoras das raízes e do caule para não inviabilizar o uso das sementes, sendo este o método mais eficaz para manutenção de um plantio comercial da macaúba (CARVALHO; SOUZA; MACHADO, 2011). A Fig. 6 ilustra as sementes após o processo de pré-germinação.

Figura 6. Semente pré-germinada da macaúba.



Fonte: CARVALHO; SOUZA; MACHADO, (2011).

A produção das mudas ocorre em duas etapas: pré-viveiro e viveiro, e seguirão para o plantio quando atingirem entre 50 e 60 cm de altura e cinco e seis folhas abertas. Recomenda-se realizar uma análise do solo para que sejam executadas possíveis correções. O sistema de plantio adotado influenciará no espaçamento, as covas poderão ser abertas manualmente e com dimensões mínimas de 40 x 40 x 40 cm (CARVALHO; SOUZA; MACHADO, 2011).

Moreira *et al.* (2019) avaliaram a distribuição radicular da macaúba; este foi o primeiro trabalho a realizar esta análise no campo. A análise do padrão de distribuição é importante, pois está associado à nutrição da cultura, uso da água e ancoragem da planta, impactando o cultivo de gerações futuras. Além deste, outros estudos, foram realizados nos últimos anos, objetivando o aumento da produtividade de diversas palmeiras oleaginosas, dentre elas a macaúba.



A macaúba é uma espécie tradicionalmente submetida ao extrativismo, sendo amplamente utilizada em âmbito doméstico; é também comercializada de forma incipiente, nas regiões brasileiras. Goulart (2014) ressalta que a exploração ocorre de forma a não preconizar a qualidade do óleo a ser obtido. Seu cultivo favorece as regiões locais com a geração de emprego e renda reduzindo o êxodo rural.

O amadurecimento dos frutos varia dependendo da região, mas em geral, é sazonal, durante quatro a seis meses por ano (MACHADO, 2018).

Os frutos estão prontos para serem colhidos com maior intensidade entre os meses de novembro e fevereiro. A maturação ocorre de maneira uniforme e quando está no ponto para o processamento o fruto se desprende do cacho. Os frutos podem ser colhidos diretamente do chão ou podem ser colocadas redes de sustentação e realizar o corte dos cachos utilizando uma foice. Após a colheita os frutos deverão ser encaminhados para o processamento (CARVALHO; SOUZA; MACHADO, 2011).

As redes de sustentação, quando presentes, amortecem a queda e reduzem os danos mecânicos nos frutos. Após a colheita é ideal realizar uma seleção prévia em campo para eliminar os frutos danificados, deformados ou doentes, obtendo um produto mais uniforme.

O meio mais comum de realizar a coleta é recolhendo os frutos que caem diretamente do chão; este método é demorado e apresenta grandes desperdícios de frutos. Neste contexto Nunes (2015) propôs um objeto auxiliar para captação dos frutos antes que cheguem ao chão, a invenção consiste em sacos cônicos compostos de 2 aros e 2 abraçadeiras.

#### 2.4.2 Armazenamento pós-colheita

A macaúba é uma espécie sazonal, perecível e com alto volume de produção, e necessita que seu armazenamento ocorra por períodos que atendam a capacidade de processamento, comercialização e logística das usinas.

Goulart (2014) cita que a literatura não possui muitos conhecimentos sobre o comportamento pós-colheita da macaúba e que por esta razão muitas vezes o armazenamento ocorre utilizando tecnologias de outras culturas ignorando as peculiaridades da espécie, negligenciando desta forma os efeitos do armazenamento na qualidade do óleo.

Durante o processo de amadurecimento dos frutos pós-colheita podem ocorrer transformações físico-químicas e bioquímicas sendo elas: síntese proteica, alteração na permeabilidade das membranas; atividade respiratória; síntese de etileno; produção e decomposição de pigmentos; modificação da estrutura dos tecidos pela hidrólise dos polissacarídeos e alteração

no sabor e aroma. Neste contexto é importante realizar o controle microbiológico para a minimização das atividades biológicas; dentre os métodos de conservação amplamente utilizados na indústria pode-se citar, calor, radiação, microbicidas e armazenagem em ambientes com baixas temperaturas ou atmosferas modificadas (FARIAS, 2010).

Avaliar o processo de armazenamento é fundamental para redução de possíveis perdas de qualidade durante a estocagem. Ações indevidas pós-colheita pode provocar deterioração dos frutos e impactar na qualidade do óleo. Para melhorar a estabilidade dos óleos vegetais durante o armazenamento tem se mostrado eficaz os tratamentos com oxidantes (CARVALHO, 2010).

Uma vez que o armazenamento do fruto ocorre de forma controlada e em ambiente adequado possibilita o aumento no rendimento do óleo, evitando efeitos indesejados como reações de degradação que podem comprometer a qualidade do óleo (FAVARO *et al.*, 2018).

Carvalho (2018) cita a importância de desenvolver sistemas de armazenamento e tratamento dos frutos de modo a preservar a qualidade e ampliar o período de processamento, uma vez que após a colheita o óleo se degrada rapidamente e em pouco tempo atinge elevados valores de ácidos graxos livres.

Favaro *et al.* (2018) elaboraram um sistema de armazenamento simples (Fig. 9), de baixo custo e com baixo consumo de energia, com capacidade para 500 kg de frutos. Ele consistia em uma caixa montada com telas metálicas, num sistema basculante, com um exaustor axial comercial (marca Ventisol, potência de 140 W) acoplado em paralelo por meio de uma mangueira flexível que finaliza em canos de PVC perfurados, para fazer a distribuição do ar no interior do sistema. O ar circula nas mangueiras de conexão com velocidade de saída de 7,6 m/s. No ensaio, os frutos foram armazenados com ventilação a temperatura ambiente de 19,1 °C e 23,0 °C e umidade relativa do ar entre 72% e 84%, operaram com metade da capacidade suportada pelo protótipo.

Figura 7. Protótipo de um sistema de armazenamento (visão frontal à esquerda e vista superior à direita).



Fonte: FAVARO *et al.*, (2018).

Farias (2010) avaliou a armazenabilidade dos frutos da macaúba em três condições distintas: a primeira sem tratamento prévio, a segunda após serem expostos ao sol por 1,5 dias, e por fim os frutos secos em estufa com circulação de ar a 120 °C por três horas. Os parâmetros analisados foram: umidade, teor de lipídios, índice de acidez e peróxido dos óleos da polpa e amêndoa, por um período de 30 dias. Com os resultados obtidos a autora propôs uma rota para coleta e armazenagem dos frutos, sendo: limpeza da área dos macaubais (poda e varredura) uma semana antes do início do processo de deiscência dos frutos; em seguida, coleta dos frutos no chão dos macaubais escolhendo-os sem danos aparentes e fervura imediatamente após a coleta por 25 a 30 minutos; posteriormente secagem, em ambiente de sol forte por no mínimo dois dias sobre lona plástica ou em área cimentada, sanitizada e dedetizado; armazenamento por 14 dias em local limpo, coberto, previamente sanitizado e dedetizado; transporte até a unidade de beneficiamento e posteriormente aquecimento dos frutos na temperatura mínima de 120 °C até redução da umidade inferior a 10 % m/m, ou seja, até a umidade total do fruto ser inferior a 10%, por fim, estocagem em ambiente adequado por até 30 dias.

#### 2.4.3 Secagem

A secagem é uma operação unitária definida como o processo de transferência de calor e massa entre o produto e o ar de secagem (CARVALHO, 2010). Consiste em uma das etapas que antecedem o processamento dos produtos e tem a finalidade de extrair parte da água contida neles.

A água presente em vários alimentos influencia na estrutura, aparência, sabor e na suscetibilidade à degradação por microrganismos (SILVA, 2018). Através da desidratação, ocorre a eliminação da água, que é responsável por criar um ambiente propício ao desenvolvimento e ao crescimento microbiano (MACHADO, 2018). Desta forma, o processo de secagem contribui para a conservação da qualidade e estabilidade pós-colheita.

O estudo da cinética de secagem é fundamental para o desenvolvimento de processos industriais mais eficientes (NUNES, 2015). Para determinar corretamente o tempo e a temperatura de secagem é necessário realizar o estudo da cinética de secagem.

É possível realizar a simulação e otimização do processo de secagem através da modelagem matemática. Carvalho (2018) avaliou nove modelos matemáticos relatados na literatura que descrevem o fenômeno de secagem, e concluiu que os modelos mais apropriados para descrever o fenômeno de secagem de amêndoas de macaúba e subsidiar o dimensionamento de secadores industriais são os modelos de aproximação de difusão: Midilli, Page e Page modificado. Silva (2018) cita que o modelo que apresentou o melhor ajuste foi o de Midilli e o recomenda na representação de processos de secagem da amêndoa da macaúba. Tais equações consideram o tempo de secagem, a razão de teor de água, constante de secagem e alguns coeficientes adimensionais.

A temperatura influencia no tempo de secagem e ao aumentá-la ocorre redução no tempo desse processo, pois o calor transferido do ar para o material é maior, removendo a água mais rapidamente (CARVALHO, 2018).

Observa-se maior eficiência no processo de extração do óleo de macaúba quando os frutos estão secos. Os frutos frescos são úmidos, possuem polpa viscosa e com alta adesividade, devido aos carboidratos mucilaginosos dissolvidos (PETERS; PETRAKOPOULOU; DUFOUR, 2015; FAVARO *et al.*, 2019).

No processo de extração do óleo da polpa, por exemplo, observa-se que quando ela está com umidade elevada ocorre à formação de aglomerados que provocam o entupimento da prensa, influenciando negativamente o processo de extração. Por este motivo é necessário que ocorra redução na umidade (FAVARO *et al.*, 2018; FAVARO *et al.*, 2019).

O tempo de secagem da amêndoa da macaúba é influenciado pelas características das amêndoas, e pelas variáveis: temperatura, velocidade e umidade relativa do ar (CARVALHO, 2018). Para que ela se desprenda do endocarpo é fundamental realizar o processo de secagem.

O processo de secagem natural, quando o endocarpo é exposto ao ar livre, tem duração de 24 a 36 horas (NUNES, 2015).

Martins (2013) avaliou a influência da secagem na conservação da qualidade do óleo de frutos de macaúba e concluiu que o processo é eficiente na conservação pós-colheita, pois reduz a proliferação de microrganismos deteriorantes durante o armazenamento.

#### 2.4.4 Descascadeira/ Despolpador

A primeira etapa do processamento dos frutos da macaúba é no descascador/despolpador. Neste processo objetiva-se a separação do epicarpo do restante do fruto. Em seguida realiza-se também neste equipamento o processo de despolpa.

Machado (2018) ressalta a necessidade de pesquisas e desenvolvimento de soluções para a mecanização do despolpamento, substituindo as rotinas laborais tediosas. O despolpamento por meios mecânicos contribui para a redução na deterioração dos frutos e melhora a qualidade da polpa.

Nos experimentos realizados por Favaro *et al.*, (2018) utilizou-se um despolpador mecânico da marca RM Ltda., com capacidade para batelada de 3 kg. Os autores observaram que a casca poderia ser retirada nos primeiros 30 a 60 segundos do processo e a polpa pode ser retirada após 3 a 6 minutos e que a umidade do fruto influencia diretamente na eficiência desta etapa, alcançando um melhor desempenho quando os frutos possuem umidade reduzida. A Figura 8 apresenta o modelo do despolpar utilizado no trabalho descrito.

Figura 8. Despolpador mecânico marca RM Ltda. para frutos da macaúba. Vista geral (esquerda) e câmara de despolpamento (direita).



Fonte: FAVARO *et al.*, (2018).

Após o despulpamento, a polpa deverá passar por outro processo de secagem e então poderá seguir para a prensagem para a extração do óleo. Além da polpa, outro produto desta etapa é a amêndoa envolta pelo endocarpo, que será direcionada para outro equipamento para que ocorra a quebra do endocarpo e separação da amêndoa.

#### 2.4.5 Processo de Quebra

Esta etapa objetiva separar a amêndoa do mesocarpo, para que seja possível obter o óleo da amêndoa. Para tal é necessário que o endocarpo passe por um processo de secagem e posteriormente será quebrado em equipamentos apropriados. Salvador (2021) cita que o processo de separação do endocarpo da amêndoa pode ocorrer por meio da operação unitária de moagem.

#### 2.4.6 Extração do Óleo

O processo de extração consiste na remoção do óleo da matéria prima utilizada e tem como produto principal o óleo bruto e subprodutos, o farelo ou a torta resultante. É fundamental conhecer as características intrínsecas relacionadas à macaúba para que o processo de extração seja o mais eficiente possível.

Dentre os métodos existentes para extração os mais populares são extração por solvente, também conhecida como extração sólido/líquido e extração por prensagem mecânica. Existe ainda o processo de extração mista, onde as duas técnicas são combinadas (NUNES, 2013). Todos os métodos podem ser utilizados em escalas laboratoriais e industriais, além de possuírem baixo custo e fácil operacionalidade (COSTA, 2016).

A extração por solvente se caracteriza como um fenômeno de transporte de massa de uma fase para outra com o intuito de separar um ou mais componentes, a partir da afinidade com o composto químico utilizado (COSTA, 2016). Os óleos vegetais são insolúveis em água, mas solúveis em solventes orgânicos (SUTILLE *et al.*, 2007). Nos processos mais modernos a extração de óleos vegetais é realizada por meio de solvente orgânico (NUNES, 2013). Costa (2016) relata que a utilização de solventes alternativos se faz cada dia mais necessário; atualmente o solvente mais utilizado é o hexano.

As variáveis que influenciam no processo de extração por solvente são temperatura, tempo, umidade, quantidade e tipo de solvente, tamanho e forma das partículas (COSTA, 2016). Para a extração com solvente é necessário preparar o material na granulometria apro-

priada para aumentar a área superficial da partícula e facilitar a interação, uma vez que ocorre um aumento na área de transferência de massa por unidade de massa de sólido (SUTILLE *et al.*, 2007).

A prensagem mecânica é o processo mais utilizado na extração de óleos vegetais. Este método possui fácil manuseio, é adaptável a diversas culturas e pode ser utilizado em grandes e pequenas escalas. Consiste na aplicação de pressão através do uso de prensas mecânicas, acarretando a redução do volume da torta ao final da prensagem. Dentre as vantagens pode-se mencionar o fato de este processo não agredir o meio ambiente e não gerar resíduos químicos no óleo e na torta, obtendo um óleo de maior qualidade.

Favaro *et al.*, (2018) realizou a extração mecânica utilizando uma prensa do tipo helicoidal (Fig. 9) (expeller), marca SCOTT TECH, Modelo SEM 610-GERT 60II, calculou ainda a eficiência do processo pela diferença entre o teor de óleo na polpa e o teor remanescente na torta, calculados em base seca.

Segundo Costa (2016) os fatores que influenciam a eficiência no rendimento do processo de extração por prensagem são temperatura, teor de umidade dos grãos, pressão e tempo de prensagem.

Figura 9. Prensa Helicoidal, modelo SEM 610-GERT 60 II, marca SCOTT.



Fonte: FAVARO *et al.*, (2018)

## 2.5 Usos potenciais dos óleos de macaúba e seus subprodutos

No tópico a seguir é apresentada a aplicabilidade do óleo de macaúba, discutindo brevemente sobre o aproveitamento das oleaginosas nos segmentos energéticos e não energéticos, e os demais usos potenciais dos subprodutos obtidos após a extração.

Os óleos provenientes da macaúba podem ser destinados para segmentos energéticos, empregados na produção de biocombustíveis, e também não energéticos sendo direcionado para indústria alimentícia, farmacêutica e cosmética.

As condições edafoclimáticas do país, tais como clima, relevo, umidade do ar, o colocam em uma condição favorável para a ampliação na produção de novas matérias-primas, tanto para fins alimentícios, como energéticos (MACHADO, 2018).

### 2.5.1 Usos não energéticos

Todo o fruto da macaúba possui potencial produtivo, uma vez que todo ele tem um aproveitamento. A aplicabilidade dos produtos e subprodutos é ampla podendo ser empregados nas indústrias alimentícia, cosmética, alimentação animal, entre outros (CARVALHO, 2018).

A diversidade de aplicações da macaúba também é alvo de estudos há décadas. Lorenzi (2006) avaliou os usos e potencialidades de diversas partes da *Acrocomia aculeata* na região do Mato Grosso em dados disponíveis na literatura, conforme apresentado na Tabela 9. Algumas das citações caíram em desuso com a substituição de outros produtos similares ou industrializados e outros ganharam proporções maiores.

Tabela 9. Usos e potencialidades das partes do fruto da *Acrocomia aculeata*.

<b>Parte usada</b>	<b>Modo de preparo</b>	<b>Categoria de uso</b>	<b>Finalidade de uso</b>
<b>Planta inteira</b>	<i>In natura</i>	Ornamental	Paisagismo
<b>Plântulas (parte aérea)</b>	<i>Infusão</i>	Medicinal	Diurético e hipotensor
<b>Raiz</b>	<i>Infusão</i>	Medicinal	Diurético
<b>Estipe</b>	<i>In natura</i>	Madeira	Mourão; estacas; parede; caibro; ripas; calhas para água
<b>Estipe (medula)</b>	Processado	Alimento	Fécula nutritiva
<b>Estipe (meristema apical)</b>	Processado	Alimento	Palmito
<b>Estipe (seiva)</b>	Processado	Alimento	Vinho
		Medicinal	Febrífuga
<b>Folha</b>	<i>In natura</i>	Forragem	Gado bovino e equino
		Fibra	Linha de pescas; redes; chapéu; balaio
		Outro	Cobertura de casas
<b>Espinhos</b>	<i>In natura</i>	Outro	Substituto de agulha para cozer
<b>Mesocarpo</b>	<i>In natura</i>	Alimento	Goma de mascar; fruta



	Processado	Medicinal; alimento (nu- tracêutico)	Para combater pneumo- nia e como fortificante para parturientes
	Processado	Alimento	Licor; sorvete; doces; paçoca; geleia; cocada
<b>Óleo do mesocarpo</b>	Processado	Alimento	Óleo de cozinha
		Medicinal	Analgésico (dor de cabe- ça e nevralgias)
		Cosmético	Hidratante capilar
<b>Endocarpo</b>	<i>In natura</i>	Outro	Substituto da brita no concreto
	<i>In natura</i> (desidratada)	Artesanato	Adornos artesanais (bo- tões, anéis, abotoaduras)
<b>Amêndoa</b>	<i>In natura</i> (crua)	Alimento	Coco
	Processado (torrado)	Alimento	Paçoca
<b>Óleo da amêndoa</b>	Processado	Combustível	Produção de energia
		Medicinal	Laxante
		Alimento	Óleo de cozinha
		Cosmético	Hidratante capilar
		Outro	Ingrediente para sabão

Fonte: Adaptado de Lorenzi (2006).

A polpa e amêndoa podem ser utilizadas na obtenção de óleos vegetais e suas tortas na produção de farinha para uso animal e humano. Endocarpo e epicarpo como fonte de carvão ativado, vegetal ou adsorvente natural (GRANDE; CREN, 2016). A casca pode ser utilizada como fonte de energia através de briquetagem, o endocarpo pode ser utilizado para produção de carvão, as tortas da polpa e amêndoa são ricas em proteína (COSTA, 2016). O mesocarpo pode ser utilizado na produção de licor, através do cozimento com aguardente e açúcar, na fabricação de sorvetes, fabricação de farinha que pode ser utilizada no preparo de biscoitos, bolos, pães, entre outros produtos (LORENZI, 2006).

Os óleos vegetais são ricos em proteínas e podem integrar a dieta humana. Podem ser utilizados como base na fabricação de medicamentos e/ou utilizados na obtenção do biodiesel (SUTILLE *et al.*, 2007). Quando se objetiva a aplicação do óleo vegetal em produtos mais nobres como indústria alimentícia, cosmética ou fármacos é necessário preservar as características físicas e químicas.

Ciconini (2012) cita que o óleo de macaúba possui propriedades que direcionam o seu uso na dieta humana, ainda que possua potencial para a produção de biodiesel e área cosméti-

ca. O óleo de macaúba apresenta alta qualidade e possui os valores nutricionais próximos ao azeite de oliva (CARVALHO, 2010).

Os lipídios têm um importante papel no organismo humano e provocam propriedades sensoriais como sabor, maciez, cremosidade, entre outros aspectos aos alimentos (SILVEIRA, 2014). Estudos recentes como o de Silva *et al.* (2020) avaliaram o potencial do óleo de amêndoa de macaúba como ingrediente lipídico em margarina e maionese. Os autores constataram que as principais vantagens estão relacionadas ao perfil de ácidos graxos e a presença de compostos bioativos, tais como carotenoides e tocoferóis. No, entanto, citaram a necessidade no uso de aditivos alimentares para aprimorar a estabilidade e a textura. Os compostos bioativos possuem ação metabólica ou fisiológica específica; os carotenoides e tocoferóis, por exemplo, apresentam propriedades antioxidantes (FIGUEIREDO; CARVALHO, 2015)

No óleo obtido da amêndoa existe alta concentração de proteínas e aminoácidos essenciais que corroboram por sua utilização como suplemento nutricional para humanos e animais (GOULART, 2014). As características do óleo de amêndoa direcionam o seu aproveitamento para indústria de alimentos na sua condição *in natura* (SILVEIRA, 2014).

Estudos como o de Melo (2012) afirmam que o óleo obtido da amêndoa possui menor estado de degradação, justificado pela presença de endocarpo lenhoso que realiza uma proteção em relação aos efeitos degradativos. No entanto, o óleo proveniente do mesocarpo possui menor preço de mercado, se tornando uma opção economicamente mais viável para obtenção de biocombustíveis. O óleo extraído da amêndoa é considerado fino e é mais indicado para utilizações nobres como a indústria farmacêutica, alimentícia e de cosméticos (CARGNIN; JUNQUEIRA; FOGAÇA, 2008).

Xavier e Costa (2020) citam que existem poucos estudos que direcionem o fruto da macaúba como matéria prima direta na indústria cosmética e farmacêutica. No entanto existem muitas pesquisas sobre as propriedades dos ácidos graxos contidos no óleo da macaúba. Os autores realizam um mapeamento científico e constataram que a macaúba está em ascensão no ramo de cosméticos e fármacos.

Dentre os estudos sobre o aproveitamento da indústria alimentícia pode-se citar os trabalhos de Galvani e Santos (2010); Dessimoni-Pinto *et al.* (2010); Verediano (2012); Silveira (2014); Oliveira (2019); Valério *et al.* (2014), entre outros.

Pode-se citar os estudos da macaúba nas indústrias cosméticas e farmacêutica; Traesel (2015); Debmandal e Mandal (2011); Callegari, Cren e Andrade (2014), entre outros.

