



MARIA LUIZA CARNEIRO MILHOMEM

**AVALIAÇÃO BIOENERGÉTICA DA BLEND A (ESCAMAS DE
PEIXES E CASCAS DE COCO BABAÇU) E POSTERIOR
UTILIZAÇÃO EM SISTEMAS DE CONVERSÃO TÉRMICA**

São Luís
2025

MARIA LUIZA CARNEIRO MILHOMEM

**AVALIAÇÃO BIOENERGÉTICA DA BLEND (ESCAMAS DE
PEIXES E CASCAS DE COCO BABAÇU) E POSTERIOR
UTILIZAÇÃO EM SISTEMAS DE CONVERSÃO TÉRMICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Colegiado de Curso da Engenharia Química
do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da
Universidade Federal do Maranhão, como parte
dos requisitos para obtenção do diploma de
Graduação em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Glauber Cruz

São Luís
2025

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Milhomem, Maria Luiza Carneiro.

Avaliação Bioenergética da Blenda Escamas de Peixes e Cascas de Coco Babaçu e Posterior Utilização em Sistemas de Conversão Térmica / Maria Luiza Carneiro Milhomem. - 2025.

66 f.

Orientador(a): Glauber Cruz.

Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal do Maranhão, São Luís - Ma, 2025.

1. Biocombustível. 2. Energias Renováveis. 3. Aproveitamento Sustentável. 4. Impactos Socioambientais.
I. Cruz, Glauber. II. Título.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. GLAUBER CRUZ
Orientador – CCEM/CCET/UFMA

Prof. Dr. Elmo de Sena Ferreira Júnior
DEEQ/UFMA

Prof. Me. Arthur Vinicius Sousa Silva
FEM/UNICAMP

20 de fevereiro de 2025

DADOS CURRICULARES**Maria Luiza Carneiro Milhomem**

NASCIMENTO	24/10/2001 – SÃO LUIS / MA
FILIAÇÃO	Domingo Lima Milhomem Denise Gomes Carneiro
2020/2024	Curso de Graduação Engenharia Química - Universidade Federal do Maranhão

Dedico este trabalho aos meus pais, Domingos e Denise, que sempre me ensinaram a importância do estudo e por estarem presentes em todas as minhas conquistas, me motivando e me amando incondicionalmente.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à Davi, meu namorado, por sempre estar presente em todos os meus passos nesta caminhada, sempre sendo meu ombro amigo, meu conselheiro e a maior inspiração que possuo ao longo dessa jornada. Obrigada por me acalmar nos momentos em que tudo se tornou difícil e por sempre acreditar no meu potencial, me fazendo ter coragem o suficiente para seguir meus maiores sonhos e estar ao meu lado na conquista deles.

À minha companheira de faculdade, Thaís. Sou grata pela sua amizade desde o primeiro dia que nos conhecemos, você tornou a caminhada mais leve e divertida, sempre sendo luz e tornando tudo mais leve.

Agradeço à minha família por todo o suporte e por nunca ter deixado de acreditar, em especial à minha avó, Maria da Graça, que sempre esteve presente em todos os momentos e nunca deixou de acreditar em mim.

Agradeço ao corpo docente dos cursos de Engenharia Química e Mecânica pelos ensinamentos. Principalmente ao Prof. Dr. Glauber Cruz, que sua orientação me fez acreditar na minha competência, sempre trazendo conselhos que me levaram até a pós-graduação, que foi conquistada em especial por conta dos trabalhos e pesquisas que viemos desenvolvendo durante estes dois anos.

Dedico este reconhecimento aos meus colegas do grupo de pesquisa LPSisTer, que sempre estiveram presentes e compartilharam experiências e conhecimentos comigo. Em especial, Isabel e Maurício, que iniciaram suas pesquisas em simultâneo à minha.

Por fim, agradeço ao apoio do CNPq, FAPEMA e UFMA pelo suporte financeiro, essencial para a concretização desta monografia.

MILHOMEM, Maria Luiza Carneiro. **Avaliação Bioenergética da Blenda (Escamas de Peixes e Cascas de Coco Babaçu) e Posterior Utilização em Sistemas de Conversão Térmica**. 2025. 66 p. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Química do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2025.