As principais aplicações são apresentadas na Tab. 10, e a Fig. 10 apresenta possíveis produtos dessas aplicações.

Tabela 10. Aplicações dos principais derivados do fruto da macaúba.

Endocarpo	Torta de polpa	Torta de amêndoa	Óleo da polpa	Óleo da amêndoa
Carvão Vegetal	Fertilizante	Ração Animal	Querosene	Cosméticos
Carvão Ativado	Farinha alimentícia		Diesel Verde	Alimentos

Fonte: Adaptado de Salvador, 2021.

Figura 10. Aproveitamento dos subprodutos obtidos após processamento.



Fonte: Autora, (2022).

### 2.5.2 Usos energéticos

O biodiesel é uma das soluções energéticas renováveis que vem se consolidando mundialmente ao longo dos anos, por se tratar de uma fonte energeticamente sustentável. Essa ascensão é caracterizada por inúmeros benefícios econômicos, ambientais e sociais que sua utilização propicia.

O biodiesel é um éster obtido principalmente através de um processo químico de transesterificação, no qual os triglicerídeos presentes nos óleos e gorduras reagem com álcool, metanol ou etanol. No entanto, pode ser produzido através de outros processos como o craqueamento, esterificação, entre outros. Outra etapa importante de sua produção é o processo

de purificação, que é indispensável para a sua comercialização, tal etapa objetiva a adequação às especificações de qualidade estabelecidas pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis.

O uso dos combustíveis fósseis está relacionado às emissões tóxicas de dióxido de carbono e às mudanças climáticas. Ao se misturar o biodiesel ao diesel, ocorre redução nos níveis de emissão de material particulado, monóxido de carbono e outros hidrocarbonetos, com baixa perda de energia (MALODE *et al.*, 2021).

O uso de biodiesel traz inúmeras vantagens, tais como: redução na emissão de poluentes devido à substituição do óleo diesel proveniente do petróleo; combate ao efeito estufa; reforça a diversificação da matriz energética, redução nas compras de óleo diesel de países estrangeiros e redução na exportação de grãos in natura, que serão utilizados para a produção de óleo dentro do país, geração de trabalho e renda; estimula a agricultura familiar; entre outros (FILHO; COLOMBO; BERTON; 2012).

Melo (2012) cita que a produção de biodiesel é sustentável, devido a menor emissão de carbono. Outro grande benefício é na redução na poluição atmosférica e no efeito estufa, pois durante a queima ocorre combustão completa com baixa emissão de carbono, além de que ao longo do ciclo, as espécies utilizadas são capazes de absorver gás carbônico, tendo, portanto, uma resultante neutra de emissão, contribuindo para a sustentabilidade do país.

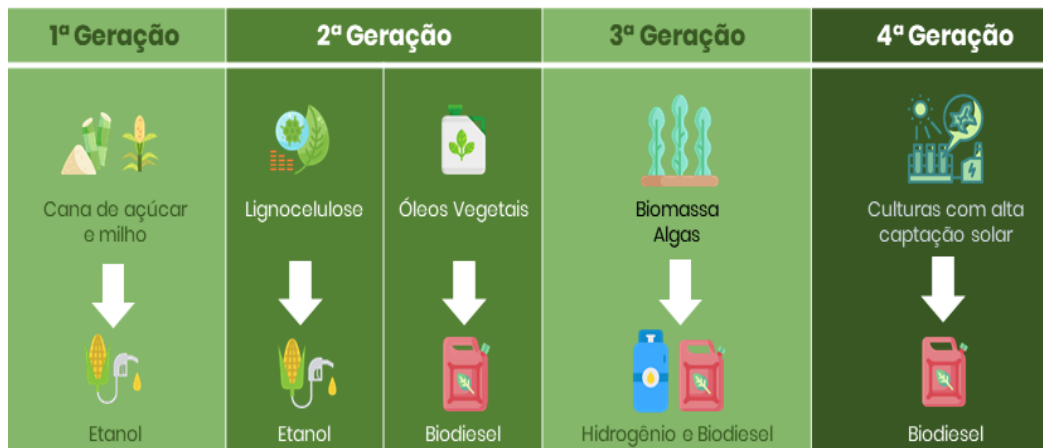
Um dos principais efeitos econômicos é na redução na importação de combustíveis fósseis, trazendo maior segurança e estabilidade para o país, principalmente em casos de crises políticas e internacionais na qual os preços dos barris sobem desenfreadamente. Além de beneficiar a economia local e regional com a geração de renda e empregos em regiões descentralizadas acarretando a redução do êxodo rural.

O biodiesel pode ser obtido a partir de uma gama de opções de matérias primas. Algumas destas opções já são comerciais, no entanto, estão sujeitos a melhorias e otimização (VELÁSQUEZ ARREDONDO *et al.*, 2012). Melo (2012) reforça que a matéria prima é um dos principais pontos para produção de biodiesel e que o país possui características favoráveis que possibilitam a plantação de diversas culturas vegetais. A utilização do biodiesel se torna viável quando sua matéria-prima possui baixo custo. Existem diversas opções de palmeiras oleíferas por meio das quais é possível sua produção.

O crescimento na busca por fontes renováveis de energia coloca as espécies oleaginosas em destaque. Malode *et al.* (2021) reforça que é necessário examinar com cautela a produção de biocombustíveis oriundos de alimentos e commodities agrícolas.

Os biocombustíveis são divididos em quatro gerações (apresentadas na Figura 11), conforme sua matéria prima de origem. Os biocombustíveis de 1º geração são os mais tradicionais, os de 2º e 3º geração, são mais modernos e sustentáveis. Os de 4º geração estão associados a uma área nova e com grandes perspectivas de evolução.

Figura 11. Gerações dos biocombustíveis.



Fonte: SABINO *et al.*, (2021).

Os biocombustíveis de primeira geração são obtidos a partir de culturas bioenergéticas que também estão inseridas no mercado alimentício e que possuem em sua composição amido ou açúcar. Um exemplo de combustível de primeira geração é o bioetanol obtido da cana de açúcar. Já os de segunda geração são obtidos de matéria prima não alimentar, tais como biomassa lignocelulósica, oriundos da lignina, celulose e hemicelulose, presentes em produtos agrícolas e florestais. Temos o bioetanol obtido a partir da palha da cana de açúcar e o biodiesel obtido a partir de culturas não comestíveis, como o óleo de Jojoba. Os de terceira geração são oriundos de algas e de micróbios, sendo a alga marinha uma das macroalgas mais utilizadas no processo de obtenção através do processo de fermentação. Os da quarta e última geração ainda estão nos estágios iniciais de desenvolvimento e tem-se como matéria prima microrganismos produzidos geneticamente tais como cianobactérias (GUEDES, 2020).

O conceito de bioenergia está associado à capacidade de sistemas agrícolas fornecerem energia de forma renovável (CARVALHO, 2010). Iniciativas que envolvam bioenergia

em um nível local proporcionam benefícios econômicos através da geração de emprego e consequentemente de renda para diversas famílias rurais (MALODE *et al.*, 2021).

O Brasil apresenta grande potencial para cultivo de diversas espécies que podem ser utilizadas como matéria-prima para obtenção de biodiesel. Alguns fatores relevantes predominantes no país e que contribuem para a agricultura são: grande área territorial agricultável e com capacidade de expansão em curto prazo; grande capacidade hídrica e regularidade de chuvas em diversas regiões do país.

A obtenção de biodiesel através de culturas vegetais beneficia diversos agricultores familiares devido ao aumento no cultivo e comercialização das matérias-primas necessárias, acarretando o aumento de renda e na redução das disparidades socioeconômicas (QUEIROGA *et al.*, 2016).

Dentre as opções vegetais disponíveis a macaúba apresenta-se com características atrativas, pois sua produção de óleo pode atingir até  $4.220 \text{ L ha}^{-1}$  (CRUZ *et al.*, 2017). Outra característica relevante é a abundância desta espécie no estado de Minas Gerais (PEREIRA *et al.*, 2014). Além do mais, a alta produtividade e a qualidade do óleo apresentam características interessantes para a produção de biodiesel (MONTROYA, 2013).

A macaúba se destaca por apresentar alta produtividade por hectare e baixos custos de manutenção. A desvantagem desta palmeira e de outras é o tempo de maturação, em média de 5 a 8 anos para a obterem a produtividade máxima. A principal espécie utilizada no país para a produção de biodiesel atualmente é a soja devido a maior capacidade produtiva e ao valor de seu subproduto. A macaúba é capaz de produzir seis vezes mais que a soja (MELO, 2012).

A predominância na utilização de soja se justifica pelo avançado estado de desenvolvimento tecnológico, logística eficiente e estruturação da cadeia produtiva desta cultura. Ainda assim existe um vasto espaço para outras espécies oleaginosas para atender as necessidades de óleo vegetal, tendo opções com produtividade superior a ela (GOULART, 2014).

Além da macaúba, existem outras opções interessantes, como por exemplo, o dendezeiro do qual é possível extrair elevadas quantidades de óleo de palma. Seu cultivo apresenta condições favoráveis ao meio ambiente; dentre elas pode-se citar sua associação no cultivo de leguminosas de cobertura de solo (LEBID; HENKES, 2015).

Um dos fatores predominantes para a implantação de políticas que estimulem a produção de biodiesel através de palmeiras oleíferas é a análise da viabilidade econômica. Em 2017 foi realizada uma simulação e análise econômica da produção de biodiesel a partir de óleo de

macaúba. Os resultados encontrados por Cruz *et al.*, (2017) indicam que o biodiesel obtido atingiu os limites de pureza estabelecidos e economicamente observou-se que os custos com matéria prima foram predominantes. Além disso, os custos de produção estão relacionados com o volume produzido. Conclui-se que com a ampliação na oferta e redução de custos associados à macaúba, esta rota para obtenção do biodiesel poderia se tornar competitiva.

A macaúba foi utilizada como matéria prima em um trabalho desenvolvido por Pereira *et al.*, (2014) no qual o óleo de macaúba foi avaliado como alternativa para a produção de biodiesel utilizando irradiação com micro-ondas. A metodologia consistia na extração do óleo da polpa e posterior análise de sua composição e caracterização físico-química. A produção do biodiesel foi realizada em um forno doméstico de micro-ondas e o processo de purificação foi realizado com três lavagens consecutivas. De acordo com os resultados encontrados, os autores concluíram que a macaúba possui grande potencial para a produção de biodiesel e que o método utilizado atendeu as expectativas e foi considerado promissor.

Um projeto foi realizado em parceria com a Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC Minas), a UFMG e a empresa BChem Biofuels, usando um motor da empresa Fiat, de Betim, MG, para testar o biocombustível da macaúba em tratores agrícolas. Durante os testes, foram utilizadas misturas de 10% e 20% do biodiesel de macaúba. Os resultados, noticiados em 2020, mostraram desempenho e consumo comparáveis ao diesel comercial brasileiro, com tendência de redução nas emissões de monóxido de carbono (CO) e matéria particulada (PM) (<https://www.3blmedia.com/News/FPT-Industrial-Investigating-Plant-Based-Biofuels>). Esse fato justifica a continuidade dos estudos e pesquisas sobre a produção deste tipo de biodiesel.

LANES; COSTA & MOTOIKE, (2014) destacam o potencial da macaúba como fonte de óleo para a produção de bioquerosene e citam que o cenário para a produção de biocombustíveis para a aviação começa a ser promissor.

Neste cenário, a utilização do óleo de macaúba para a produção de biodiesel é interessante por não se tratar de um óleo comestível e não comprometer a dieta humana (MELO, 2012), além de possuir alta acidez (MOREIRA; REZENDE; PASA, 2020).

### 3. METODOLOGIA

Neste capítulo aborda-se a metodologia empregada para realização da análise do consumo energético do processo de extração de óleo de macaúba. A metodologia dessa pesquisa seguiu, aproximadamente, os seguintes passos: identificação do maquinário utilizado na extração do óleo, incluindo o consumo energético, por meio de acompanhamento de visita técnica; elaboração do organograma de processamento a ser estudado; busca de dados sobre a cada etapa do processo; cálculos dos consumos energéticos; comparação entre consumo energético para a obtenção dos produtos finais e o potencial energético dos produtos e subprodutos obtidos.

#### 3.1 Planta Conceitual

Para melhor compreensão sobre o processo de extração do óleo de macaúba realizaram-se duas visitas técnicas na UFV para avaliação dos mecanismos envolvidos no estudo. Este foi o ponto de partida inicial para o desenvolvimento de uma planta conceitual para extração do óleo do fruto da macaúba.

Desta forma realizou-se o acompanhamento do processo de extração nas instalações da UFV para levantamento de dados de operação e funcionamento dos equipamentos que compõem a planta em estudo. Então, utilizaram-se os dados coletados como ponto de partida para a elaboração de uma planta conceitual de extração do óleo de macaúba.

Posteriormente para validar a planta em estudo, realizou-se um levantamento de informações relevantes e complementares às coletadas previamente, sobre os processos envolvidos na extração do óleo de macaúba, através de pesquisas bibliográficas em artigos, teses, dissertações, catálogos, dados dos fabricantes, entre outros.

Em seguida, determinaram-se os principais parâmetros envolvidos em cada etapa, realizou-se o dimensionamento dos equipamentos e das variáveis inerentes aos processos, para possibilitar a determinação dos gastos energéticos necessários para a extração do óleo de macaúba.

##### 3.1.1 Coleta de dados durante visita técnica

A primeira visita foi realizada no dia 23 de setembro de 2021 guiada pelo professor Dr. Sebastián Giraldo Montoya, do Departamento de Agronomia da UFV, o qual tem profun-



da experiência no tema da macaúba. Após conhecer alguns laboratórios de pesquisa, a visita continuou na empresa onde estão instalados os maquinários para o processamento do fruto, Acrotech, dentro do campus da UFV. O intuito foi conhecer as instalações e as pesquisas desenvolvidas sobre a espécie, com caráter conceitual.

Posteriormente foi realizada uma segunda visita, entre os dias 09 e 16 de fevereiro de 2022, com o intuito de acompanhar integralmente o processo de extração de óleo de macaúba, de ordem prática. Um dos objetivos propostos ao longo desse trabalho de campo foi estabelecer uma rota eficaz para a extração do óleo de macaúba. Foram observados os processos de: secagem; extração da casca; extração da polpa; separação da amêndoa e extração do óleo.

A colheita dos frutos foi realizada no dia 07 de fevereiro de 2022 no Município de Araponga/Minas Gerais, que fica situado a 50 km de Viçosa; ao todo foram colhidos 286 kg de frutos.

No dia seguinte, os frutos foram transportados de carro para Viçosa em sacos plásticos e foram armazenados em temperatura ambiente no laboratório de pós-colheita do setor de fruticultura do Departamento de Agronomia da UFV, até que os frutos fossem processados.

Iniciou-se o processamento no dia 09 de fevereiro de 2022; pesou-se uma amostra de 93,76 kg do montante total dos frutos e realizou-se o primeiro processo de secagem. As estufas utilizadas no processo de secagem são apresentadas na Fig. 12.

Verifica-se que os frutos estão prontos para a próxima etapa quando, ao se friccionar um fruto com o outro, o epicarpo é facilmente trincado. Neste ensaio os frutos permaneceram 16 horas em estufa aquecidas a 80 °C. Em seguida, foram retirados e pesados, com massa de 86,16 kg, obtendo uma redução de 7,6 %.

Posteriormente foi iniciado o processo manual de remoção do epicarpo com o auxílio de um martelo, por um período de aproximadamente 7 horas. Em seguida os frutos foram colocados em sacos plásticos e permaneceram na geladeira por aproximadamente 14 horas.

Figura 12. Estufas utilizadas no processo de secagem da macaúba na UFV.



Fonte: Autora, (2022).

Pegou-se outra amostra com aproximadamente 82 kg de frutos frescos para avaliar o processo de remoção do epicarpo de forma mecânica. Os frutos foram submetidos ao processo de secagem por 2 horas a 100 °C, posteriormente reduziu-se a temperatura para 70 °C, e os frutos permaneceram por 14 horas. Os frutos foram pesados e separados em 7 amostras de 9350 g, e avaliou-se a duração do processo remoção do epicarpo executando mecanicamente.

O epicarpo é separado e sua massa é pesada, e o restante do fruto passa por outro processo de secagem por um período de 2 horas à temperatura de 100 °C. Desta vez, objetiva-se reduzir a umidade dos frutos para que seja possível realizar a próxima etapa que é a despolpa. Os frutos são pesados antes e após serem inseridos na estufa.

Na descascadeira/despoldadeira (Fig. 13) ocorrem dois processos: a remoção do epicarpo e o despoldamento. Os frutos são inseridos na parte superior e através do movimento de rotação e atrito de um fruto com o outro ocorre a separação dos subprodutos. À medida que o processo acontece, um dos subprodutos é expelido na capacidade inferior, enquanto o outro permanece em rotação, sendo liberado por uma saída dianteira do equipamento.

Figura 13. Despoldador mecânico.



Fonte: Autora, (2022).

Posteriormente são inseridos novamente na descascadeira/despoldadeira para o despoldamento dos frutos. O tempo para execução desta etapa foi avaliado.

As frações obtidas do fruto no despoldador mecânico são: epicarpo (casca), mesocarpo (polpa) e endocarpo + amêndoa; foram coletadas separadamente e pesadas imediatamente e são apresentadas, respectivamente da esquerda para direita na Fig. 14.

Figura 14. Subprodutos obtidos na descascadeira/despoldadeira: da esquerda para direita: epicarpo, mesocarpo e (endocarpo + amêndoa).



Fonte: Autora, (2022).

Os subprodutos obtidos passam novamente por outro processo de secagem. Os frutos são inseridos na estufa a temperatura de 100 °C por 60 minutos. Esta etapa é fundamental para a realização da extração e influencia na qualidade final do óleo obtido.

É possível realizar a extração por três vias distintas, dois métodos de extração física e outro método químico, que serão descritas a seguir. A primeira é através do maquinário (Fig. 15), que é uma prensa mecânica; dentro da parte piramidal invertida existe um parafuso sem fim que vai empurrando a polpa para a próxima peça da máquina que se trata de duas peças cônicas pelas quais a polpa vai sendo prensada pelo afunilamento e o óleo é então extraído passando pelos furos e finalmente coletado.

Figura 15. Prensa Mecânica.



Fonte: Autora, (2022).

A segunda via, também por prensagem, ocorre de forma manual por meio de uma prensa hidráulica (Fig. 16), em que a polpa é colocada em um recipiente de inox, onde um pistão é posicionado em cima, acoplado a uma estrutura que é acionada por uma alavanca manual. O material é comprimido devido à pressão aplicada; à medida que o êmbolo se desloca para baixo, ocorre a compressão da polpa e o óleo é escoado e coletado em recipiente âmbar. O terceiro método é realizado em laboratório, em pequena escala, utilizando um equipamento chamado Soxhlet, onde ocorre o processo de extração química, com o auxílio de um solvente.

Na Fig. 16, à esquerda, é apresentada a vista frontal do equipamento; do lado direito exibe-se na parte superior a torta obtida após a prensagem e, na inferior, a vista vertical da torta dentro do compartimento de inox, antes do processo de extração.



Fonte: Autora, (2022).

Após a extração da polpa com a retirada do óleo, resta a amêndoa da macaúba envolta no endocarpo, o qual precisa ser quebrado cuidadosamente para a remoção perfeita da amêndoa. A máquina atualmente utilizada para isso na UFV pode ser vista na Fig. 17.

Os coquinhos são inseridos na parte inferior (Fig. 17, esquerda) e são levados para cima por meio de um parafuso sem fim até o reservatório cilíndrico (Fig. 17, direita) onde, ao caírem, têm os endocarpos quebrados por uma haste que gira rapidamente. É possível controlar tanto a velocidade de subida dos coquinhos quanto a velocidade da haste. A velocidade da haste é de difícil ajuste já que se for abaixo de certo valor, o endocarpo racha, mas não se quebra, e se for acima de certo valor a amêndoa é destruída. Essa etapa também se encontra em fase de desenvolvimento.

Após a quebra do endocarpo, a amêndoa é separada e passa por outro processo de secagem e em seguida é levada para as prensas para a extração do óleo, da mesma forma que ocorre com o óleo da polpa.





Fonte: Autora, (2022).

Após tais processamentos, tem-se como produtos o óleo da polpa de macaúba e da amêndoa de macaúba (Fig. 18), e como subprodutos, o epicarpo e endocarpo que possuem alto potencial energético e podem ser utilizados como carvão, e as tortas da polpa e amêndoa, que também possuem aplicabilidade.

Figura 18. Óleos da polpa (esquerda) e amêndoa da macaúba (direita).

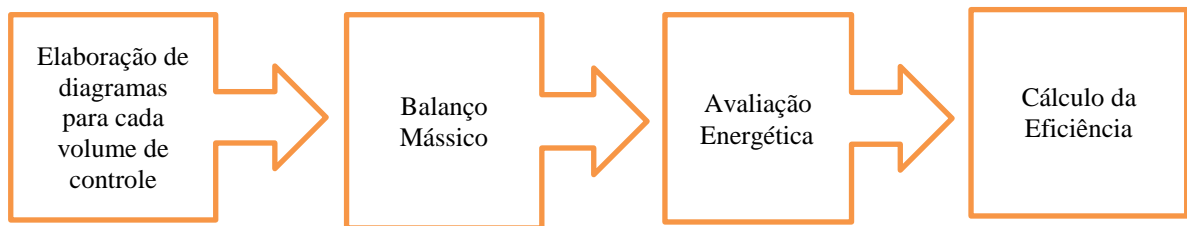


Fonte: Autora, (2022)

### 3.2 Metodologia de análise do consumo e potencial energético

Para melhor compreensão das etapas a serem executadas, apresenta-se na Fig. 19 a ordem sequencial da metodologia adotada para análise do consumo energético do processo de extração do óleo de macaúba.

Figura 19. Sequência metodológica.



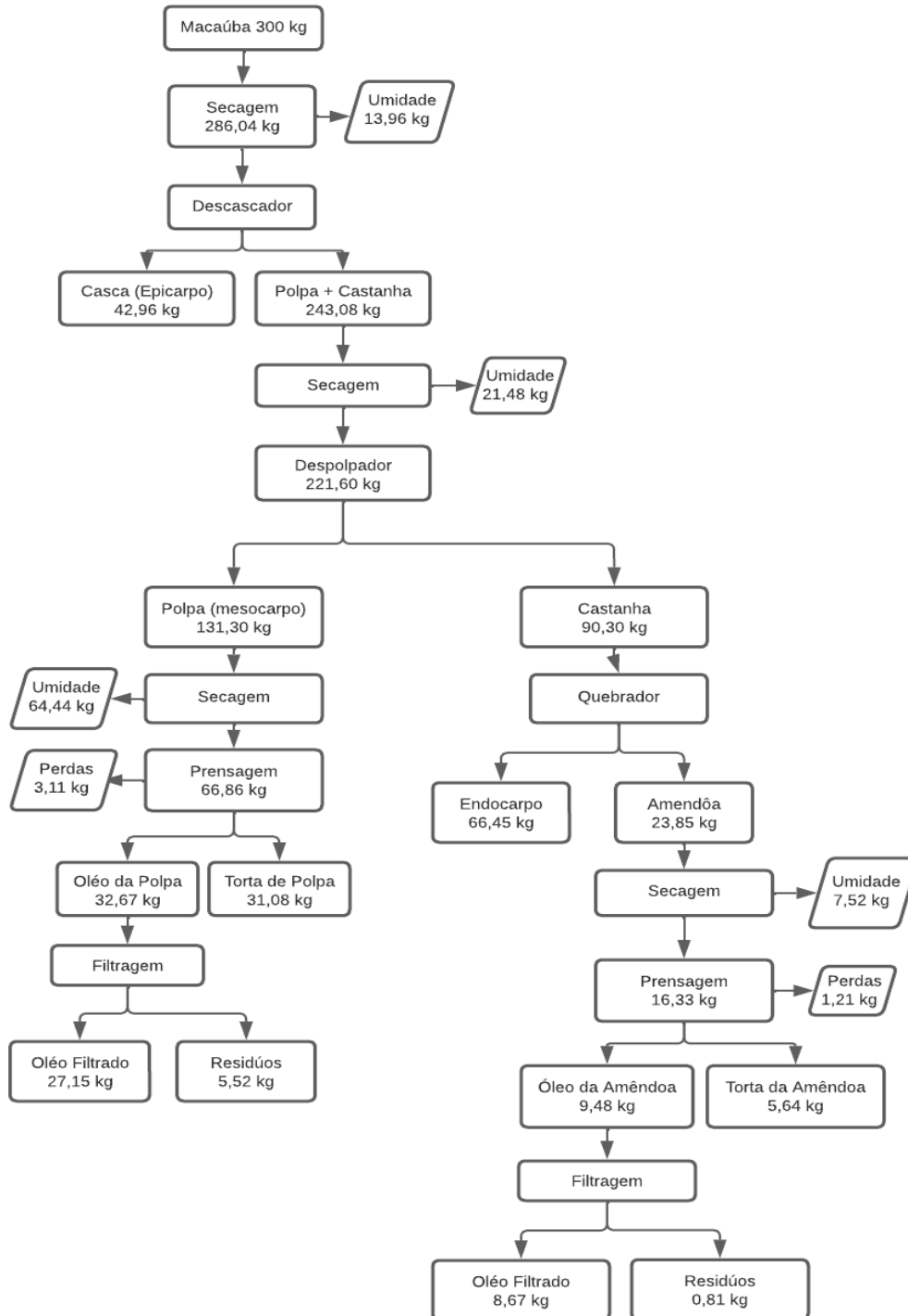
Fonte: Autora, (2023).

As ações sintetizadas são:

- Elaborar um diagrama de blocos para cada volume de controle, apresentando as correntes de entrada e saída;
- Aplicar os princípios de conservação de massa para cada volume de controle;
- Elaborar tabelas e gráficos e comparar os valores mássicos encontrados com os disponíveis na literatura;
- Calcular o consumo de energia elétrica empregado em cada etapa;
- Definir, por meio de revisão bibliográfica, o Potencial Calorífico Superior (PCS) e Inferior (PCI) dos produtos obtidos;
- Elaborar a avaliação energética;
- Discutir e verificar a eficiência de cada volume de controle e do processo global.

A Fig. 20 apresenta os processos envolvidos na extração do óleo de macaúba. Dessa forma, foi elaborado o fluxograma, partindo da massa inicial de 300 kg de frutos. Utilizou-se como referência o balanço de massa e análise biométrica realizada por Farias (2010) para o processamento de 1000 kg de macaúba; realizou-se, portanto, a proporcionalidade para a massa de estudo em questão, ou seja, 300 kg.

Figura 20. Fluxograma do processo de extração do óleo de macaúba.



Fonte: Autora, (2022).



Foram feitas algumas considerações sobre a umidade e composição elementar do fruto da macaúba e o tempo de operação. Posteriormente, determinaram-se os dados de entrada e saída de cada etapa analisada. Determinou-se o poder calorífico de alguns elementos (dados da literatura) para aplicar as equações e balanços termodinâmicos. Foram definidos os pontos de sistema de conversão de energia empregados no processo de extração do óleo de macaúba e então as equações termodinâmicas foram aplicadas.

Calcula-se o teor de água inicial para cada processo de secagem, com base na equação (1), apresentada por Sousa (2020).

$$TU (\%) = \frac{(m_0 - m_1)}{m_0} \quad (1)$$

Onde:

$TU (\%)$  = Teor de umidade (%);

$m_0$  = Massa inicial da amostra em gramas;

$m_1$  = Massa final da amostra em gramas.

Silva (2018) cita que é possível expressar a quantidade de umidade presente em um alimento em base úmida e em base seca. Em base úmida considera-se a massa de água presente na amostra em relação à massa total, já em base seca corresponde à massa de água em relação à massa da amostra seca.

Como condições de contorno para o problema analisado neste trabalho, considerou-se um volume de controle para cada equipamento utilizado; o sistema opera em regime permanente, e desconsideram-se as variações de energia cinética e potencial. Neste tipo de regime, não há variação de massa ao longo do tempo, logo, o fluxo de massa de entrada tem que ser igual ao fluxo de massa de saída (DANTAS, 2010).

### 3.2.1 Balanço de massa

A lei da conservação de massa se baseia nos princípios estabelecidos no século XVIII por Antoine Lavoisier que diz que nada pode ser criado ou destruído e sim transformado (MARCÍLIO, 2019). Esta lei determina que a massa do universo (em estudo) não pode ser criada ou destruída (PINTO, 2010).

Pode-se descrever a equação do balanço de massa pelo somatório mássico de entrada no volume de controle e do que é gerado pelo sistema, subtraindo o somatório mássico de saída e do que foi consumido (MARCÍLIO, 2019). O balanço de massa possibilita a quantificação das perdas que ocorrem ao longo do processo (PINTO, 2010).

Para o cálculo do balanço de massa no processamento da macaúba é necessário realizar algumas considerações sobre como ocorre o processo, sendo possível simplificar a equação. Os processos podem ocorrer de três formas: processo contínuo em estado estacionário, processo em batelada e processos contínuos e semi-contínuos (MARCÍLIO, 2019).

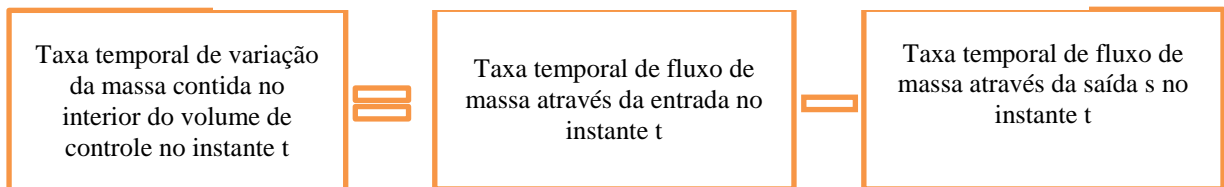
Em processos contínuos em estado estacionário não tem acúmulo no sistema e a equação (2) pode ser descrita como:

$$\textit{entrada} + \textit{geração} = \textit{saída} + \textit{consumo} \quad (2)$$

Em processos em batelada não existe fluxo de massa de entrada e saída ao longo do processamento, e os dados de entrada e a saída representam a quantidade de material que entra e sai do equipamento, e não em termos de vazão mássica.

Quando não existe fluxo de massa através das fronteiras do volume de controle, o sistema é definido como fechado, e aberto quando ocorre o contrário. A Figura 21 estabelece os princípios de conservação de massa em volumes de controle:

Figura 21. Princípios da conservação de massa.



Fonte: Adaptado de Moran e Shapiro, (2006).

Matematicamente os princípios de conservação de massa podem ser expressos pela equação (3):

$$\frac{d\dot{m}_{vc}}{dt} = \dot{m}_e - \dot{m}_s \quad (3)$$

Onde:

$\frac{d\dot{m}_{vc}}{dt}$  = taxa temporal da variação de massa no volume de controle (kg/s);

$\dot{m}_e$  = vazão mássica de entrada no volume de controle (kg/s);

$\dot{m}_s$  = vazão mássica de saída do volume de controle (kg/s).

Realiza-se o somatório das massas que entram e saem quando as fronteiras possuírem vários locais. Logo, a equação do balanço de massa em termos de taxa para o volume de controle, pode ser descrito através da equação (4) como:

$$\frac{d\dot{m}_{vc}}{dt} = \sum_e \dot{m}_e - \sum_s \dot{m}_s \quad (4)$$

Sendo:

$\sum_e \dot{m}_e$  = Somatório das vazões mássicas de entrada no volume de controle (kg/s);

$\sum_s \dot{m}_s$  = Somatório das vazões mássicas de saída no volume de controle (kg/s).

É comum considerar que sistemas de engenharia operam em regime permanente, ou seja,  $dm_{vc}/dt = 0$ , onde nenhuma das suas propriedades se altera com o tempo; a quantidade total presente permanece constante e nesse caso a equação (4) é reduzida para a equação (5):

$$\sum_e \dot{m}_e = \sum_s \dot{m}_s \quad (5)$$

### 3.2.2 Consumo Energético

O fluxo de energia é constituído por calor, trabalho e pela energia contida na massa transferida (FLAUSINO, 2015).

Moran e Shapiro (2006) descrevem que a quantidade de calor transferida depende dos detalhes do processo e que calor não é uma propriedade. Em um sistema fechado, a variação do conteúdo energético corresponde à diferença entre o calor fornecido e o trabalho realizado pelo mesmo (MAZZUCCO, 2013).

Para a avaliação energética neste trabalho considerou-se a relação produção/consumo entre as entradas e saídas energéticas identificando-se os valores dos dispêndios utilizados na extração do óleo de macaúba.

Quantificou-se o consumo de energia elétrica empregado para realizar uma batelada. A planta analisada apresenta quatro motores que operam em momentos distintos. Multiplicou-se a potência nominal pelo tempo de operação de cada motor.

O cálculo da energia elétrica (EE) consumida em cada processo foi feito a partir da Equação (6):

$$EE = P_e * t \quad (6)$$

Onde:

EE = Energia elétrica (kWh);

$P_e$  = Potência nominal do equipamento (kW);

t = tempo de duração de cada etapa (h);

A potência elétrica é a resultante do produto da tensão pela corrente e pode ser calculada, através da Equação (7).

$$P_e = I * U \quad (7)$$

Na qual:

I = corrente (A);

U = tensão elétrica (V).

### 3.2.3 Potencial Energético

Uma das maneiras de se obter a análise energética é a partir do poder calorífico dos componentes envolvidos no sistema (BONOMETO *et al.*, 2010). O poder calorífico corresponde à quantidade de energia na forma de calor que é liberada ao longo da combustão completa de uma unidade de massa ou de volume de determinado combustível, sendo expressa em kJ/kg. (FILHO, 2009)

Ao se realizar o processo de combustão, um dos produtos gerados é a água, que pode ser liberada tanto no estado líquido, quanto gasoso. A fase da água influencia na quantidade

de calor liberada, por isso o Poder Calorífico é fornecido em dois valores, poder calorífico superior (PCS) e poder calorífico inferior (PCI).

Define-se PCS como a quantidade de calor disponível na biomassa incluindo o calor latente de vaporização da água no combustível, ou seja, a água resultante está no estado líquido. (TEÓFILO, 2019). Filho (2009) cita que quando a água proveniente da combustão é considerada líquida, considera-se o PCS.

O poder calorífico superior (PCS) pode ser determinado com o auxílio de uma bomba calorimétrica adiabática, seguindo a metodologia descrita pela norma Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 8633 (1984) ou pela norma D 2015-77 da *American Society for Testing and Materials* (ASTM).

Já o PCI corresponde à quantidade de calor liberada durante a combustão total desconsiderando-se o calor de vaporização da água na combustão dos produtos, e nesse caso a água encontra-se em estado gasoso (TEÓFILO, 2019). A água formada após a combustão está na forma de vapor e considera-se o PCI (FILHO, 2009).

Logo, a diferença de ambos é a entalpia de vaporização da água formada na reação e da água existente no combustível. O PCI não recupera o calor latente de condensação do vapor, e por isso é inferior ao PCS. Em geral, o valor do PCS é obtido empiricamente e o PCI é determinado através de equações (MARQUES, 2021).

O PCS e o PCI podem ser encontrados a partir dos percentuais de seus componentes, conforme as equações (08), (09) e (10):

$$PCS = 33900 \times c + 141800 \times \left( h - \frac{0}{8} \right) + 9200 \times s \quad (8)$$

$$PCS_{úmido} = PCS \times (1 - \%W) \quad (9)$$

$$PCI = PCS_{úmido} - 2400 * (9 \times h + w) \quad (10)$$

Onde:

$PCS$  = Poder Calorífico Superior da biomassa seca (kJ/kg);

$PCS_{úmido}$  = Poder Calorífico Superior da biomassa úmida (kJ/kg);

$PCI$  = Poder Calorífico Inferior (kJ/kg);

$c$  = Teor de carbono (kg carbono/kg biomassa);

h = Teor de hidrogênio (kg hidrogênio/kg biomassa);

s = Teor de enxofre (kg enxofre/kg biomassa);

o = Teor de oxigênio (kg oxigênio/kg biomassa);

w = Teor de umidade (kg água/kg biomassa);

%W= Umidade da biomassa (% base úmida).

Bonometo *et al.* (2010) determinou o PCS em (cal/g) através do método da bomba calorimétrica, onde a amostra é pesada em um cadinho e inserida dentro do reator do calorímetro, em seguida é pressurizada com oxigênio; após estabilização da temperatura da água, realiza-se o processo de queima, em seguida aplica-se a seguinte equação (11):

$$PCS = \left( k + \frac{M}{M_s} \right) \times \Delta T \quad (11)$$

Sendo:

k = constante do calorímetro utilizado (g);

M = Massa de água utilizada no calorímetro (g);

M<sub>s</sub> = Massa seca do combustível (g);

ΔT = Variação da temperatura antes e após a combustão (°C).

A constante do calorímetro utilizado (k) corresponde ao valor de massa utilizado na calibração do calorímetro.

De posse do poder calorífico inferior (PCI) e superior (PCS) dos subprodutos, é possível calcular o poder energético dos mesmos. Para tal serão utilizados os valores médios encontrados na literatura.

Para obtenção da produção energética final multiplicou-se a massa de cada insumo pelo índice energético e os resultados foram apresentados em MJ. Para as saídas considerou-se como índice energético o poder calorífico dos produtos e subprodutos obtidos.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

No tópico a seguir, serão apresentados e discutidos os resultados obtidos referentes a análise do consumo energético do processo de extração do óleo de macaúba, que se baseia nos princípios termodinâmicos.

Para cada volume de controle, será apresentado um diagrama de blocos representativo, que corresponde a cada equipamento analisado, com seus respectivos balanços de massa e energia.

### 4.1 Planta Conceitual

Tendo como principal referência a planta piloto que está sendo desenvolvida na UFV, observou-se todo o processo de extração. Mesmo que o processo não esteja concluído e validado, foi fundamental para execução deste trabalho, auxiliando na tomada de decisão sobre quais equipamentos seriam empregados no processo de extração do óleo de macaúba, servindo, portanto, como parâmetro fundamental para elaboração deste estudo.

Durante o trabalho de campo (visita técnica) não foi possível realizar o processo de forma ininterrupta devido a diversos fatores logísticos e operacionais, tais como o fato de os principais equipamentos estarem localizados na empresa Acrotech, enquanto os frutos e as estufas utilizadas estavam no galpão de fruticultura da UFV; considerando também que a empresa parceira possui horário de funcionamento comercial e a necessidade de deslocamento, o processo teve que ser interrompido diversas vezes.

Após reunir e avaliar os dados coletados em visita técnica realizou-se uma pesquisa bibliográfica para avaliar as rotas usuais de extração de óleo de macaúba, no qual se constatou que existem diversas rotas possíveis, e que em síntese o processo industrial pode ser realizado através do despulpamento, secagem e prensagem dos frutos.

Os métodos utilizados no beneficiamento dos frutos de macaúba influenciam diretamente na qualidade do óleo. Em um cenário competitivo é fundamental estabelecer rotas tecnológicas eficientes ao longo de todo o processo produtivo. Logo, elaborou-se uma rota de processamento para os frutos da macaúba e analisou-se energeticamente o processo de extração do óleo de polpa e da amêndoa da macaúba, onde a rota tecnológica proposta foi por extração mecânica.

Posteriormente, buscaram-se os equipamentos disponíveis no mercado que atendessem às necessidades propostas de forma satisfatória, e coletaram-se as características técnicas dos maquinários envolvidos, cujos dados técnicos são fundamentais para a análise energética.

Considerando todo o processo de extração do óleo de macaúba, optou-se por avaliar as principais etapas, sendo elas: secagem; extração da casca/polpa; quebra do endocarpo e extração, pois tais processos necessitam de maior demanda de recursos energéticos. No desenvolvimento deste trabalho não foram considerados os gastos energéticos relacionados ao cultivo, colheita, transporte e armazenamento da macaúba e filtragem dos óleos obtidos.

Cabe ressaltar que, antes de iniciar o processamento dos frutos é viável realizar a homogeneização e separação por tamanho, pois apesar de se tratar de etapas simples influenciam na eficiência das etapas seguintes. A remoção de impurezas amplia a área de contato dos frutos dispostos nas bandejas, aumentando a eficiência do processo de secagem e a padronização dos tamanhos faz com que os frutos atinjam o grau de umidade desejado em um tempo próximo. Ao se colocar frutos de tamanhos muito diferentes, aumentará o tempo do processo, acarretando o uso inapropriado dos recursos energéticos. A diferença de tamanho faz com que os de tamanho menor atinjam o grau de umidade desejado primeiro; caso expostos a períodos muito maiores do que necessário poderão ocorrer reações de degradação e alteração das propriedades físico-químicas.

Considerou-se então, que os frutos estavam prontos para o processamento, que estas etapas foram previamente realizadas, e desconsiderou-se o gasto energético para execução das mesmas.

Os equipamentos escolhidos são empregados na extração de óleos vegetais de outras culturas similares à macaúba, possuem fácil operação, montagem e desmontagem simples. Além de possuírem robustez que permite o funcionamento da linha de produção em turno de 24 horas. São confeccionados em aço inoxidável, e possuem design que permite que a extração ocorra de maneira limpa e organizada.

Ainda assim, cabe mencionar que os equipamentos são empregados em outras culturas e que seria interessante projetar equipamentos que considerem todas as peculiaridades da espécie devido ao seu potencial de exploração, objetivando aumentar a eficiência do processo.

Para realização deste trabalho optou-se por avaliar todo o processo em uma única batelada, iniciando-se com uma massa inicial de 300 kg, de modo que o projeto é capaz de atender pequenas e grandes escalas, considerando a capacidade utilizada e o tempo de funcionamento.



A seguir, serão apresentados os equipamentos avaliados e as considerações realizadas para o balanço energético. Cada volume de controle avaliado corresponde a cada etapa realizada em cada equipamento e será apresentado um diagrama representativo. Cabe mencionar que a etapa de filtração será apresentada a título de ilustração e não será considerada para o balanço energético.

#### 4.1.1 Secagem

O objetivo desta etapa é realizar a redução da umidade nos frutos por meio de transferência de calor e massa entre os frutos e o ar de secagem. A secagem é uma das principais etapas, pois influencia diretamente na eficiência das demais, sendo fundamental que a umidade do material esteja em nível adequado, para obtenção de melhores rendimentos.

Ao longo do trabalho de campo considerou-se oscilações nas variáveis temperatura e tempo, a fim de padronizar o processo obtendo o melhor emprego dos recursos energéticos e tendo como produto um óleo de alta qualidade. Os testes realizados na etapa de secagem consistiram em submeter os frutos a altas temperaturas por um menor tempo, e o inverso, em temperaturas inferiores por um período maior. Para validar o processo de extração, com a rota mais eficiente.

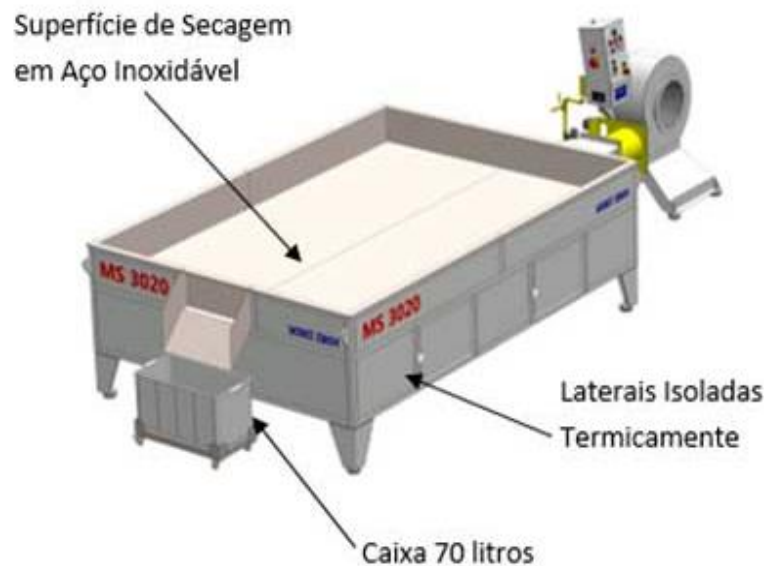
No entanto, houve dificuldade em relação ao equipamento utilizado na planta piloto de referência, pois não há saída para o vapor produzido pelo aquecimento dos frutos, o que aumenta o tempo de permanência deles no interior do secador e conseqüentemente diminui a eficiência do processo.

Neste contexto, optou-se por utilizar uma mesa de secagem estática (Fig. 22), da marca SCOTT TECH, modelo MS 3020, que possui capacidade de processamento de até 400 kg por batelada, possui o peso de 560 kg, potência nominal de 2,2 kW, tensão de operação de 220 V ou 380 V trifásico e potência de aquecimento elétrico de 35 kW.