RESUMO

As Matas de Cocais abrangem extensas áreas no Nordeste, Norte e Centro-Oeste do Brasil, especialmente, nos Estados do Maranhão e Piauí. Destacando-se pelas palmeiras, com ênfase no babaçu (*Orbignya phalerata*), cuja frutificação perene apresenta significativa relevância ecológica, política e social, notadamente no Maranhão. A palmeira do babaçu produz uma quantidade abrangente de resíduos (cascas), apresentando potencial bioenergético e densidade energética elevados. Paralelamente, o comércio de pescados no litoral brasileiro é uma fonte vital de renda e proteína animal para grande parte da população. O consumo de peixes é uma das principais atividades extrativas e de forte movimentação econômica. Contudo, a produção de pescados expõe um outro problema socioambiental enfrentado pelas cidades litorâneas, ou seja, a geração desordenada de resíduos em locais indevidos. Este estudo investiga a aplicabilidade em sistemas térmicos das amostras puras de escamas de peixes e cascas de coco babaçu, bem como as combinações nas proporções destes, 90%CCB:10%EP; 80%CCB:20%EP; 70%CCB:30%EP; 60%CCB:40%EP e 50%CCB:50%EP. As propriedades físico-químicas e morfoestruturais das diferentes amostras (puras e misturas) foram avaliadas por análises elementar (AE), imediata (AI) e calorimétrica (PCS/PCI/PCU), microscopia eletrônica de varredura (MEV), difração de raios-X (DRX), infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), espectroscopia de energia dispersiva (EED) e comportamento térmico (TG/DTG/DSC). A análise imediata (AI) revelou altos teores de materiais voláteis para as amostras de 100%EP (72,26%) e 60%CCB:40%EP (72,07%), favoráveis à produção de bio-óleo devido à alta reatividade e volatilidade em processos de gaseificação e/ou pirólise. Ademais, destacou-se um elevado PCS para as amostras com maiores proporções de coco babaçu: 100% (17,26 MJ kg⁻¹) e 90% (16,75 MJ kg⁻¹). As imagens MEV identificaram poros superficiais homogêneos nas amostras de 100%CCB. O DRX indicou que as blendas e amostras puras apresentaram baixos índices de cristalinidade, variando entre 17,5% e 28,4%, evidenciando uma característica altamente amorfa. Os espectros de FTIR evidenciaram os principais grupos funcionais (NH, OH e C=O) e estruturas vibracionais (amidas do tipo I e II)

na composição das blendas e amostras puras. As análises AE e EED confirmaram a presença dos elementos abundantes nas biomassas (C, H e O). Finalmente, as curvas TG/DTG/DSC mostraram as várias etapas de degradação térmica dos principais constituintes das biomassas, ou seja, holocelulose e lignina nas cascas de coco babaçu e proteínas minerais (colágeno e hidroxiapatita) e lipídios nas escamas de peixes. Portanto, as cascas de coco babaçu e as escamas de peixes apresentaram alto potencial energético e baixa tendência à formação de poluentes, viabilizando o uso destes como combustíveis verdes.

Palavras-chave: biocombustível, energias renováveis, aproveitamento sustentável, impactos socioambientais.

MILHOMEM, Maria Luiza Carneiro. **Bioenergetic Assessment of the Blend (Fish Scales and Babassu Coconut Shells) and Subsequent Utilization in Thermal Conversion Systems.** 2025. 66 p. Graduate Work (Graduate in Chemical Engineering) – Course of Engineering from Center of Exact Sciences and Technology at Federal University of Maranhão, São Luís, 2025.

ABSTRACT

The “Matas de Cocais” cover extensive areas in the Northeast, North, and Center-West regions of Brazil, especially in the Maranhão and Piauí States. They are notable for their palm trees, particularly the babassu (*Orbignya phalerata*), whose perennial fruiting has significant ecological, political, and social importance, especially in Maranhão. The babassu palm produces a substantial amount of waste (shells), exhibiting high bioenergetic potential and energy density. Concurrently, the fishing industry along the Brazilian coast is a vital source of income and animal protein for a large portion of the population. Fish consumption is one of the main extractive activities with significant economic movement. However, fish production presents another socio-environmental problem faced by coastal cities, namely, the uncontrolled generation of waste in inappropriate locations. This study investigates the applicability of pure samples of fish scales (FS) and babassu coconut shells (BCS), as well as the proportions of these: 90%BCS:10%FS; 80%BCS:20%FS; 70%BCS:30%FS; 60%BCS:40%FS, and 50%BCS:50%FS. The physicochemical and morphostructural properties of the different samples (pure and mixtures) were evaluated by ultimate (UA), proximate (PA) and calorimetric (HHV) analyses, scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction (XRD), Fourier transform infrared (FTIR), energy dispersive spectroscopy (EDS), and thermal behavior (TG/DTG/DSC). Proximate analysis revealed a high volatile matter content (72.26% and 72.07%) in the 100%FS and 60%BCS:40%FS samples, favorable for bio-oil production, due to the high reactivity and volatility under in gasification and/or pyrolysis processes. Additionally, a Higher Heating Value (17.26 to 16.75 MJ kg⁻¹) was noted for samples with higher proportions of babassu coconut shells (100% and 90%). SEM images identified homogeneous surface pores in the 100%BCS samples. XRD indicated that the blends and pure samples exhibited low crystallinity indices, ranging from 17.5% to 28.4%, evidencing a highly amorphous characteristic. FTIR spectra revealed the main functional groups (NH, OH, and C=O) and vibrational structures (type I and II amides) in the composition of the blends and pure samples. UA and EDS analyses confirmed the presence of abundant elements in the biomass (C, H, and O). Finally, TG/DTG/DSC curves