A mesa de secagem é construída por uma chapa perfurada de aço inoxidável. As laterais e o fundo da mesa são isolados termicamente para aumento da eficiência térmica. A superfície de secagem é fabricada em tela perfurada de aço inoxidável, o que possibilita a higienização adequada para produtos alimentícios e assegurando a alta durabilidade do componente. A descarga do produto pode ser feita de forma organizada e limpa, com a utilização de caixas padrão de 70 litros e suportes com rodízios. O equipamento pode ser fabricado com diferentes fontes de aquecimento, sendo elas, aquecimento elétrico através de

banco de resistências, gás liquefeito de petróleo (GLP) ou gás natural, vapor direto, ou concentradores solares.

Figura 22. Mesa de secagem estática.



Fonte: <https://scottech.com.br>

A secagem é uma etapa essencial do processo e ocorre através do fluxo contínuo de ar aquecido; por esta razão o controle da temperatura é importante. A temperatura é monitorada por meio de sensores no interior do equipamento e controlada pelo painel de comando.

Existem inúmeras vantagens de se utilizar a mesa estática, dentre elas pode-se citar o fato de que ela é fabricada em material apropriado para atender aos critérios da indústria alimentícia, a possibilidade de ser fabricada com distintas fontes de aquecimento, entre outras.

Para extração do óleo de macaúba optou-se por realizar secagens intermediárias entre um processo e outro, a fim de reduzir a umidade dos produtos e ampliar a eficiência. A rota de processamento propõe quatro processos de secagem, sendo eles, secagem do fruto intacto, fruto descascado, polpa e amêndoa da macaúba. A mesa de secagem tem capacidade de processamento de 400 kg por batelada; considerando que todas as massas de entrada são inferiores, é possível realizar todos os processos em uma única batelada.

Carvalho (2010) avaliou a influência da temperatura do ar de secagem na qualidade do óleo e realizou a caracterização do fruto de macaúba. Os resultados obtidos mostraram que os

melhores resultados para conservação do óleo se deram na temperatura de 60 °C. O que é análogo aos estudos de Silva *et al.* (2017) em que determinou que o processo de secagem a 60 °C é eficiente para o armazenamento dos frutos pois mantém baixa acidez do óleo, no entanto prejudica a estabilidade oxidativa do óleo do mesocarpo. Nunes (2015) também realizou estudos cinéticos de secagem para extração do óleo de amêndoa variando o tempo de processamento a fim de determinar o melhor tempo de secagem em estufas a 60 °C, obtendo os melhores resultados com o tempo de 180 minutos.

A temperatura de secagem é um parâmetro fundamental, pois influencia diretamente no tempo de secagem. Neste contexto, definiu-se embasados nos dados disponíveis na literatura consultada, que a temperatura ideal para realizar o processo de secagem é de 60 °C. Na visita técnica os frutos foram submetidos a temperaturas superiores, no entanto não foram avaliadas as propriedades físico-químicas para verificar se houve degradação e alterações na qualidade final do óleo.

A umidade é outro fator crucial e influencia na qualidade do óleo e a eficiência de diversas etapas do processo de extração de óleo, sendo uma variável fundamental para a quantificação do balanço de massa e energia. O teor de umidade dos frutos pode variar de um estudo a outro, principalmente devido ao tempo e às condições de armazenamento. Este parâmetro é importante, pois quando se reduz a umidade do combustível, o valor do PCI aumenta (DANTAS, 2010).

Evaristo *et al.* (2017) avaliaram o teor de água dos frutos de macaúba de diferentes regiões do estado de Minas Gerais, encontrando valores entre 38,33 e 46,77%. Inicialmente considerou-se que os frutos possuem umidade de 35,8%, baseando-se no trabalho de Farias (2010), o que corresponde a 107,4 kg; este valor foi distribuído para o epicarpo, mesocarpo, endocarpo e endosperma e os seus respectivos valores são apresentados na Tabela 8.

Este valor de umidade total foi distribuído para todas as partes do fruto, embasou-se nos valores encontrados por outros autores na literatura analisada e então se adotou valores próximos.

Nunes (2015) encontrou em seu estudo o teor de umidade da amêndoa de 3 %, próximos aos de Lira *et al.* (2013) que menciona 4,42 % e de Evaristo *et al.* (2016), 5,14 %. Outros autores já encontraram valores superiores, como o estudo realizado por Ciconini (2012) que encontrou variações de 15,53-20,19 % e Costa (2016) obteve teores médios de 10,14 %. Neste estudo determinou-se o valor próximo de 7 % para a amêndoa.

Toledo (2010) cita que o epicarpo da macaúba possui teor de umidade de 9,49 %, no entanto, diverge dos resultados de Evaristo *et al.* (2016) que cita 26,69 %. Determinou-se um teor intermediário entre os valores citados, adotando então 13 %.

Evaristo *et al.* (2016) encontrou para o endocarpo 22,39 %, que é próximo ao considerado neste estudo, que foi de 20%, no entanto é superior ao determinado por Toledo (2010) que foi de 12,15 %.

Para o mesocarpo considerou-se 60 %; Lira *et al.* (2013) encontraram 45,86 %, próximos aos resultados obtidos por Evaristo *et al.* (2016) de 45,78 % e aos de Pimenta *et al.* (2012) que encontraram 49,4%. Ciconini (2012) cita valores entre 49,06-63 %, que concordam com os valores adotados neste estudo. No entanto Costa (2016) apresenta 28,2 % que é bem inferior e os de Zanatta (2015) que obteve 87,66 %. Os teores de umidade estabelecidos neste estudo estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11. Considerações realizadas sobre a umidade.

<b>Produto</b>	<b>Massa (kg)</b>	<b>Fração Mássica (%)</b>	<b>Umidade (%)</b>
Fruto	300,0	100	35,8
Epicarpo	53,7	18	13
Mesocarpo	158,15	53	60
Endocarpo	66,45	22	20
Endosperma	21,7	7	7

Fonte: Autora, (2023).

O tempo de secagem para cada etapa é apresentado na Tabela 12. Consideraram-se como referência os estudos realizados por Carvalho (2018) que realizou o estudo cinético de secagem, conservação e propriedades físico-químicas de amêndoas. Outro estudo relevante foi o de Pimenta *et al.* (2012) que realizou o processo de secagem da polpa por um período de 48 horas. Ambos realizaram o processo de secagem na mesma temperatura adotada neste estudo. E por fim, consideraram-se os resultados encontrados por Machado (2018) que avaliou a influência do teor de secagem para o processo de despulpamento, obtendo os melhores resultados para o fruto intacto na temperatura de 70 °C e para o fruto descascado temperatura de 50 °C, ambos no mesmo tempo.

Ressalta-se que o processo de secagem é influenciado por diversos fatores, como a umidade relativa do ar, temperatura do ar, tempo de armazenamento dos frutos, teor de umidade, entre outras variáveis. Em cada pesquisa houve condições específicas, e adotaram-se estes valores com o intuito de realizar o cálculo hipotético do gasto energético.

Tabela 12. Tempo de secagem.

<b>Produto</b>	<b>Tempo (horas)</b>	<b>Bibliografia de referência</b>
Amêndoa	34,08	Carvalho (2018)
Polpa	48	Pimenta et al (2012)
Fruto intacto	24	Machado (2018)
Fruto descascado	24	Machado (2018)

Fonte: Autora, (2023).

Percebe-se que a polpa é o produto que demanda maior tempo de secagem, o que é esperado uma vez que é a fração do fruto que contém maior teor de umidade. Para o fruto intacto e descascado utilizou-se o mesmo tempo de secagem, no entanto, no fruto descascado, ocorre maior redução de umidade; este fato é explicado porque o epicarpo promove uma barreira que dificulta a transferência de calor e massa, entre o fruto e o ar de secagem. A amêndoa apresenta tempo intermediário se comparado aos outros componentes do fruto.

#### 4.1.2 Descascadeira/Despolpadeira (Epicarpo-Polpa-Endocarpo)

Na descascadeira/despolpadeira realiza-se a separação do epicarpo, polpa e endocarpo. O equipamento utilizado na UFV se mostrou eficiente, sendo capaz de realizar tanto o processo de despolpamento, quanto a quebra e separação do epicarpo.

Alguns autores como, por exemplo, Carvalho (2011) realiza a separação das frações do fruto da macaúba de uma única vez. Ou seja, inserem os frutos intactos, e após a extração do epicarpo, mantém o equipamento em funcionamento até ocorrer o despolpamento. No entanto, após a visita técnica, notou-se que os frutos possuem alta umidade o que dificulta o processo de despolpa, fazendo com que ele ocorra em um tempo superior. Optou-se então por retirar os frutos após o descascamento e submetê-los a outro processo de secagem, para então iniciar o processo de despolpamento.

Portanto os frutos após serem descascados seguem para outro processo de secagem e em seguida retornam para este mesmo equipamento, para realizar o processo de despolpamento;

durante o processamento, a polpa é expelida na cavidade inferior do equipamento e a castanha sai do outro repartimento.

O equipamento analisado neste estudo é da marca SCOTT TECH, Modelo D80 (Fig. 23), que possui capacidade de processamento de 300 kg por hora, potência nominal de 3,7 kW, tensão de operação de 220 V ou 380 V trifásico, sendo fabricado em aço inoxidável.

Figura 23. Despolpadeira.



Fonte: <https://scottech.com.br>

Considerando os dados técnicos do equipamento e a capacidade de processamento, estimou-se o tempo para despolpar a massa de alimentação para o processamento dos 300 kg de frutos.

Para definir o tempo para descascar, observaram-se os dados coletados durante a visita. Observou-se o tempo necessário para a remoção do epicarpo em sete amostras com massa de 9.350 kg e constatou-se que o processo ocorre em poucos minutos, onde ao final desta etapa o epicarpo é expelido na parte inferior, e o restante do fruto sai na segunda saída.

O resultado desta avaliação é apresentado na Tabela 13, na qual se tem o tempo necessário para realizar o processo e as massas dos produtos obtidos. O tempo médio foi de 17 minutos e 46 segundos para descascar cada amostra de frutos com proporções médias de 7.464 kg correspondentes ao fruto descascado e 1.886 kg de epicarpo.

Tabela 13. Tempo observado em visita técnica para descascar os frutos.

<b>Amostra</b>	<b>Tempo (min)</b>	<b>Fruto (kg)</b>	<b>Epicarpo (kg)</b>
1	18:00	7800	1550
2	18:50	6800	2550
3	18:54	6950	2400
4	16:18	6700	2650
5	16:28	8200	1150
6	17:55	8000	1350
7	18:00	7800	1550
Média	17:46	7464	1886

Fonte: Autora, (2022).

Percebe-se também que o maior tempo obtido no experimento corresponde a amostra 3 – (18 minutos e 54 segundos) necessário para extrair 2400 kg de epicarpo da amostra total, e que esta massa é a terceira maior dentre a amostragem. Dentre toda a amostragem nota-se um comportamento semelhante e a correlação do tempo de processamento com a quantidade de epicarpo disponível, ou seja, quanto maior o tempo, maior a massa de epicarpo nos frutos. A única amostra que contrariou tal observação foi a amostra 4, uma hipótese para explicar tal fato é a diferença de tamanhos dos frutos; como não se realizou uma separação prévia, é possível que a amostra contenha maiores quantidades de frutos com menor dimensão e por isso possuam umidade inferior aos demais, aumentando a eficiência desta etapa. Toda a amostragem passou por processo de secagem em estufa antes de ser inserida no equipamento, logo, como não se realizou a separação dos frutos por tamanho, os frutos menores perderam mais umidade em comparação aos maiores, facilitando o processo de quebra e remoção do epicarpo do restante do fruto.

Observou-se também o processo de despolpamento e que a remoção da polpa ocorre em intervalos próximos a 40 minutos. Logo, ficou evidente que o equipamento necessita de um tempo maior para o despolpamento do que para o descascamento. Trabalhou-se então com a proporção 1:2. Considerando que o equipamento tem capacidade de despolpar 300 kg de frutos em 1 hora, adotou-se empiricamente que ele é capaz de descascar 600 kg no mesmo tempo.

Feita esta consideração e considerando a massa de alimentação em cada etapa, tem-se o tempo de funcionamento apresentado na Tabela 14.

Tabela 14. Tempo de funcionamento Descascador/Despolpador

<b>Massa (kg)</b>	<b>Tempo de processamento (h)</b>	<b>Processo</b>
286,04	0,95	Descascar
221,60	0,37	Despolpar

Fonte: Autora, (2022).

#### 4.1.3 Etapa de Quebra

Para a etapa de quebra, não se encontraram os dados do mesmo equipamento utilizado na visita. Logo, sugeriu-se outro que atenda às necessidades do processo. A finalidade desta etapa é promover a quebra do endocarpo.

Queiroga *et al.* (2016) cita que o quebramento do caroço é uma operação simples, no entanto consiste em um processo pesado que exige uma máquina sólida e resistente. Logo, optou-se por utilizar o moinho a martelo, que é o mais utilizado no Brasil; este equipamento visa reduzir o tamanho das partículas através do impacto provocando a quebra, neste caso do endocarpo da macaúba.

Escolheu-se um moinho a martelo centrífugo simples desenvolvido para moagem de produtos com alto teor de lipídios, que possui fluxo contínuo sem empastamento dentro da caixa de moagem.

O moinho escolhido é o modelo MCO 260 da marca Vieira (Fig. 24), é fabricado em aço inoxidável e possui capacidade de operação de 50 kg/hora, peso total de 80 kg, um rotor de moagem, volume útil de 1,5 m<sup>3</sup>; recomenda-se seu uso em energia trifásica para a ligação do motor de 10 cv.

É necessário realizar a conversão da potência do motor, para o sistema internacional de unidades (SI). A potência é expressa em watts, onde 1 cv equivale a 735,5 W; logo este equipamento tem uma potência nominal de 7.355 W ou 7,355 kW.

O equipamento tem a capacidade de processamento de 50 kg/h e será alimentado com 90,30 kg de castanhas; então será necessário o tempo total de 1,81 horas para realizar esta etapa.



Figura 24. Moinho Vieira MCO.



Fonte: <https://www.moinhosvieira.com.br>

#### 4.1.4 Extração

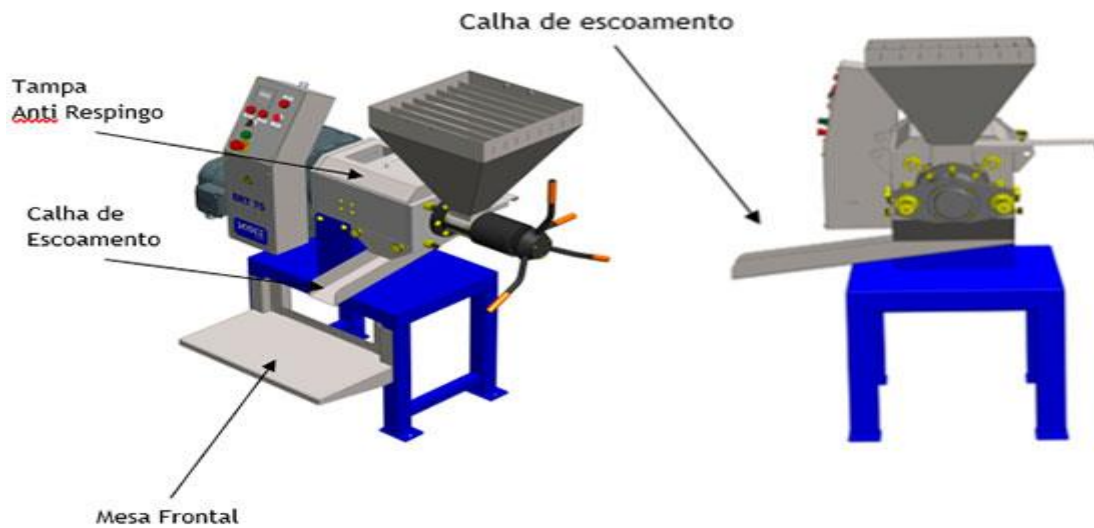
O processo de extração mecânica se mostrou eficiente, logo, utilizou-se o mesmo equipamento da planta de referência. Esta é a principal etapa do processo, pois através dela obtêm-se como produtos os óleos de interesse e as tortas.

A prensa mecânica analisada (Fig. 25) para este estudo é da marca SCOTT TECH, modelo ERT75, que possui capacidade de processamento de 100 kg por hora, possui o peso de 310 kg, potência nominal de 4,5 kW, tensão de operação de 220 V ou 380 V trifásico. Possui alto desempenho no teor de extração de óleo, além de possuir motor acoplado de um moto redutor, que é capaz de realizar a adequação da velocidade à rotação, garantindo alto rendimento com consumo mínimo de energia elétrica.

Possui tampa antirrespingo mantendo qualquer gotejamento do óleo extraído dentro da calha de escoamento de óleo. Com o intuito de ter um layout fabril mais dinâmico, este equipamento opera diretamente ao lado do filtro, direcionando o óleo extraído para o tanque de entrada para a execução da filtração.

Durante o processo de extração é comum que ocorram perdas. Definiu-se que as amostras iniciais possuem um teor de óleo (amêndoa e polpa) de 24,12 % em base seca, e que o processo teve uma eficiência de extração de 87,75-89,72 para extração do óleo de amêndoa e polpa, respectivamente. Tendo uma perda de aproximadamente 9,57 %.

Figura 25. Prensa Extratora.



Fonte: <https://scottech.com.br>

Neste equipamento ocorrerá a extração do óleo de amêndoa e polpa da macaúba, logo, estimou-se o tempo de operação para tais etapas, considerando a capacidade do equipamento, 100 kg/h. A Tabela 15 apresenta as massas de alimentação e o tempo estipulado para a extração dos óleos.

Tabela 15. Tempo de funcionamento Prensagem mecânica.

Massa (kg)	Tempo de processamento (h)	Óleo
16,33	0,16	Amêndoa
66,86	0,67	Polpa

Fonte: Autora, (2023)

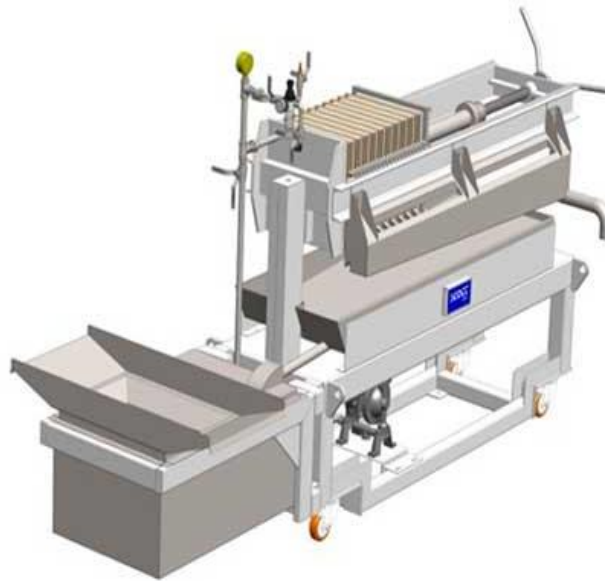
#### 4.1.5 Filtragem

Após a extração obtêm-se os óleos brutos contendo material particulado, sendo fundamental realizar o processo de filtração para obter o rendimento real de extração.

Optou-se por utilizar um filtro (Fig. 26) com bombeamento realizado por uma bomba de diafragmas, própria para fluidos que contenham partículas sólidas, evitando desgaste por abrasão; o acionamento ocorre por ar comprimido. O equipamento possui boa mobilidade que facilita a movimentação para limpeza da planta e pesa 160 kg sendo composto por 10 placas de filtração e 11 de torta de alumínio. Possui um tanque pulmão de 40 ou 80 litros, opera a

pressão de 5 bar e possui a capacidade de filtração de até 200 litros por hora. Possui uma peneira de entrada para separação de partículas até 0,5 mm, bandeja de retorno de gotejamento de placas e rodízios para movimentação durante a etapa de limpeza da planta.

Figura 26. Filtro prensa industrial.



Fonte: <https://scottech.com.b>

O equipamento tem capacidade de filtrar 200 litros/h; logo considerando o mesmo princípio adotado para os demais equipamentos em que são realizados dois processos de secagem, o tempo desta etapa foi estimado, sendo apresentado na Tabela 16. Para tal, transformou-se a massa de alimentação de massa para volume, utilizando a densidade dos fluidos encontrados por Costa (2016).

Tabela 16. Tempo estimado para filtração dos óleos.

<b>Óleo</b>	<b>Tempo de processamento (h)</b>	<b>Volume de alimentação (l)</b>	<b>Densidade (kg/l) Costa (2016)</b>
<i>Amêndoa</i>	0,05	10,26	0,92421
<i>Polpa</i>	0,17	34,92	0,9356

Fonte: Autora, (2023).

## 4.2 Análise Energética

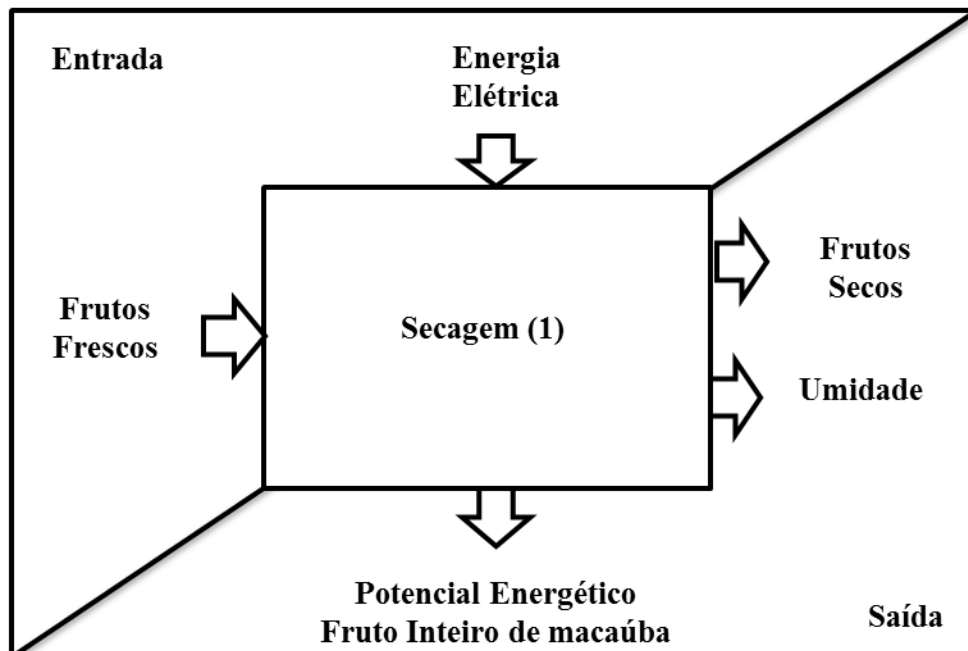
Inicia-se pela quantificação em relação aos fluxos de massa e energia e a interpretação dos resultados obtidos, a fim de identificar as peculiaridades de cada etapa do processo de extração do óleo de macaúba.

### 4.2.1 Diagrama de blocos

Elaborou-se diagrama de blocos atribuindo para cada etapa um volume de controle analisado, apresentado as entradas e saídas em termos de massa e energia e determinando os produtos obtidos em cada etapa do processo.

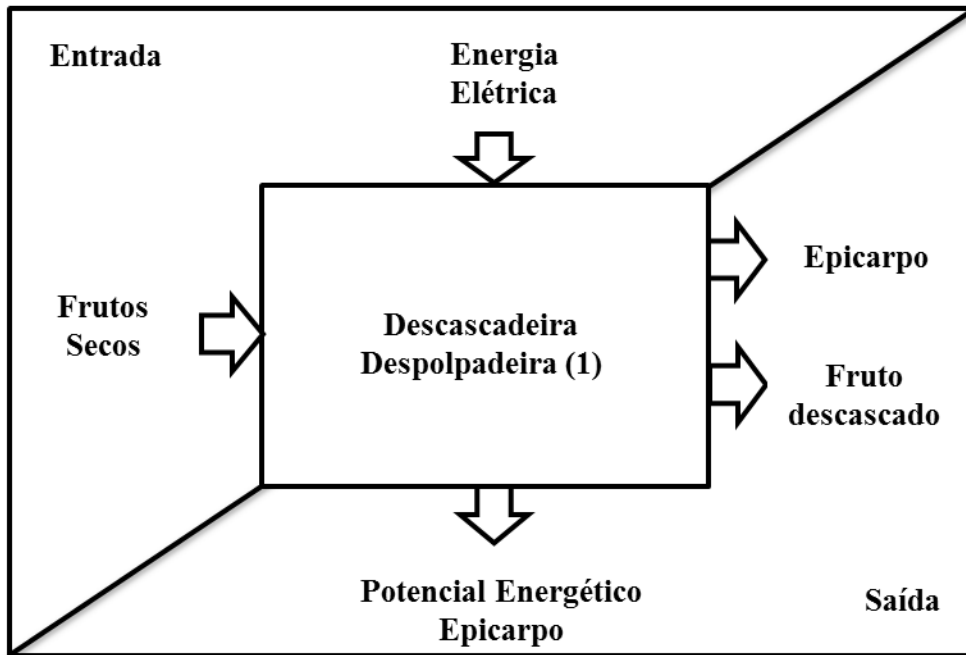
Os diagramas são apresentados nas Figuras 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36 e 37, seguindo respectivamente as etapas de: secagem 1, extração casca/polpa 1, secagem 2, extração casca/polpa 2, extração do endocarpo, secagem 3, prensagem 1, filtração 1, secagem 4, prensagem 2, filtração 2. Os volumes de controle apresentados nas figuras 34 e 37 se referem ao processo de filtração; eles serão apresentados em título de ilustração, pois não serão avaliados energeticamente.

Figura 27. Volume de Controle 1 - Secagem (1): frutos frescos.



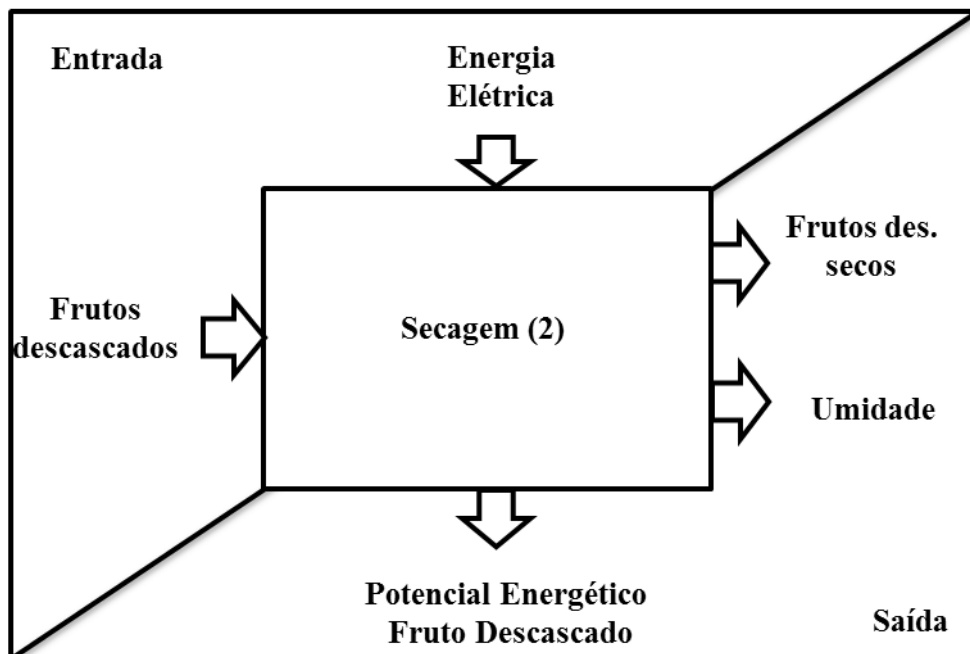
Fonte: Autora, (2022).

Figura 28. Volume de Controle 2 - Descascadeira/Despolpadeira (1): remoção epicarpo.



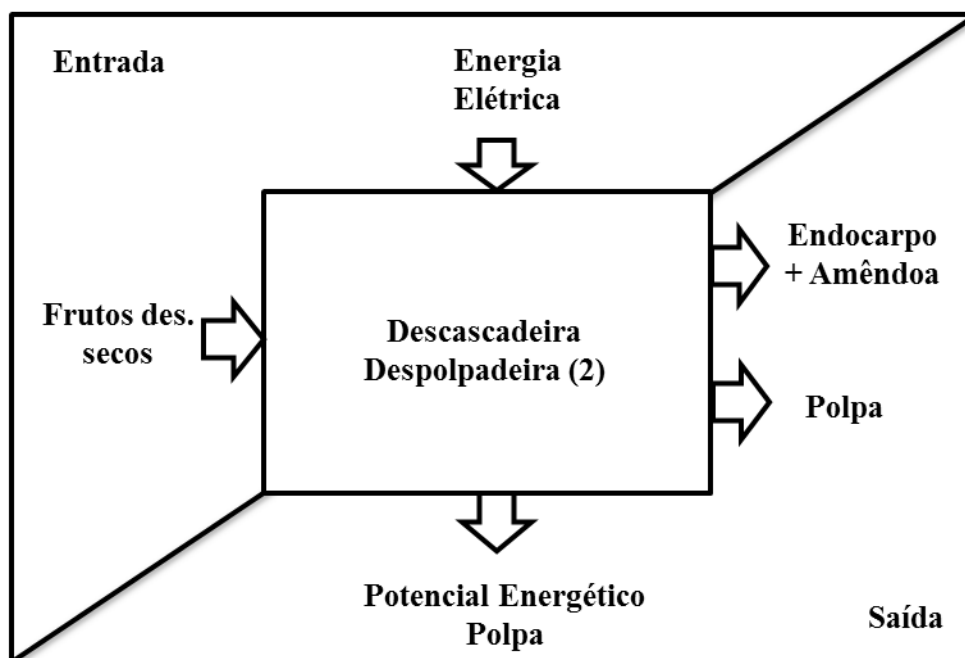
Fonte: Autora, (2022).

Figura 29. Volume de Controle 3 - Secagem (2): frutos descascados.



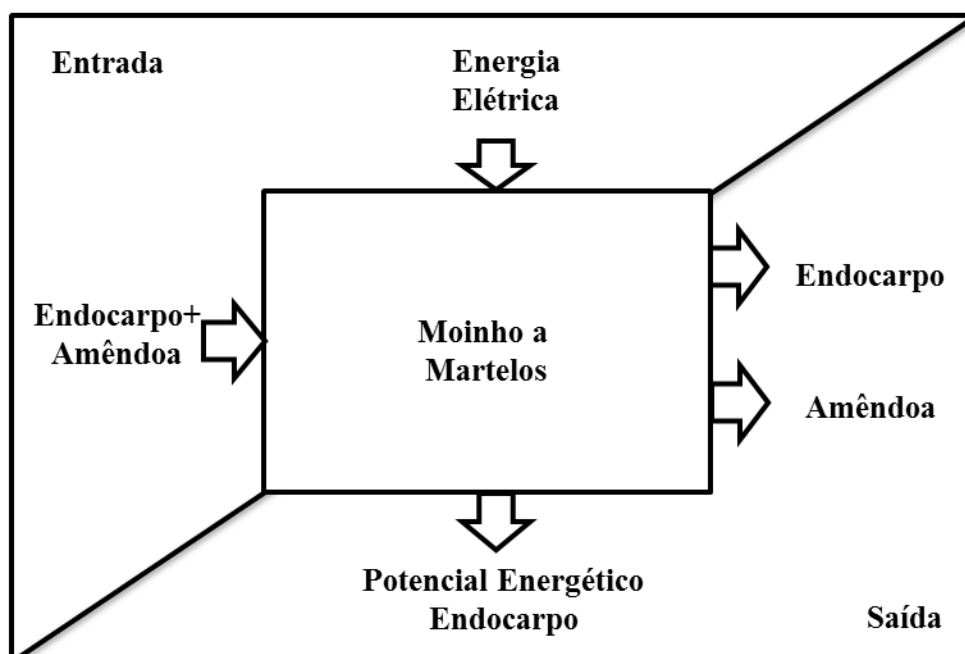
Fonte: Autora, (2022).

Figura 30. Volume de Controle 4 - Descascadeira/Despolpadeira (2): remoção polpa.



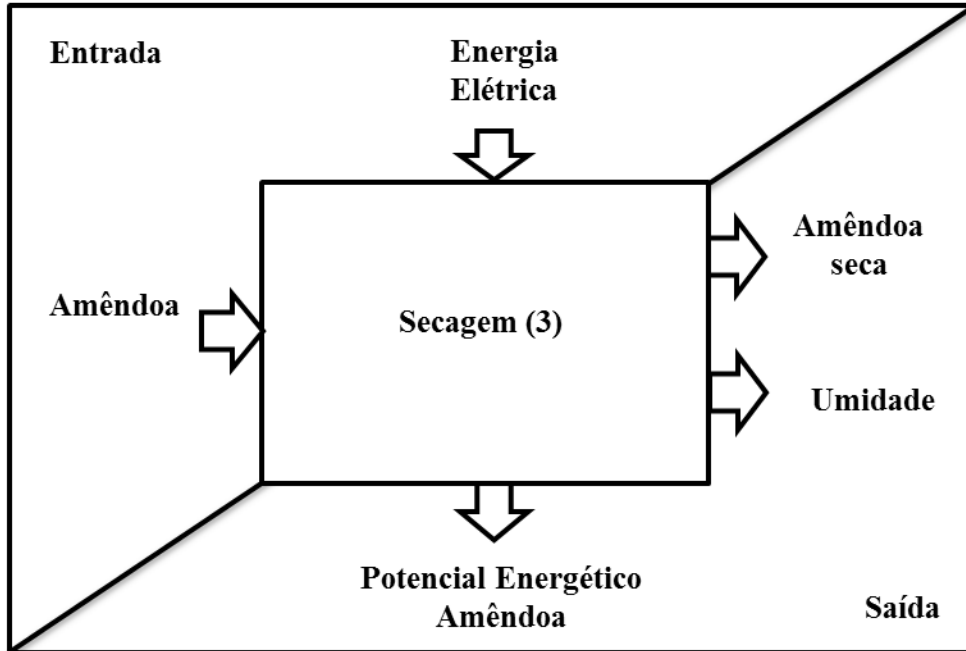
Fonte: Autora, (2022).

Figura 31. Volume de Controle 5 - Moinho a Martelos: separação amêndoa/endocarpo.



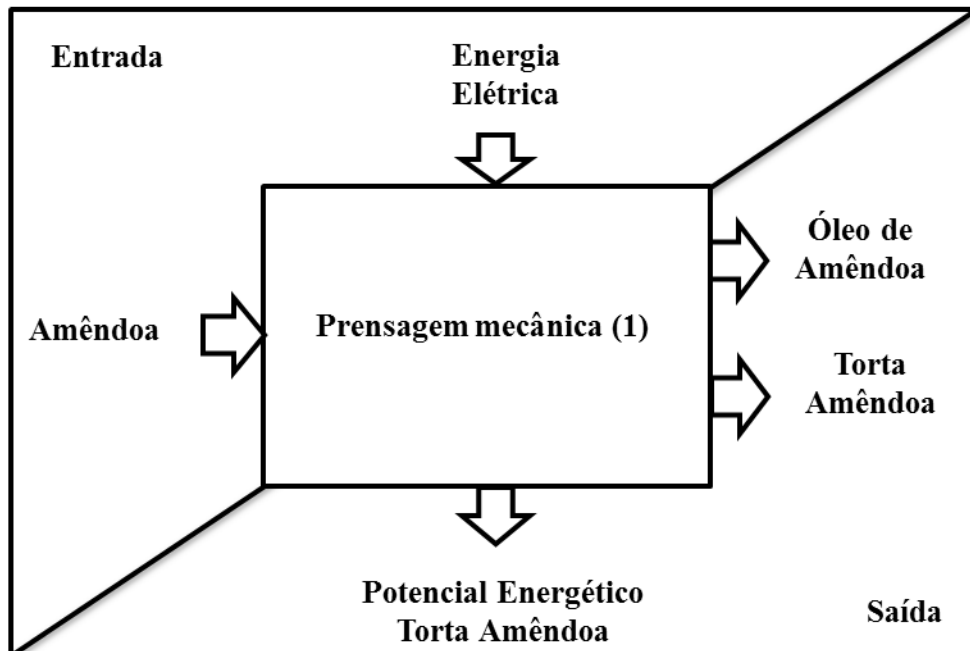
Fonte: Autora, (2022).

Figura 32. Volume de Controle 6 - Secagem (3): amêndoa.



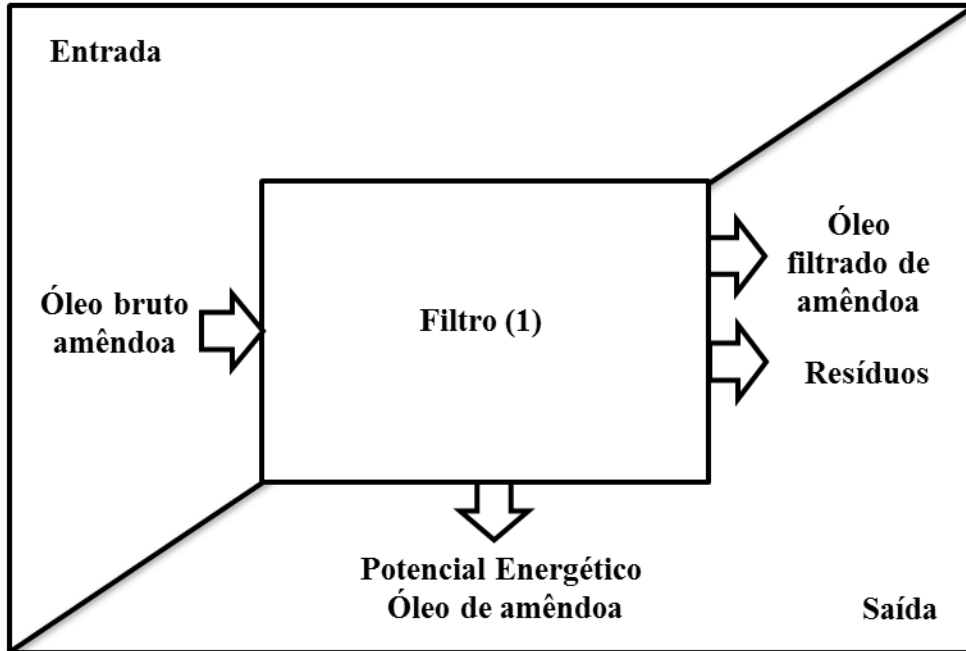
Fonte: Autora, (2022).

Figura 33. Volume de Controle 7 - Prensagem mecânica (1): extração óleo de amêndoa.



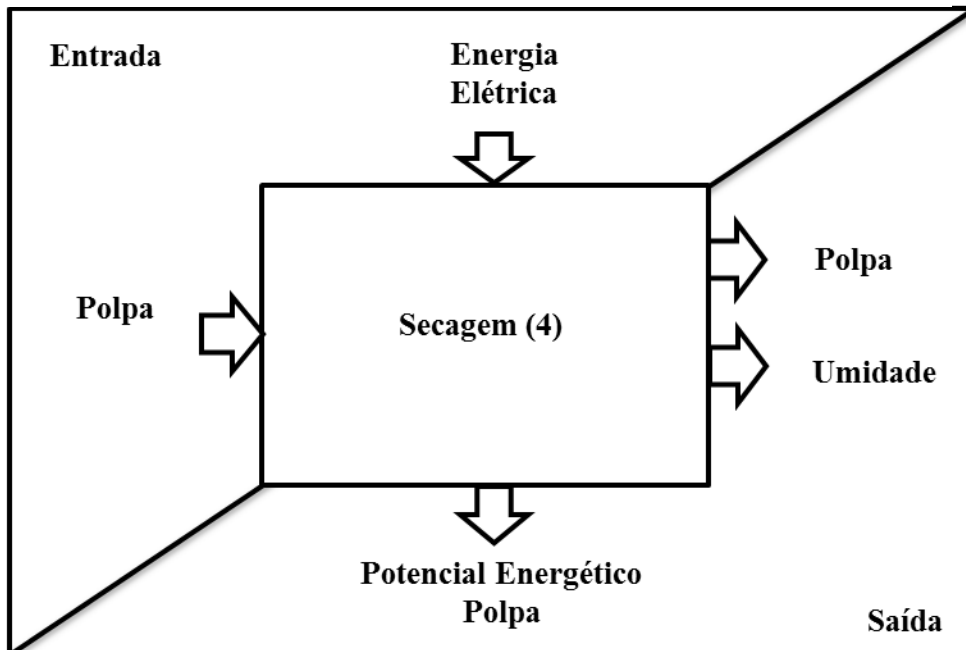
Fonte: Autora, (2022).

Figura 34. Volume de Controle 8 - Filtro (1): óleo de amêndoa.



Fonte: Autora, (2022).

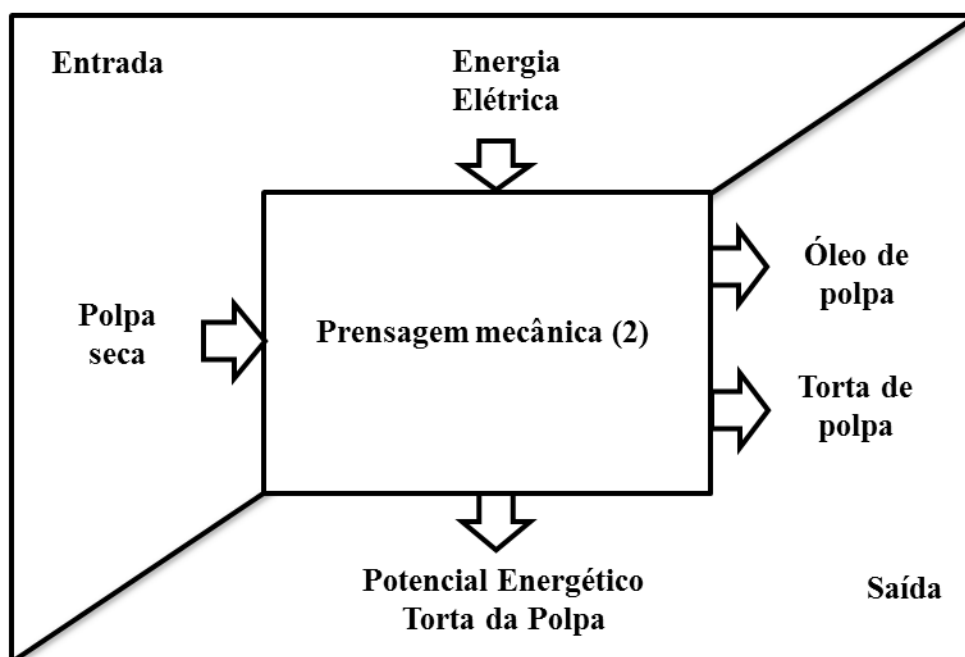
Figura 35. Volume de Controle 9 - Secagem (4): polpa.



Fonte: Autora, (2022).

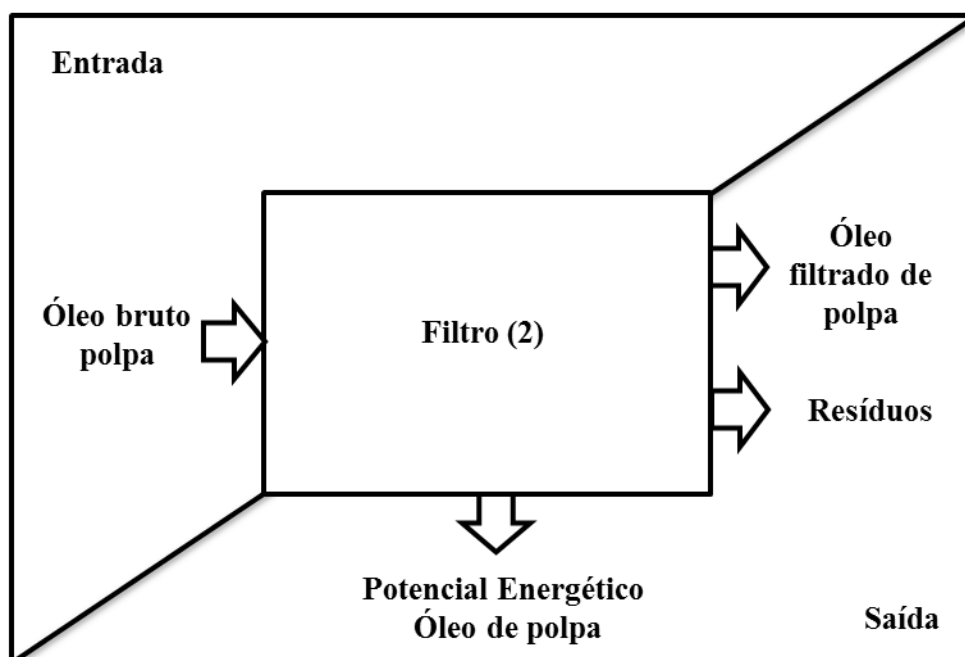


Figura 366. Volume de Controle 10 - Prensagem mecânica (2).