showed the several thermal degradation stages of the main constituents of the biomasses, namely cellulose and lignin in babassu coconut shells, and mineral proteins and lipids in fish scales. Therefore, babassu coconut shells and fish scales exhibit high energy potential and a low tendency for pollutant formation, making them viable as green fuels.

Keywords: biofuel, renewable energy, sustainable use, socio-environmental impacts.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Principais rotas de biomassa baseada no tipo de agente gaseificante.....	10
Figura 2 – Curva de crescimento da produção de pescados no Maranhão entre 2013 e 2020.....	12
Figura 3 – Mapa de incidência de babaçu no Maranhão.....	12
Figura 4 – Produção de amêndoas de babaçu no Brasil, Maranhão e Médio Mearim.....	13
Figura 5 – Principais componentes do coco babaçu (<i>Orbignya phalerata</i>).....	13
Figura 6 – Etapas de coleta e preparação das amostras de coco babaçu e escamas de peixes.....	15
Figura 7 – Etapa do processo de secagem das cascas de coco babaçu (100%%CCB) na estufa à 60 °C por 48 horas.....	16
Figura 8 – Amostras de escamas de peixes (100% EP) após os processos de: a) secagem; b) moagem e c) preparação de amostras em blendas.....	17
Figura 9 – Fluxograma de análises e métodos realizados na investigação das amostras estudadas.....	17
Figura 10 – Micrográficos de MEV para as amostras puras de cascas de coco babaçu <i>in natura</i> com magnitudes de: a) 150 e b) 250 vezes.....	28
Figura 11 – Micrografias de MEV para as amostras de escamas de peixes <i>in natura</i> (100%EP), com magnitudes: a) 150 e b) 250 vezes.....	29
Figura 12 – Micrografias de MEV para as misturas de cascas de coco babaçu e escamas de peixes com magnitudes de 250x: a) 50%CCB:50%%EP, b) 60%CCB:40%EP, c) 70%CCB:30%EP, d) 80%CCB:20%EP e e) 90%CCB:10%EP.....	30
Figura 13 – Difrátogramas de raios-X das amostras de escamas de peixes, cascas de coco babaçu e as respectivas blendas.....	32
Figura 14 - Espectrômetro de infravermelho por transformada de Fourier para as amostras puras (100%CCB e 100%EP) e as blendas destes nas proporções estudadas.....	33
Figura 15 – Principais componentes presentes nas amostras de cascas de coco babaçu e escamas de peixes <i>in natura</i> e nas respectivas misturas obtidos por EED em termos percentuais.....	35
Figura 16 – Curvas TG/DTG para as amostras de cascas de coco babaçu e escamas de peixes, bem como as misturas, em atmosfera inerte (argônio 5.0): a) 100%CCB; b) 90%CCB:10%EP; c) 80%CCB:20%EP; d) 70%CCB:30%EP; e) 60%CCB:40%EP; f) 50%CCB:50%EP; e g) 100%EP.....	37
Figura 17 – Curvas DSC em atmosfera inerte (argônio 5.0) para as amostras de cascas de coco babaçu, escamas de peixes e as respectivas blends.....	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Análise elementar das amostras puras de cascas de coco babaçu e escamas de peixes, assim como as respectivas blendas.....	23
Tabela 2 – Composição imediata das amostras de cascas de coco babaçu, escamas de peixes e as respectivas <i>blends</i>	25
Tabela 3 – Análise calorimétrica (PCS, PCI e PCU) para as biomassas puras e respectivas blendas.....	27
Tabela 4 – Principais grupos funcionais das amostras de cascas de coco babaçu, escamas de peixes e as respectivas blendas.....	34
Tabela 5 - Principais elementos metálicos e/ou inorgânicos presentes nas amostras avaliadas por EED.....	36