Fonte: Autora, (2022).

Figura 37. Volume de Controle 11 - Filtro (2): óleo de polpa.



Fonte: Autora, (2022).

#### 4.2.2 Balanço de massa

Para realizar o balanço de massa se utilizou como ponto de partida o trabalho realizado por Farias (2010) que apresentou a distribuição mássica dos produtos e subprodutos para o processamento de 1000 kg de frutos frescos. Em posse dos dados realizou-se uma proporcionalidade para obter os valores mássicos globais para o processamento de 300 kg.

Farias (2010) descreve que para o processamento de 1000 kg de frutos houve uma perda de 1,5 % de massa e explicou que pode ser devido à volatilização de substâncias e perdas durante o processo, citando que as perdas relativas a polpa, são superiores às do processamento da amêndoa. Para a execução deste balanço, com o intuito de simplificação, considerou-se o mesmo percentual de perda, no entanto realizou-se a proporcionalidade total dividindo-se as perdas entre os processos de extração dos óleos desconsiderando as outras perdas de processo. Com isso, na Tabela 17 apresenta-se a quantificação mássica dos produtos obtidos após o processamento de 1000 kg e 300 kg, que serão utilizados neste trabalho.

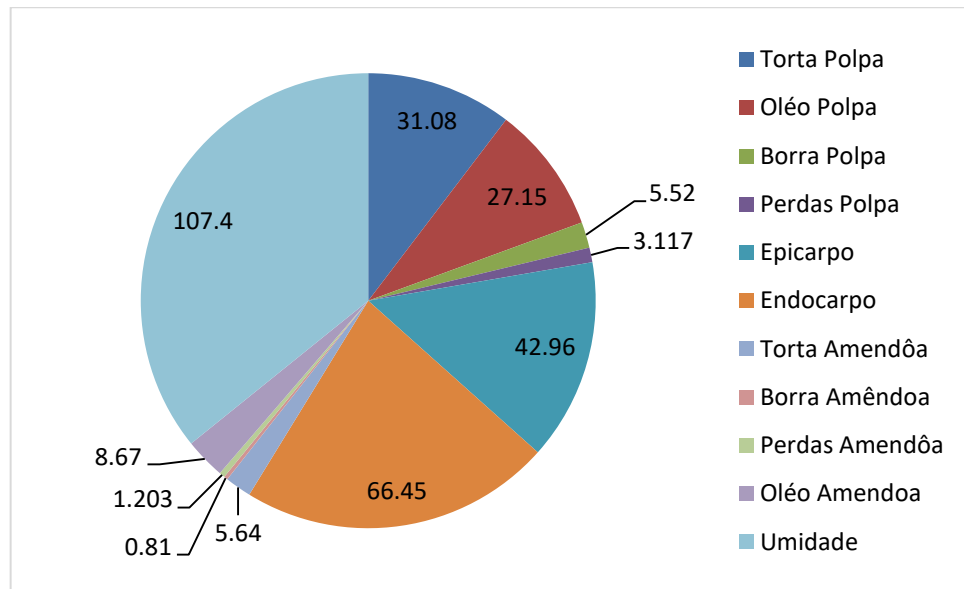
Tabela 17. Proporcionalidade mássica utilizada.

<b>Produtos e subprodutos</b>	<b>1000 kg</b>	<b>300 kg</b>	<b>%</b>
Torta Polpa	103,6	31,08	10,36
Óleo Polpa	90,5	27,15	9,05
Borra Polpa	18,4	5,52	1,84
Umidade	358	107,4	35,8
Perdas Polpa	10,39	3,117	1,039
Epicarpo	143,2	42,96	14,32
Endocarpo	221,5	66,45	22,15
Torta Amêndoa	18,8	5,64	1,88
Borra	2,7	0,81	0,27
Perdas Amêndoa	4,01	1,203	0,401
Óleo Amêndoa	28,9	8,67	2,89

Fonte: Autora, (2023).

Logo, os dados utilizados são apresentados no Figura 38, com a distribuição mássica global dos 300 kg de frutos. Para o processamento de 300 kg obtêm-se 27,15 kg de óleo de polpa e 8,67 kg de óleo de amêndoa.

Figura 38. Distribuição mássica para 300 kg de frutos frescos.



Fonte: Autora, (2023).

Considerando as frações apresentadas na Tab. 17 e Fig. 18, realizou-se o somatório dos componentes do fruto, considerando os valores mássicos em base seca e seu respectivo percentual; os resultados são apresentados na Tabela 18.

Tabela 18. Composição mássica em base seca das frações dos frutos da macaúba.

Fração do fruto	Massa (kg)	Percentual (%)
Epicarpo/Casca	42,96	22,31
Mesocarpo/Polpa	66,87	34,72
Endocarpo/Castanha	66,45	34,50
Endosperma/Amêndoa	16,3	8,48
Total base seca	192,6	100

Fonte: Autora, (2023).

A composição dos frutos da macaúba e suas características podem variar por inúmeros fatores, sendo possível encontrar diversos estudos na literatura sobre a análise biométrica. Amaral (2007) apud CETEC (1983) descreveu as faixas mássicas (ver Tab.19), média e o desvio dos componentes da macaúba, onde os resultados das proporções das partes dos frutos concordam com os valores encontrados e estão dentro das faixas estabelecidas neste trabalho.

Tabela 19. Variação mássica da macaúba.

Variável	Faixa	Média	Desvio
Epicarpo	18,8 – 33,2	26,1	3,6
Polpa	12,10 – 42,9	46,3	5,5
Endocarpo	33,2-64,9	46,3	5,5
Amêndoa	4,5 – 11,0	46,3	1,7

Fonte: Adaptado de CETEC, (1983).

No entanto divergem dos valores encontrados por outros autores em que descrevem que os frutos possuem cerca de 20% casca, 40% polpa, 33% endocarpo e 7% amêndoa (ZANATTA, 2015; NUNES, 2015). Já Brandão (2013) afirma que os frutos são compostos por 17% casca, 52% de polpa, 24% de endocarpo e 7% de amêndoa. Costa (2016) encontrou valores próximos aos deste estudo, sendo 21% epicarpo, 34% polpa, 41% castanha e 4% endosperma. Os valores encontrados também são próximos aos de Evaristo *et al.* (2016) que encontrou valores entre 22,2 e 23,38%, 38,48-41,91%, 27,44-32,01% e 6,93-7,32% para o epicarpo, mesocarpo, endocarpo, amêndoa, respectivamente. Tais resultados ilustram a grande variedade de características que o fruto pode possuir.

Aplicando-se os princípios de conservação de massa, estabelecidos pela Equação (6), obtém-se o balanço de massa global e para cada volume de controle. Os resultados são apresentados nas Tabelas 20, 21, 22 e 23. O balanço de massa global das etapas da extração do óleo de macaúba foi relacionado na Tabela 20.

A Tabela 21 apresenta os valores para os volumes de controle 1, 2, 3 e 4. O processamento inicia com 300 kg de frutos frescos; ao longo desses processos são reduzidos 35,44 kg de umidade, e ao final destas etapas, tem-se separado o epicarpo, o endocarpo aderido à amêndoa e a polpa.

Tabela 20. Balanço de massa global após processamento dos frutos da macaúba.

<b>Produto</b>	<b>Entrada (kg/h)</b>	<b>Saída (kg/h)</b>	<b>Percentual (%)</b>
Fruto Fresco	300	-	100
Torta Polpa	-	31,08	10,36
Óleo Polpa	-	27,15	9,05
Borra Polpa	-	5,52	1,84
Umidade	-	107,4	35,8
Perdas	-	4,32	1,44
Epicarpo	-	42,96	14,32
Endocarpo	-	66,45	22,15
Torta Amêndoa	-	5,64	1,88
Borra Amêndoa	-	0,81	0,27
Óleo Amêndoa	-	8,67	2,89

Fonte: Autora, (2023).

Tabela 21. Balanço de massa - Polpa + Endocarpo

<b>Volume de Controle</b>	<b>Processo</b>	<b>Entrada</b>		<b>Saída</b>	
		<b>Produto</b>	<b>Massa (kg)</b>	<b>Produto</b>	<b>Massa (kg)</b>
<b>1</b>	Secagem	Frutos frescos	300	Frutos secos	286,04
				Umidade	13,96
<b>2</b>	Descascador	Frutos secos	286,04	Fruto descascado	243,08
	Despolpador			Epicarpo	42,96
<b>3</b>	Secagem	Fruto descascado	243,08	Frutos des. secos	221,60
				Umidade	21,48
<b>4</b>	Descascador	Frutos des. secos	221,60	Polpa	131,30
	Despolpador			Endocarpo + Amêndoa	90,30

Fonte: Autora, (2023).

A Tabela 22 apresenta o balanço de massa para os volumes de controle 5, 6, 7 e 8. Ao final destas etapas obtém-se um dos produtos de interesse, 8,67 kg de óleo de amêndoa.

Tabela 22. Balanço de massa - extração do óleo de amêndoa.

Volume de Controle	Processo	Entrada		Saída	
		Produto	Massa (kg)	Produto	Massa (kg)
5	Quebrador	Endocarpo + Amêndoa	90,30	Endocarpo	66,45
				Amêndoa	23,85
6	Secagem	Amêndoa	23,85	Amêndoa seca	16,33
				Umidade	7,52
7	Prensagem	Amêndoa seca	16,33	Óleo bruto de amêndoa	9,48
				Torta de amêndoa	5,64
				Perdas	1,21
8	Filtragem	Óleo bruto de amêndoa	9,48	Óleo filtrado	8,67
				Resíduos	0,81

Fonte: Autora, (2023).

A Tabela 23 refere-se ao balanço de massa para os volumes de controle 9, 10 e 11. Ao final do processamento obtém-se o óleo de polpa, 27,15 kg.

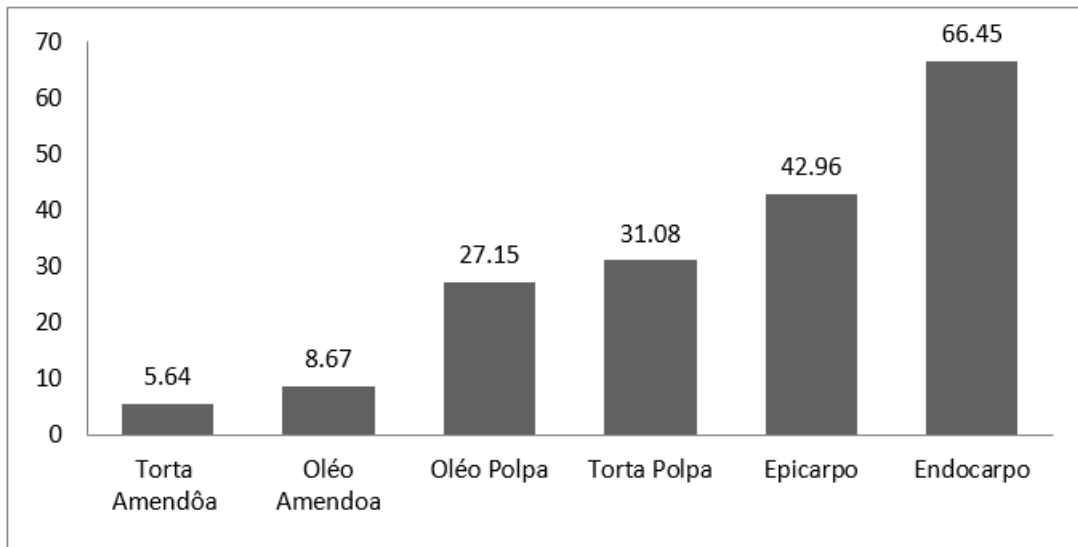
Tabela 23. Balanço de massa - extração do óleo de polpa

Volume de Controle	Processo	Entrada		Saída	
		Produto	Massa (kg)	Produto	Massa (kg)
9	Secagem	Polpa	131,30	Polpa seca	66,86
				Umidade	64,44
10	Prensagem	Polpa seca	66,86	Óleo bruto da polpa	32,67
				Torta de polpa	31,08
				Perdas	3,11
11	Filtragem	Óleo bruto da polpa	32,67	Óleo filtrado	27,15
				Resíduos	5,52

Fonte: Autora, (2023).

A figura 39 apresenta os produtos e subprodutos obtidos após o processamento de 300 kg de frutos de macaúba. Onde se tem em maiores proporções o endocarpo e epicarpo que podem ser utilizados como biomassa, com 66,45 e 42,96 kg, respectivamente. Em seguida tem-se a torta de polpa com 31,08 kg e o óleo de polpa com 27,15 kg, e por fim o óleo de amêndoa com 6,45 kg e a torta de amêndoa com 5,64 kg.

Figura 39. Produtos e subprodutos obtidos após o processamento em (kg).



Fonte: Autora, (2023).

Importante ressaltar que no processo de extração objetiva-se obter principalmente os óleos vegetais e que 300 kg de frutos fornecem 27,15 kg de óleo de polpa e 8,67 kg de óleo de amêndoa.

Suttille *et al.* (2007) avaliou o rendimento de óleo de outras culturas, sendo os valores encontrados, 19,74% para a mamona *al. Guarany*, 17,83% para canola, 14,75% para soja e milho com 2,78%. Os valores encontrados neste estudo são de 14,1 % para o óleo de polpa e 4,5 % para o óleo de amêndoa, em relação à massa do fruto seco. Os valores encontrados para a polpa são próximos aos de Costa (2016), 14,7%, no entanto divergem do encontrado para amêndoa pelo autor, que foi de 12,4%.

O teor de óleo corresponde ao percentual total de material graxo presente na matéria seca da amostra (MARTINS, 2013). Este parâmetro foi avaliado por diversos autores e os resultados são apresentados na Tabela 24, na qual se observa uma variação de 42,10 % a 63,51 % para o óleo de amêndoa.

Tabela 24. Teor de Óleo de amêndoa da macaúba.

<b>Rendimento (%)</b>	<b>Referência</b>
44,6	NUNES (2015)
58,00	MELO (2012)
63,51	CICONINI (2012)
42,10	AMARAL (2011)
52,9	FARIAS (2010)
51,62	RODRIGUES (2007)

Fonte: Autora, (2023).

Avaliou-se teor de óleo de amêndoa neste estudo, considerando a quantidade de óleo final obtida em relação à massa em base em seca da amêndoa, obtendo o montante de 53,09 %, sendo o valor encontrado próximo ao valor encontrado por Rodrigues (2007) e Melo (2012).

Nunes (2015) cita que o rendimento pode ser influenciado pela densidade populacional devido a diversos fatores tais como sombreamento e disponibilidade de nutrientes. E que para obter 1 kg de óleo de amêndoa de macaúba, são necessários 2,22 kg de amêndoa; estima-se ainda a produção de 1.725 kg de amêndoa por hectare. Os resultados encontrados neste trabalho divergem dos deste estudo, pois para obter 1 kg de óleo de amêndoa são necessários 1,88 kg de amostras secas e 2,77 kg em base úmida.

Em relação ao óleo de polpa obteve-se um rendimento de 40,61 % em base seca e 20,68 % em base úmida, inferiores aos encontrados para o óleo de amêndoa; este valor é próximo ao encontrado por Costa (2016) que foi de 44,2 e bem inferior aos de Queiroga *et al.* (2016) que citam que o teor de óleo na base seca é de 69,9.

#### 4.2.3 Avaliação Energética

A avaliação energética considerou como entrada o consumo de energia em cada uma das etapas de processamento de acordo com os dados obtidos de potência, tensão de trabalho e eficiência e de acordo com o tempo necessário que cada maquinário deve funcionar para processar os 300 kg de macaúba.



E para os dados de saída considerou-se o poder energético dos produtos e subprodutos após o processamento. Dessa forma, será obtida a eficiência do processo e o custo energético de produção.

A finalidade principal desta análise é de comparar o valor energético do óleo obtido ao final do processamento, assim como dos subprodutos que surgem durante o mesmo, com a energia elétrica gasta para realizar o ciclo inteiro.

#### 4.2.4 Consumo Energético

Considerou-se como entrada energética a energia elétrica e térmica necessária para realizar o processamento dos 300 kg de frutos. As massas de entrada de cada produto alimentado em cada volume de controle são apresentadas na Tabela 25.

Tabela 25. Massas iniciais para cada volume de controle.

<b>Volume de Controle</b>	<b>Produto ou subproduto</b>	<b>Massa de entrada (kg)</b>
1	Fruto úmido	300,00
2	Fruto seco	286,04
3	Fruto descascado	243,08
4	Fruto descascado seco	221,60
5	Castanha	90,30
6	Amêndoa úmida	23,85
7	Amêndoa seca	16,33
8	Óleo bruto de amêndoa	9,48
9	Polpa úmida	131,3
10	Polpa seca	66,86
11	Óleo bruto de polpa	32,67

Fonte: Autora, (2023).

Os equipamentos utilizados e seus respectivos dados técnicos são apresentados na Tabela 26.

Tabela 26. Especificações técnicas dos equipamentos.

<b>Equipamento</b>	<b>I (A)</b>	<b>U (V)</b>	<b>P<sub>e</sub> (W)</b>	<b>Capacidade de processamento (kg)</b>
<b>Mesa de Secagem</b>	159,09	220	35000	400
<b>Despolpador</b>	16,81	220	3700	300
<b>Moinho a Martelos</b>	33,34	220	7335	50
<b>Prensa Mecânica</b>	20,45	220	4500	100

Fonte: <https://scottech.com>

Estimou-se o tempo de processamento de cada etapa e então se aplicou a equação (7) para determinar o consumo de energia elétrica necessário; tais resultados são apresentados na Tab. 27, sendo os “inputs” para o balanço de energia. Realizaram-se os cálculos, estimando o tempo necessário para processar a quantidade de referência deste estudo, sendo que nenhuma máquina operou na sua capacidade máxima.

Tabela 27. Consumo de Energia Elétrica kWh

<b>Volume de Controle</b>	<b>Potência Nominal (kW)</b>	<b>Tempo Processamento (horas)</b>	<b>Consumo Energia Elétrica kWh</b>
1	35	24	840
2	3,7	0,95	3,52
3	35	24	840
4	3,7	0,37	1,36
5	7,34	1,81	13,29
6	35	48	1680
7	4,5	0,16	0,72
8	-	0,05	-
9	35	34,08	1192,80
10	4,5	0,67	3,02
11	-	0,17	-

Fonte: Autora, (2023).

#### 4.2.5 Potencial Energético

As saídas energéticas correspondem ao potencial energético dos combustíveis gerados em cada etapa do processamento, logo, realizou-se esta análise com base nos poderes caloríficos inferiores e superiores.

A Tabela 28 apresenta a massa final obtida para cada produto/subproduto obtido em cada volume de controle analisado, ao longo do processamento dos 300 kg de frutos.

Tabela 28. Massas finais para cada volume de controle.

<b>Volume de Controle</b>	<b>Produto ou subproduto</b>	<b>Massa de saída (kg)</b>
1	Fruto Intacto	286,04
2	Epicarpo	42,96
3	Fruto descascado	243,08
4	Castanha	90,30
5	Endocarpo	66,45
6	Amêndoa	16,33
7	Torta de Amêndoa	5,64
8	Óleo de Amêndoa	8,67
9	Polpa	66,86
10	Torta de polpa	31,08
11	Óleo de polpa	27,15

Fonte: Autora, (2023).

Diversos estudos foram realizados a fim de determinar o potencial calorífico superior dos principais componentes do fruto da macaúba; realizou-se uma busca nos valores encontrados na literatura. Os valores encontrados foram sequenciados em ordem cronológica e são apresentados na Tabela 29.

Tabela 29. Valores PCS encontrados na bibliografia pesquisada.

<b>Produto ou subproduto</b>	<b>Filho (2009) kcal/kg</b>	<b>Toledo (2010) kcal/kg</b>	<b>Vilas Boas (2010) kcal/kg</b>	<b>Nunes (2015) kcal/kg</b>	<b>Evaristo (2016) kcal/kg</b>	<b>Dourado (2018) kcal/kg</b>	<b>Sousa (2020) kcal/kg</b>	<b>Ribeiro (2022) kcal/kg</b>
Fruto Intacto	4842,97	-	-	-	-	-	5798,28	-
Epicarpo	5154,88	4941	-	4478	4989	4602,33	-	-
Fruto descascado	-	-	-	-	-	-	-	-
Endocarpo	-	5043	5152,36	4440	5011	5008,10	-	4966,54
Castanha	-	-	4840,01	-	-	4866,88	-	-
Amêndoa	-	-	-	6997	-	-	-	-
Torta de Amêndoa	-	-	-	5329	4377	-	-	6343,21

Óleo de Amêndoa	-	-	-	9093	-	-	-	-
Polpa	-	-	-	4921	-	5113,16	-	-
Torta de polpa	-	-	-	3912	3835	-	-	5341,78
Óleo de polpa	-	-	-	9439	-	-	-	-

Fonte: Autora, (2023).

Nunes (2015) avaliou o poder calorífico superior conforme metodologia proposta pela ASTM D 240-87 e ASTM E 711-87 (ASTM, 1975) utilizando bomba calorimétrica C-200 em amostras de 0,5 g. Estudos como o de Dourado *et al.* (2018) e Evaristo *et al.* (2016) determinaram o PCS dos produtos obtidos após o processamento do fruto da macaúba através da Norma 8633 da ABNT (1984).

Nunes (2015) avaliou diversas partes do fruto da macaúba, não fornecendo apenas dados sobre o PCS do fruto fresco e da castanha, sendo o único autor a apresentar valores para os óleos de polpa e amêndoa. Percebe-se que os pesquisadores possuem maior interesse em avaliar os potenciais do epicarpo e endocarpo, pois podem ser utilizados como biomassa em diversos processos. Não foi encontrada na literatura pesquisada nenhuma análise do PCS do fruto descascado, este fato se justifica, uma vez que o fruto tem maior interesse nas frações separadas; logo, considerou-se o mesmo do fruto intacto.

Percebe-se que os autores apresentaram seus resultados em unidades distintas, sendo expressos em kcal/kg, kJ/kg e MJ/kg. Realizou-se a conversão para a mesma unidade e aplicou-se a média aritmética para obter o valor médio considerando todos os dados obtidos na literatura consultada. Logo, os resultados são apresentados na Tab. 30, em kJ/kg e kcal/kg.

Buscou-se também obter os valores dos PCIs, uma vez que eles também se referem a quantidade de energia térmica potencial gerada em decorrência do processo de combustão de um combustível, neste caso, dos produtos e subprodutos gerados após o processamento da macaúba.

Determinou-se o PCI dos produtos e subprodutos para cada volume de controle, aplicando-se a equação 11. Para tal, foi necessário buscar os dados da composição elementar, que apresenta os percentuais em relação à massa seca dos combustíveis, buscaram-se os valores do teor de hidrogênio na literatura e os valores encontrados são apresentados na Tabela 31.

Tabela 30. Resultados da média aritmética dos valores do PCS considerados neste estudo.

<b>Produto ou subproduto</b>	<b>PCS (kJ/kg)</b>	<b>PCS (kcal/kg)</b>
Fruto Intacto	23.260,75	5.559,45
Epicarpo	20.447,29	4.887,02
Fruto descascado	23.260,75	5.559,45
Castanha	20.306,79	4.853,44
Endocarpo	21.023,27	5.024,68
Amêndoa	29.275,45	6.997,00
Torta de Amêndoa	24.461,65	5.846,47
Óleo de Amêndoa	38.045,11	9.093,00
Polpa	20.991,46	5.017,08
Torta de polpa	20.302,24	4.852,35
Óleo de polpa	39.492,78	9.439,00

Fonte: Autora, (2023).

Ribeiro (2022) cita valores de 7,72%, 8,54% e 5,94% de teor de hidrogênio para a torta da polpa, torta de amêndoa e endocarpo, respectivamente, e o teor de umidade de 7,9%, 6,03% e 8,42%, respectivamente. Barbosa (2021) encontrou o teor médio de 5,56 para o endocarpo da macaúba e cita o teor de umidade de 8,71%. Dourado *et al.* (2018) determinaram o teor de hidrogênio, sendo 5,89% para o epicarpo, 6,14% para o endocarpo, 7,18% para o mesocarpo e 6,82% para a castanha. Teófilo (2019) relata que a torta de macaúba possui teor de hidrogênio de 5,2%. Queiroga *et al.* (2016) menciona o teor de hidrogênio de 11,65% para o óleo de amêndoa e 11,51% para o óleo de polpa. Evaristo (2015) cita 7,26%, 7,42%, 6,19% e 7,41% para o epicarpo, torta da polpa, endocarpo e torta da amêndoa.

A equação (11) considera o teor de umidade na amostra; para fins de simplificação, determinou-se como parâmetro que todos os componentes possuem teor de umidade (w) igual a 0,01%, uma vez que se considerou anteriormente que se removeu todo o teor de umidade presente no fruto.

Não foi encontrada na literatura consultada a análise elementar para o fruto intacto, fruto descascado e amêndoa. Neste cenário, considerou-se para a amêndoa o mesmo teor da polpa, portanto o valor citado por Evaristo (2015), e para o fruto intacto estabeleceu-se o teor de hidrogênio de 9,0%. Não foram encontrados valores para o fruto descascado, não sendo possível calcular o PCS e PCI; optou-se então por utilizar o mesmo do fruto intacto.

Tabela 31. Composição elementar utilizada neste estudo.

<b>Volume de Controle</b>	<b>Produto ou subproduto</b>	<b>H (%)</b>	<b>PCS (kJ/kg)</b>
1	Fruto Intacto	9,0	23.260,75
2	Epicarpo	5,89	20.447,29
3	Fruto descascado	9,0	23.260,75
4	Castanha	6,82	20.306,79
5	Endocarpo	5,94	21.023,27
6	Amêndoa	7,41	29.275,45
7	Torta de Amêndoa	8,54	24.461,65
8	Óleo de Amêndoa	11,65	38.045,11
9	Polpa	7,18	20.991,46
10	Torta de polpa	7,72	20.302,24
11	Óleo de polpa	11,51	39.492,78

Fonte: Autora, (2023)

Logo, feitas todas as considerações, aplicou-se a equação (11) e foi calculado o valor aproximado para o PCI de cada combustível. Os resultados encontrados são apresentados na Tabela 32.

Evaristo (2015) determinou em seu estudo o PCI dos componentes do fruto da macaúba, obtendo 16,71 MJ/kg para o epicarpo, 15,23 MJ/kg para a torta de polpa; 17,09 MJ/kg para o endocarpo e 19,24 MJ/kg para a torta de amêndoa. Os valores encontrados para o epicarpo e endocarpo discordam dos valores encontrados pelo autor, e são próximos aos obtidos por Marques (2021) que encontrou os valores de 19.468,22 kJ/kg para epicarpo e 19.368,63 kJ/kg para o endocarpo.

Tabela 32. Resultados calculados para o PCI.

<b>Produto ou subproduto</b>	<b>PCI (kJ/kg)</b>	<b>PCI (kcal/kg)</b>
Fruto Intacto	21.292,75	5.089,09
Epicarpo	19.151,05	4.577,21
Fruto descascado	21.292,75	5.089,09
Castanha	18.809,67	4.495,62
Endocarpo	19.716,23	4.712,29
Amêndoa	27.650,89	6.608,72
Torta de Amêndoa	22.593,01	5.399,86
Óleo de Amêndoa	35.504,71	8.485,83
Polpa	19.416,58	4.640,67
Torta de polpa	18.610,72	4.448,07
Óleo de polpa	36.982,62	8.839,06

Fonte: Autora, (2023).

Logo, os valores de PCS e PCI em MJ/kg considerados neste estudo são apresentados na Tabela 33. Observa-se que conforme o esperado os valores definidos para o PCS são superiores aos do PCI.

Tabela 33. Valores considerados para o balanço de massa.

<b>Volume de Controle</b>	<b>Produto ou subproduto</b>	<b>Massa de saída (kg)</b>	<b>PCS (MJ/kg)</b>	<b>PCI (MJ/kg)</b>
1	Fruto Intacto	286,04	23,26	21,29
2	Epicarpo	42,96	20,45	19,15
3	Fruto descascado	243,08	23,26	21,29
4	Castanha	90,30	20,31	18,81
5	Endocarpo	66,45	21,02	19,72
6	Amêndoa	16,33	29,28	27,65
7	Torta de Amêndoa	5,64	24,46	22,59
8	Óleo de Amêndoa	8,67	38,05	35,50
9	Polpa	66,86	20,99	19,42
10	Torta de polpa	31,08	20,30	18,61
11	Óleo de polpa	27,15	39,49	36,98

Fonte: Autora, (2023).

Observa-se que dentre todos os componentes do fruto da macaúba o que apresenta maior potencial energético é o óleo de polpa seguido do óleo da amêndoa. Considerando os resíduos obtidos no processo de extração, tem-se a torta de amêndoa com maior potencial calorífico, seguido do endocarpo. Estes valores discordam dos obtidos por Barbosa (2021) que cita que o endocarpo é o resíduo do fruto com maior poder calorífico superior. Vilas Boas *et al.* (2010) constataram que o carvão vegetal produzido a partir do endocarpo da macaúba apresenta características desejáveis tanto para uso energético, quanto siderúrgico.

Os resultados encontrados concordam com os de Evaristo (2015) que cita que a torta de amêndoa apresenta maior PCS e a torta de polpa o menor, e que tal fato pode ser justificado pela presença de óleo, o que eleva os teores de lignina.

Marques (2021) comparou os valores do PCS do bagaço da cana de açúcar, que é de 15,2 MJ/kg, com o endocarpo e epicarpo da macaúba, encontrando valores superiores para eles.

Neste contexto, considerando o PCS e PCI dos produtos e as massas de saída para cada volume de controle avaliado, tem-se a produção energética. Os resultados dos dados de saída são apresentados na Tab. 34.

Tabela 34. Produção Energética.

<b>Volume de Controle</b>	<b>Produto ou subproduto</b>	<b>Quantidade de material (kg)</b>	<b>Energia máxima PCS x massa (MJ)</b>	<b>Energia mínima PCI x massa (MJ)</b>
1	Fruto Intacto	286,04	6.653,50	6.090,58
2	Epicarpo	42,96	878,42	822,73
3	Fruto descascado	243,08	5.654,22	5.175,84
4	Polpa	90,30	1.833,70	1.698,51
5	Endocarpo	66,45	1.397,00	1.310,14
6	Amêndoa	16,33	478,07	451,54
7	Torta de Amêndoa	5,64	137,96	127,42
8	Óleo de Amêndoa	8,67	329,85	307,83
9	Polpa	66,86	1.403,49	1.298,19
10	Torta de polpa	31,08	630,99	578,42
11	Óleo de polpa	27,15	1.072,23	1.004,08

Fonte: Autora, (2023).

#### 4.2.6 Análise Energética – Consumo x Produção

A análise energética é fundamental para avaliação do sistema, pois apresenta dados fundamentais para análise da viabilidade técnica dos processos, auxiliando na tomada de decisões a fim de aprimorar os processos. Esta pesquisa realizou uma análise do consumo energético considerando um processo experimental e valores teóricos por meio de dados disponíveis na literatura, ou seja, foram utilizadas aproximações e valores médios.

Considerando todos os resultados encontrados, realiza-se uma avaliação energética relacionando as entradas e saídas energéticas. Como os resultados de saída são expressos em kWh, realizaram-se as conversões, sabendo que 1 J corresponde a  $2,777 \times 10^{-7}$  kWh, pode-se dizer também que 1 kWh equivale a  $3,6 \times 10^6$  J. Os resultados encontrados são apresentados na Tab. 35.

Realizando o somatório de cada volume de controle para o processamento total de 300 kg de macaúba, são gerados, considerando em termos de PCI, 5240,36 kWh o que corresponde a 18.865,28 MJ, e se tratando de PCS, 5685,97 kWh equivalentes a 20.469,43 MJ.



Tabela 35. Equivalência MJ para kWh

<b>Volume de Controle</b>	<b>Produto ou subproduto</b>	<b>Energia máxima PCS x massa (MJ)</b>	<b>Energia máxima PCS x massa (kWh)</b>	<b>Energia mínima PCI x massa (MJ)</b>	<b>Energia mínima PCI x massa (kWh)</b>
1	Fruto Intacto	6.653,50	1848,19	6.090,58	1691,83
2	Epicarpo	878,42	244,01	822,73	228,54
3	Fruto descascado	5.654,22	1570,62	5.175,84	1437,73
4	Polpa	1.833,70	509,36	1.698,51	471,81
3	Endocarpo	1.397,00	388,06	1.310,14	363,93
6	Amêndoa	478,07	132,80	451,54	125,43
7	Torta de Amêndoa	137,96	38,32	127,42	35,39
8	Óleo de Amêndoa	329,85	91,63	307,83	85,51
9	Polpa	1.403,49	389,86	1.298,19	360,61
10	Torta de polpa	630,99	175,28	578,42	160,67
11	Óleo de polpa	1.072,23	297,84	1.004,08	278,91

Fonte: Autora, (2023).

Marques (2021) avaliou a quantidade de energia gerada com uma tonelada de biomassa e obteve 810,95 kWh para o epicarpo e 806,8 kWh para o endocarpo, comparando-os com o do bagaço de cana de açúcar que é de 571,36 kWh. Para o cálculo, o autor considerou que a eficiência no processo de geração de energia elétrica de uma usina de pequeno porte é de 15%, logo, realizou a conversão de apenas 15% do PCI das biomassas utilizadas para a geração de energia elétrica. A título de comparação, avaliou-se este mesmo cálculo considerando os dados deste estudo, obtendo 797,63 kWh para o epicarpo e 821,44 kWh para o endocarpo, encontrando valores próximos aos citados pelo autor.

Considerando os dados obtidos de entrada e saída, realiza-se a comparação energética para cada volume de controle, apresentado na Tabela 36. Os volumes de controle 8 e 11 referem-se ao processo de filtragem, logo, não foram avaliados energeticamente. Avaliaram-se todos os outros equipamentos alimentados com energia elétrica, considerou-se que o processamento de 300 kg ocorre em 134,16 horas, sendo deste total, 130,08 horas corresponde ao processo de secagem. Considerando os dados técnicos dos equipamentos, estimou-se o gasto

total de 4.574,71 kWh. Percebe-se que o processo de extração do óleo de macaúba é um processo simples, no entanto, com vários pontos a serem aperfeiçoados. Para os dados de saída, considerou-se o PCI dos combustíveis gerados em cada etapa.

De acordo com os resultados apresentados na Tab. 36 foram utilizados cerca de 4.574,71 kWh de energia elétrica para todos os processos avaliados. Em contrapartida, resultaram em 5240,36 kWh de energia, considerando os PCIs, oriundos da produção.

Tabela 36. Entradas e Saídas - processamento de 300 kg de frutos de macaúba.

<b>Volume de Controle</b>	<b>Entradas Energéticas</b>	<b>Consumo Energético kWh</b>	<b>Saídas Energéticas</b>	<b>Produção Energética kWh</b>
1	Energia Elétrica	840	Fruto Intacto	1691,83
2	Energia Elétrica	3,52	Epicarpo	228,54
3	Energia Elétrica	840	Fruto descascado	1437,73
4	Energia Elétrica	1,36	Polpa	471,81
5	Energia Elétrica	13,29	Endocarpo	363,93
6	Energia Elétrica	1680	Amêndoa	125,43
7	Energia Elétrica	0,72	Torta de Amêndoa	35,39
8	-	-	Óleo de Amêndoa	85,51
9	Energia Elétrica	1192,80	Polpa	360,61
10	Energia Elétrica	3,02	Torta de polpa	160,67
11	-	-	Óleo de polpa	278,91
<b>Total</b>		<b>4.574,71</b>		<b>5.240,36</b>

Fonte: Autora, (2023).

No entanto, é necessário avaliar o final do processamento do fruto da macaúba; obtém-se como principais produtos de interesse os óleos de amêndoa e polpa, e os subprodutos são as tortas da amêndoa e da polpa, o endocarpo e epicarpo. Tais produtos e subprodutos gerados fornecem 1.152,95 kWh, sendo apresentado na Tab. 37, o que equivale a 4.150,62 MJ; considerando o PCS, obtém-se 1.235,14 kWh (4.446,45MJ).

Tabela 37. Produção energética final após o processamento de 300 kg de macaúba.

<b>Volume de Controle</b>	<b>Produto ou subproduto</b>	<b>Energia máxima PCS x massa (MJ)</b>	<b>Energia máxima PCS x massa (kWh)</b>	<b>Energia mínima PCI x massa (MJ)</b>	<b>Energia mínima PCI x massa (kWh)</b>
2	Epicarpo	878,42	244,01	822,73	228,54
3	Endocarpo	1.397,00	388,06	1.310,14	363,93
7	Torta de Amêndoa	137,96	38,32	127,42	35,39
8	Óleo de Amêndoa	329,85	91,63	307,83	85,51
10	Torta de polpa	630,99	175,28	578,42	160,67
11	Óleo de polpa	1.072,23	297,84	1.004,08	278,91
<b>Total</b>		<b>4446,45</b>	<b>1235,14</b>	<b>4150,62</b>	<b>1152,95</b>

Fonte: Autora, (2023).

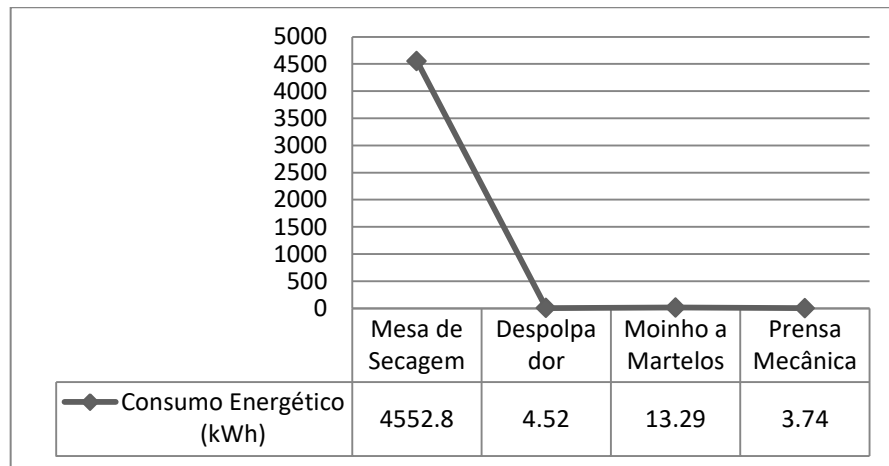
No entanto, os equipamentos citados possuem capacidade de processar maiores quantidades por hora, o que poderia ampliar a eficiência energética.

Avaliando isoladamente o consumo energético de cada equipamento sugerido neste processo, obtém-se a Figura 40, na qual apresentam-se os valores em kWh.

Do total de energia necessário para o processamento de 300 kg de macaúba, aproximadamente 99,5% equivalente a 4.552,80 kWh é empregado nos processos de secagem, e apenas 0,5%, que são 21,55 kWh das demais etapas. Logo, a chave para que este processo seja viabilizado é aperfeiçoar o processo de secagem.

Observou-se que, dentre as etapas do processo de extração, a etapa mais dispendiosa do ponto de vista energético é a secagem, o que era de fato esperado. No entanto, o equipamento proposto pode ser projetado com outros tipos de combustíveis, logo, recomenda-se a avaliar outras fontes de alimentação.

Figura 40. Gasto energético por equipamento.



Fonte: Autora, (2023).

Considerando que a mesa de secagem tem capacidade de processar 400 kg de macaúba, e nas condições avaliadas processou quantidades inferiores, é fundamental ressaltar que com o mesmo consumo energético, é possível processar maiores quantidades; logo, a produção energética em termos de energia útil dos produtos gerados será superior aos estimados. Então se constata que é inviável utilizar este equipamento para processar pequenas quantidades.

Fazendo um cálculo por alto, considerando o valor do kWh sendo R\$0,8384/kWh, e o gasto energético total de 4.574,71 kWh, isso resultaria em um custo de R\$3.835,44 em energia elétrica considerando os processos que foram avaliados neste trabalho. Obteve-se ao final do processamento avaliado cerca de 5,64 kg de óleo da amêndoa e 27,15 kg de óleo da polpa. Obviamente, para que esse óleo fosse transformado em biocombustível, seria necessário todo um novo processamento químico de refinamento o qual não foi discutido nesse trabalho.

Foi encontrado que o óleo da polpa da macaúba está sendo vendido por um valor em média de R\$350,00/litro e o óleo da amêndoa em média R\$307,00/litro. Fazendo os cálculos em termos da massa final obtida (considerando 1 kg = 0,90 l), tem-se que foram obtidos 5,1 litros de óleo da amêndoa e 24,4 litros de óleo da polpa. Considerando que o óleo obtido estaria pronto para venda, o valor total seria de R\$ 10.105,7. Claro que haveria mais alguns custos como envasamento, transporte, entre outros. Ainda assim, a comparação entre o custo energético de produção e o valor do produto obtido demonstra um ganho relevante em relação ao processo avaliado.

Lembrando que a comparação foi realizada muito grosseiramente, pois o cálculo necessitaria considerar muitos outros fatores. Portanto, para um trabalho futuro, propõe-se uma avaliação do processo mais detalhada e uma análise econômica completa para se ter um cenário mais próximo do real. Além disso, neste trabalho, não foram consideradas as etapas de plantio, cultivo e colheita dos frutos. Esses dispêndios também devem ser considerados na análise econômica futura, bem como o valor agregado relativo aos outros subprodutos do processamento, pois nada se perde dos frutos.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente dissertação teve como objetivo principal realizar uma análise do consumo energético de um sistema de extração de óleo da macaúba (*Acrocomia aculeata*). Desejando ainda apresentar o panorama sobre o cultivo e processamento dela, discutindo brevemente sobre o aproveitamento das oleaginosas nos segmentos energéticos e não energéticos.

Buscou-se ainda descrever a planta piloto desenvolvida na UFV para extração do óleo da macaúba, caracterizando os fluxos energéticos envolvidos no processo, a fim de analisar o gasto energético. Desta forma, apresentou-se uma metodologia de análise do consumo energético do processo de extração do óleo de macaúba de uma planta conceitual, na qual, foi possível apresentar através de uma visão sistemática todo o processo de extração e identificar algumas áreas a serem aprimoradas.

Cabe mencionar ainda que é fundamental conhecer as características intrínsecas relacionadas à macaúba para que o processo de extração seja o mais eficiente possível. Para dimensionamento dos equipamentos utilizados no processamento é fundamental conhecer as propriedades físicas e geométricas da macaúba. Em todo processo se objetiva um produto com qualidade e com o menor custo operacional possível. Conhecer as propriedades físicas da espécie contribui para o desenvolvimento dos processos viabilizando o aperfeiçoamento do sistema produtivo.

Percebe-se que os estudos sobre a macaúba se intensificaram nos últimos vinte anos e que existem um acervo bibliográfico disponível e que está em crescimento com o desenvolvimento de diversas pesquisas sobre o tema, e que tal fato possibilita a ampliação dos conhecimentos e desenvolvimento da cultura e dos processos envolvidos na extração de seu óleo.

Contudo, percebe-se que existem poucos estudos sobre o consumo energético do processo de extração e que fica evidente sua importância, pois através de estudos como este, é possível definir a viabilidade econômica do processo em questão. No caso avaliado neste estudo, evidenciou-se que para custear o consumo energético é necessário processar quantidade superior a 300 kg, que é a menor capacidade de operação dos equipamentos avaliados neste processo. Logo, o processo apresentou consumo energético elevado em relação ao potencial energético dos produtos e subprodutos obtidos. Sendo possível aumentar a quantidade processada sem aumentar o consumo.

Para que a macaúba possa se estabelecer como fonte de óleo vegetal é fundamental o desenvolvimento de tecnologias para toda a cadeia produtiva, uma vez que a execução de cada etapa influencia na qualidade final do óleo obtido. Em um cenário competitivo é fundamental estabelecer rotas tecnológicas eficientes ao longo de todo o processo produtivo.

Este estudo aprofundou os conhecimentos do ponto de vista energético através da metodologia apresentada. Sendo esta informação fundamental para obter o melhor aproveitamento e uso consciente dos recursos energéticos empregados no processo de extração do óleo de macaúba.

### 5.1 Sugestão para trabalhos futuros

Considerando que a metodologia abordada foi baseada em dados teóricos, sugere-se como trabalho futuro que ela seja replicada utilizando dados reais.

Do ponto de vista energético, verificou-se que a etapa mais dispendiosa é a secagem, portanto é evidente a necessidade de realizar estudos termoeconômicos a fim de aperfeiçoar os sistemas térmicos.

É viável também expandir os estudos e considerar o consumo energético necessário nas etapas anteriores ao processamento para extração do óleo de macaúba, tais como os gastos energéticos relacionados ao cultivo, colheita, transporte e armazenamento da macaúba.

Além do óleo de macaúba, outros subprodutos com alto poder energético são gerados, como o epicarpo e o endocarpo. Recomenda-se avaliar a aplicação deles no processo de cogeração de energia dentro do próprio processo produtivo.

Sobre o processo produtivo, um dos fatores que deve ser considerado é a sazonalidade da cultura, sendo necessário expandir o período de armazenamento dos frutos pós-colheita, sendo, portanto, necessário desenvolver uma atmosfera propícia e mecanismos viáveis para tal.

## 6. REFERÊNCIAS

- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8633**: Carvão vegetal – determinação do poder calorífico – método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984. 13p.
- AMARAL, F. P. **Estudos das características físico-químicas dos óleos da amêndoa e polpa da macaúba [*Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. ex Mart]**. Dissertação (mestrado) - Universidade Paulista, Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu/SP, 2007.
- ANP. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Biodiesel**. Disponível em <<http://www.anp.gov.br/>>. Acesso em: 16 de setembro de 2020.
- ANVISA. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Instrução Normativa – nº87 de 15 de março de 2021. Disponível em: < <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/instrucao-normativa-in-n-87-de-15-de-marco-de-2021-309008143>>. Acesso em 06 de setembro de 2023.
- ANVISA. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. RDC Nº481 de 15 de março de 2021. Disponível: <<https://www.in.gov.br/web/dou/-/resolucao-rdc-n-481-de-15-de-marco-de-2021-309012789>>. Acesso em 06 de setembro de 2023.
- ASTM. Standard test method for gross calorific value of solid fuel by the adiabatic bomb calorimeter. Annu. Book ASTM Stand.; (United States), v. 26, 1 1975.
- BARBOSA, E. V. L., **Análise qualitativa do gás proveniente da gaseificação do fruto da macaúba (*Acrocomia aculeata*)**. Monografia (graduação) – Universidade de Brasília: UnB, 2021. 54p.
- BEN. **Balanco Energético Nacional 2022: Ano base 2021** / Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro: EPE, 2021. Disponível em: < <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-638/BEN2022.pdf>>. Acesso em: 29 de maio de 2023.
- BONOMETO, R. P. *et al.* Análise Energética do processo experimental de produção de biodiesel a partir de óleo de frango. **Revista energia na agricultura**. Botucatu/SP, vol.25, n.4, 2010, p.130-140.
- BRANDÃO, E. G. **Avaliação da torta de macaúba (*Acrocomia aculeata*) como volumoso para ovinos**. Monografia (Graduação), Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, Brasília, 2013. 39 f.
- CALLEGARI, F. C.; CREN, E. C.; ANDRADE, M. H. C. Perspectivas da utilização dos óleos da macaúba (*acrocomia aculeata* (jacq.) lodd. ex mart) no desenvolvimento de cosméticos. Florianópolis, SC: [s.n.], 2014.
- CARGNIN, A; JUNQUEIRA, N. T. V.; FOGAÇA, C. M. **Potencial da Macaubeira como fonte de matéria-prima para produção de biodiesel**. 1º edição. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2008. 16p. (Documentos / Embrapa Cerrados, ISSN 1517-5111; 217).



CARVALHO, F. M. **Influência da temperatura do ar de secagem e da utilização do ácido etilenodiaminotetracético na qualidade do óleo e caracterização do fruto de macaúba.** Dissertação (mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2010.

CARVALHO, K. J.; SOUZA, A. L.; MACHADO, C. C. **Macaúba – *Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lood. ex Mart.: ecologia, manejo, silvicultura e tecnologia da macaúba.** Biblioteca Florestal Digital, Viçosa/MG, 2011. Disponível em: <<http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br/handle/123456789/11140>>.

CARVALHO, M. S. **Cinética de secagem, conservação e propriedades físico-químicas de amêndoas de macaúba.** Tese (dourado) – Universidade Federal de Viçosa - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. Viçosa/MG, 2018.

ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. Transferência de calor e massa: uma abordagem prática. 4. ed. Porto Alegre: AMGH, 2012. 904 p.

CETEC - FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. Produção de combustíveis líquidos a partir de óleos vegetais: relatório final do convênio STI – MIC / CETEC. Vol. 1 e 2. CETEC. Belo Horizonte, 1983.

CICONINI, G. **Caracterização de frutos e óleo de polpa de macaúba dos biomas Cerrado e pantanal do estado de Mato Grosso do Sul, Brasil.** Dissertação (mestrado) – Universidade Católica Dom Bosco. Campo Grade, 2012.

COSTA, D. A. N. **Estudo do processo de extração do óleo da macaúba (*Acrocomia Intumescens*).** Dissertação (mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Química – Universidade Federal de Alagoas. Maceió, 2016.

CRUZ, R. P. *et al.* Simulação e análise econômica da produção de biodiesel a partir de óleo de macaúba. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, v. 3, n. 3, p. 533-560, 2017.

DANTAS, D. N. **Uso da biomassa da cana-de-açúcar para geração de energia elétrica: análise energética, exergética e ambiental de sistemas de cogeração em sucroalcooleiras no interior paulista.** Dissertação (mestrado) - Universidade de São Paulo – Programa de Pós-Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental. São Carlos, 2010.

DEBMANDAL, M.; MANDAL, S. Coconut (*Cocos nucifera* L.: Arecaceae): in health promotion and disease prevention. **Asian Pacific Journal of Tropical Medicine**, v. 4, n. 3, p. 241-247, 2011.

DESSIMONI-PINTO, N. A. V. *et al.* Características físico-químicas da amêndoa de macaúba e seu aproveitamento na elaboração de barras de cereais. **Alimentos e Nutrição**. Araraquara, v. 21, n. 1, p. 79-86, 2010.

DOURADO, D. C. *et al.* Determinação do poder colorífico e análise elementar do fruto da macaubeira (*Acrocomia aculeata*). **Rev. Espacios**. vol.39, n. 3,2018.

EPE. **Empresa de Pesquisa Energética. Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis – Ano 2019.** Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: <[https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-489/Analise\\_de\\_Conjuntura\\_Ano\\_2019.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-489/Analise_de_Conjuntura_Ano_2019.pdf)>. Acesso em: 24 de mai.2023.

EPE. **Empresa de Pesquisa Energética. Matriz Energética e Elétrica.** Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em: 08 de mai.2023.

EVARISTO, A. B. **Conservação pós-colheita e potencial bioenergético de frutos de macaúba (*Acrocomia aculeata*).** Tese (doutorado) – Universidade Federal de Viçosa - Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia. Viçosa, 2015.

EVARISTO, A. B. *et al.* (2016). Potencial energético dos resíduos do fruto da macaúba e sua utilização na produção de carvão vegetal. **Rev. Ciência Florestal**, Santa Maria, v.26, n. 2, p. 571-577, 2016.

EVARISTO, A. B. *et al.* Caracterização físico-química de frutos de macaúba provenientes de três regiões do estado de Minas Gerais. **Revista Agrotecnologia**, Ipameri, v. 8, n.2, p.81-92, 2017.

FARIAS, T. M. **Biometria e processamento dos frutos da macaúba (*Acrocomia sp*) para a produção de óleos.** Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Belo Horizonte/MG, 2010.

FAVARO, S. P. *et al.* Armazenamento e processamento da macaúba: contribuições para manutenção da qualidade e aumento do rendimento de óleo da polpa. Brasília, DF: **Embrapa Agroenergia**, 2018. 38 p. – (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento / Embrapa Agroenergia, ISSN 2177-0395; 16).

FAVARO, S. P. *et al.* **Eficiência de extração e determinação de acidez de óleo de polpa de macaúba em processo aquoso.** 7º Congresso da Rede Brasileira de tecnologia e inovação de biodiesel. Florianópolis/SC, 2019.

FIGUEIREDO, H. R.; CARVALHO, V. R. J. **Alimentos funcionais: compostos bioativos e seus efeitos benéficos à saúde.** II Congresso Internacional do Grupo Unis. Fundação de Ensino e Pesquisa do Sul de Minas, 2015.

FILHO, J. A. A.; COLOMBO, C. A.; BERTON, L. H. C. Macaúba: Palmeira nativa como opção bioenergética. **Pesquisa & Tecnologia**, vol. 9, n. 2, 2012.

FILHO, J. S. **Estudo da gaseificação da torta do coco macaúba, lenha de eucalipto, lenha de café e do carvão vegetal e seu potencial energético para desidratação de frutas.** Dissertação -(mestrado) - Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia – UESB – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Alimentos. Itapetinga/BA, 2009.

FLAUSINO, B. F. P. G. **Produção de energia elétrica a partir do aproveitamento do bagaço de cana-de-açúcar gerado no setor sucroalcooleiro de Minas Gerais**. Tese (Doutorado em Ciências e Técnicas Nucleares) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

GALVANI, F.; SANTOS, J. F. 085 - Extração mecânica da polpa da bocaiúva voltada para a fabricação de alimentos em comunidades extrativistas de Miranda, MS. **Cadernos de Agroecologia**, v. 5, n. 1, 2010.

GOULART, S. M. **Amadurecimento pós-colheita de frutos de macaúba e qualidade do óleo para a produção de biodiesel**. Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia – Universidade Federal de Viçosa. Viçosa/MG, 2014.

GRANDE, S. C.; CREN, E. C. Demanda de proteínas vegetais: potencialidades e o diferencial dos farelos de macaúba (revisão). *Journal of Chemical Engineering and Chemistry*, vol.2, nº 3, p. 190–214, 2016.

GRANJA, M. M. C. *et al.*, Explant origin and culture media factors drive the somatic embryogenesis response in *Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. ex Mart., an emerging oil crop in the tropics, **Industrial Crops and Products**, Vol. 117, PP. 1-12, 2018.

GUEDES, J. M. *et al.* Uso da biomassa como fonte energética para a produção de biocombustíveis. Ambiente: Gestão e Desenvolvimento. Dossiê: I Simpósio de Meio Ambiente e Energia (SiMAE). Fortaleza/CE, 2020.

LANES, E. C. M; COSTA, P. M. A; MOTOIKE, S. Y. Brazil promotes aviation biofuels. **Nature**, vol. 511, n .31, 2014.

LEBID, T.; HENKES, J. A. Óleo de dendê na produção de biodiesel: Um estudo de caso das vantagens e desvantagens econômica, ecológica e social da cultura desta oleaginosa para a produção de biodiesel. **R. gest. sust.**, Florianópolis, v.4, n. 1, p.392-415, 2015.

LIMA, N. E; CARVALHO, A.A.; MEEROW, A.W., MANFRINI, M.H. A review of the palm genus *Acrocomia*: Neotropical green gold. **Organisms Diversity & Evolution**. 18:11-161.2018.

LIRA, F. F. *et. al.* Avaliação da Composição Centesimal de Frutos de Macaúba. – **Biochemistry And Biotechnology Reports**, Londrina, v. 3, n. 2, p.17-20, 2013.

LOPES, M. A. e FAVARO, S. P. **Macaúba: uma palmeira nativa na Bioeconomia**. Embrapa, 2021. Disponível em: < <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/63538001/artigo-macauba-uma-palmeira-nativa-na-bioeconomia>>. Acesso em: 24 de mai.2023.

LORENZI, G. M. A. C. *Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. ex. Mart. – Arecaceae: bases para o extrativismo sustentável. Tese (doutorado) – Universidade Federal do Paraná. Curitiba/PN, 2006.

MACHADO, C. A. C. **Construção e avaliação de um protótipo para despolpar frutos de *Acrocomia sp.*** Tese (doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia e Biodiversidade – Universidade Federal da Grande Dourados. Dourados/MS, 2018.

MALODE, S. J. *et al.* Recent advances and viability in biofuel production. **Energy Conversion and Management**: X, v. 10, p. 100070, jun. 2021. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ecmx.2020.100070>>.

MARQUES, R. M., **Avaliação técnico-econômica da casca, do endocarpo de macaúba e do bagaço de cana-de-açúcar para uso em cogeração de energia elétrica.** Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília – Instituto de Química. Brasília, DF. 2021. 50f.

MARCÍLIO, B. B. **Metodologia de formulação & implementação de balanço de massa e energia utilizando plataforma industrial de base de dados, COMOS: Estudo de caso do processo de degomagem de óleos vegetais.** Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Florianópolis/SC, 2019.

MARTINS, A. D. **Radiação gama e secagem na conservação da qualidade do óleo de frutos da macaúba.** Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Viçosa. Viçosa/MG, 2013.

MAZZUCCO, M. M. Introdução aos balanços de massa e energia. Academia: Accelerating the world's research, 2013. Disponível em: <[1nq.com/uvxOt](http://1nq.com/uvxOt)>.

MELO, P. G. **Produção e caracterização de biodieseis obtidos a partir da oleaginosa macaúba (*Acrocomia aculeata*).** Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Química – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia/MG, 2012.

MONTOYA, S. G. **Caracterização do desenvolvimento do fruto da palmeira macaúba.** Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Programa de Pós-Graduação em Fitotécnica, Viçosa/MG, 2013.

MONTOYA, S. G. *et al.*, Fruit development, growth, and stored reserves in macauba palm (*Acrocomia aculeata*), an alternative bioenergy crop, **Planta**, pp. 927–938, 2016.

MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N. **Fundamentals of Engineering Thermodynamics.** 5<sup>TH</sup> ed. Jhon Willey, 2006.

MOREIRA, J. B.; REZENDE, D. B.; PASA, V. M. D. Deoxygenation of macaúba acid oil over co-based catalyst supported on activated biochar from macaúba endocarp: A potential and sustainable route for green diesel and biokerosene production. **Fuel**, v. 269, p. 117-253, jun. 2020. Elsevier BV. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117253>>.

MOREIRA, S. L. S. *et al.* Root distribution of cultivated macaúba trees. **Industrial Crops and Products**, V. 137, p. 646-651, out. 2019. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.05.064>>.

MOURA, E. F. *et al.*, Somatic embryogenesis in macaw palm (*Acrocomia aculeata*) from zygotic embryos, **Scientia Horticulturae**, Vol. 119, 4, 2009, pp. 447-454.

MOURA, E. F.; VENTRELLA, M. C.; MOTOIKE, S. Y. Anatomy, histochemistry and ultra-structure of seed and somatic embryo of *Acrocomia aculeata* (Arecaceae). **Scientia Agricola**, v. 67, n° 4, 399–407, 2010.

NABAIS, A. S. **Análise energética e ambiental em estufas agrícolas**. Dissertação (mestrado) – Instituto Politécnico de Leiria, Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Leiria, 2015.

NUNES, A. A. **Óleo da polpa de macaúba (*Acrocomia aculeata* (Jacq) Lood. Ex Mart) com alta qualidade: processo de refino e termoestabilidade**. Dissertação (mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia – Universidade Católica Dom Bosco. Campo Grande/MS, 2013.

NUNES, A. P. **Estudo da macaúba (*Acrocomia Aculeata*) como fonte de energia sustentável e obtenção de insumo para o setor farmacêutico**. Dissertação (mestre)- Universidade Federal do Tocantins – Campus Universitário de Palmas. Palmas/TO, 2015.

OLIVEIRA, M. C.; **Elaboração de maionese a partir da polpa de macaúba: caracterização físico-química, estabilidade e valor energético**. Monografia (graduação) – Universidade Federal da Paraíba, Centro de Tecnologia e Desenvolvimento Regional. João Pessoa/PB, 2019.

PEREIRA, M. R. N. *et al.* **Óleo de macaúba como alternativa para produção de biodiesel utilizando irradiação com micro-ondas**. XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química. Florianópolis/SC, 2014.

PETERS, J. F.; PETRAKOPOULOU, F.; DUFOUR, J. Exergy analysis of synthetic biofuel production via fast pyrolysis and hydroupergrading. **Energy**, v. 79, p. 325-336, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2014.11.019>>.

PIMENTA, T. V. *et al.* Extração, neutralização e caracterização dos óleos do fruto da macaúba (*Acrocomia Aculeata*). XIX Congresso Brasileiro de Engenharia Química. Búzios/RJ, 2012.

PINHEIRO, M. B. C. **Previsão da produção de fontes renováveis e não renováveis selecionadas da matriz energética brasileira**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Economia Rural, Fortaleza, 2020.

PINTO, R. R. **Balanco de massa do processo de produção de farinha de trigo**. Trabalho de conclusão de curso (graduação) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, 2010.

PIRES, T. P. *et al.* Ecophysiological traits of the macaw palm: A contribution towards the domestication of a novel oil crop. **Industrial Crops And Products**, [S. L.], v. 44, p. 200-210, jan. 2013. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.09.029>> .

QUEIROGA, V. P. *et al.* Tecnologias de plantio da macaubeira na região do Nordeste e Aproveitamento Energético. 1º edição. **R. A Barriguda: Revista Científica**. Associação da Revista Eletrônica a Barriguda. AREPB. Campina Grande. 2016. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/350100521>>. Acesso em: 15 de julho de 2021.

REZENDE, D. B. *et al.* Phase Equilibria Study of Systems Composed of Macaúba Pulp Oil (*Acrocomia aculeata*), Free Fatty Acids, and Hydrous Ethanol at 25°C. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, Vol. 3, 7, pp. 986-994, 2017.

REZENDE, D. B. *et al.* Processo Alternativo de Desacidificação do Óleo da Polpa da Macaúba (*Acrocomia aculeata*) Visando Acoplamento em Usinas de Produção de Biodiesel, **Journal of Chemical Engineering and Chemistry**, Vol. 02, N. 03, pp. 061-080, 2016.

RIBEIRO, K. L. S. **Liquefação térmica de resíduos do processamento do fruto da macaúba para fins energéticos**. Tese (doutorado) – Universidade Federal de Ouro Preto - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da Rede Temática em Engenharia de Materiais. Ouro Preto/MG, 2022. 113f.

RODRIGUES, H. de S. **Obtenção de ésteres etílicos e metílicos, por reação de transesterificação, a partir do óleo da palmeira macaúba latino-americana macaúba, acrocomia aculeata**. Tese (Doutorado em Química) - Escola de Química. Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto. 2007.

SABINO, S. G. *et al.* CLEAN ALTERNATIVE ENERGIES: a techno-economic study of microalgae biofuel. **Revista Indicação Geográfica e Inovação**, v. 5, n. 2, p. 1212-1223, 1 abr. 2021. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.51722/ingi.v5.i2.158>>.

SALVADOR, G. V., Biorrefinaria de macaúba em pequena escala: uma análise técnica econômica, ambiental e geoespacial. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro – Programa de Pós-graduação em Engenharia Química. Rio de Janeiro/RJ, 2021.

SILVA, G. C. R. *et al.* Development and Simulation of a New Oil Extraction Process from Fruit of Macaúba Palm Tree, **Journal of Food Process Engineering**, Vol. 36, p. 134-145, 2013.

SILVA, G. C.; *et al.* Óleo de amêndoa de macaúba tem potencial como ingrediente lipídico em margarina e maionese. **Agrarian**, [S. l.], v. 13, n. 47, p. 122–129, 2020. DOI: 10.30612/agrarian.v13i47.8909. Disponível em: <https://ojs.ufgd.edu.br/index.php/agrarian/article/view/8909>.

SILVA, G. N. *et al.* **Drying of macaw palm fruits and its influence on oil quality**. Seminário: Ciências Agrárias, Londrina, v. 38, n. 5, p. 3019-3030, set./out. 2017.

SILVA, K. A. **Estudo da cinética de secagem da amêndoa da macaúba (*Acrocomia Aculeata*)**. Trabalho de conclusão de curso (graduação) – Universidade Federal do Maranhão. São Luís/MA, 2018.

SILVA, T. C. Cruzamentos dirigidos e caracterização de híbridos e F1 de plantas de macaúbas. Tese (doutorado) – Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG, 2019. 88f.

SILVEIRA, A. L. M. **Aproveitamento da torta residual proveniente da extração do óleo da amêndoa (*acrocomia aculeata*) para produção de farinha destinada à alimentação humana**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Belo Horizonte/MG, 2014.

SOUSA, L. V. M. **Caracterização energética da macaúba**. Trabalho de conclusão de curso (graduação) – Universidade de Brasília – UnB Faculdade UnB Gama. Brasília, DF, 2020.

SOUZA, J. N. **Ecofisiologia de bancos de sementes de macaúba**. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais – Programa de pós-graduação em produção vegetal. Belo Horizonte/MG, 2021.

SOUZA, P. P. **Desenvolvimento de tecnologia de avaliação de vigor e para o armazenamento de sementes de macaúba (*Acrocomia Aculeata* (Jacq.) Lodd. Ex. Mart)**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Viçosa. Viçosa/MG, 2013.

SUTILLE, C. *et al.* **Extração de óleos vegetais a frio e a quente**. V Simpósio de Alimentos. Passo Fundo/RS, 2007.

TEÓFILO, C. R. **Pirólise de torta de macaúba: influência dos parâmetros experimentais e caracterização dos produtos**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras – Programa de Pós-graduação em Agroquímica. Lavras/MG, 2019.

TOLEDO, D. de P. **Análise técnica, econômica e ambiental de macaúba e de pinhão-manso como alternativas de agregação de renda na cadeia produtiva de biodiesel**. 2010. 105 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

TRAESEL, G. K. *et al.* Assessment of the cytotoxic, genotoxic, and mutagenic potential of *Acrocomia aculeata* in rats. **Genetics and Molecular Research**, v. 14, n. 1, p. 585-596, 2015.

VALÉRIO, P. P. *et al.* Perspectivas para um novo produto alimentício a base de óleo extraído do fruto da macaúba (*Acromia Aculeata* (Jacq.) Lodd. Ex Mart). **XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química**. Florianópolis/SC, 2014.

VELÁSQUEZ ARREDONDO, H. I. *et al.* Exergy efficiency analysis of chemical and biochemical stages involved in liquid biofuels production processes. **Energy**, Oxford, v. 41, n. 1, p. 138-145, 2012. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.06.0253> >.

VEREDIANO, F. C. **Aproveitamento da torta residual da extração do óleo da polpa de macaúba para fins alimentícios**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Belo Horizonte/MG, 2012.

VILAS BOAS, M. A. *et al.* Efeito da temperatura de carbonização e dos resíduos de macaúba na produção de carvão vegetal. **Rev. Scientia Florestalis**. 38, 481-490, 2010.

XAVIER, E. V. A.; COSTA, A. A. Aplicações da macaúba: um estudo prospectivo. **Cadernos de prospecção** – Salvador, v.13, n.4, p. 1147-1163, setembro, 2020.

ZANATTA, S. **Caracterização da macaúba (casca, polpa e amêndoa) e análise sensorial através da Educação do Gosto**. Dissertação (mestrado) – Universidade de São Paulo, Centro de Energia Nuclear na Agricultura. Piracicaba/SP, 2015.

ZEFERINO, M; RAMOS, S. de F. Mercado Mundial de Óleos Vegetais: panorama e perspectivas. **Análises e Indicadores do Agronegócio**, São Paulo, v. 18, n. 5, p. 1-8, maio 2023.

Disponível em: <