SUMÁRIO

	FOLHA DE APROVAÇÃO.....	iii
	DADOS CURRICULARES.....	iv
	DEDICATÓRIA.....	v
	AGRADECIMENTOS.....	vi
	RESUMO.....	vii
	ABSTRACT.....	ix
	LISTA DE FIGURAS.....	xi
	LISTA DE TABELAS.....	xii
	SUMÁRIO.....	xii
1	INTRODUÇÃO.....	01
2	JUSTIFICATIVA.....	05
3	OBJETIVOS.....	06
2.1	OBJETIVOS GERAIS.....	06
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	06
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	07
4.1	BIOCOMBUSTÍVEIS SÓLIDOS E BIOMASSA.....	07
4.2	RESÍDUOS SÓLIDOS.....	08
4.3	SISTEMAS TÉRMICOS: COMBUSTÃO, PIRÓLISE E GASEIFICAÇÃO.....	09
4.4	RESÍDUOS PESQUEIROS.....	11
4.5	COCO BABAÇU.....	12
5	MATERIAL E MÉTODOS.....	15
5.1	ORIGEM E PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	15
5.2	ANÁLISE ELEMENTAR.....	18
5.3	ANÁLISE IMEDIATA.....	18
5.3.1	Umidade.....	19
5.3.2	Materiais Voláteis.....	19
5.3.3	Cinzas.....	19
5.3.4	Carbono Fixo.....	20
5.4	ANÁLISE CALORIMÉTRICA (AC).....	20
5.5	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)	20
5.6	DIFRAÇÃO DE RAIOS-X.....	21

5.7	ESPECTROSCOPIA DE INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR).....	21
5.8	ESPECTROSCOPIA DE ENERGIA DISPERSIVA (EED)	22
5.9	ANÁLISES TÉRMICAS	22
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	23
6.1	ANÁLISE ELEMENTAR (AE), IMEDIATA (AI) E CALORIMÉTRICA (AC).....	23
6.2	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA.....	28
6.3	DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX)	31
6.4	ESPECTROSCOPIA DE INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR).....	33
6.5	ESPECTROSCOPIA DE ENERGIA DISPERSIVA (EED).....	34
6.6	ANÁLISE TÉRMICA (CURVAS TG/DTG E DSC).....	37
7	CONCLUSÃO.....	42
8	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	43
	REFERÊNCIAS.....	44

1 INTRODUÇÃO

O aquecimento global causado pela emissão de gases poluentes e a busca por combustíveis de fontes renováveis tem sido pauta de discussão no Brasil e no Mundo, cuja sustentabilidade global e a adoção de uma nova perspectiva no que diz respeito ao fornecimento e uso de energia são necessários para que se diminua o impacto ambiental negativo (Carvalho, 2022). Sociedades mais avançadas previam a necessidade de incorporar o processo “reciclar, reaproveitar e reusar”, a fim de reduzir o desperdício e aproveitar os resíduos urbanos (Carvalho, 2022).

Os biocombustíveis são combustíveis derivados de biomassa, ou seja, matéria orgânica de origem vegetal ou animal que pode ser utilizada para produzir energia e podem substituir, de forma parcial ou total, combustíveis derivados de petróleo e gás natural em motores a combustão ou em outro tipo de geração de energia térmica e elétrica (Marin *et al.*, 2021). Embora, inicialmente, os biocombustíveis tenham sido propostos como uma alternativa para garantir a segurança energética frente à escassez do petróleo, hoje são considerados como uma opção para combater as mudanças climáticas (Marin *et al.*, 2021).

O Brasil, como maior país tropical do mundo, dispõe de condições climáticas favoráveis para a produção de biomassa devido à intensa radiação solar ao longo do ano e à representatividade da agroindústria deste, especialmente na produção de grãos e proteína animal. Este cenário favorece o aproveitamento de resíduos agroindustriais para o desenvolvimento de tecnologias limpas e renováveis (Nogueira, 2019). Compreende-se, portanto, que o país seja um dos maiores líderes no uso da bioenergia moderna.

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), no Brasil, a biomassa representou 25,0% do consumo no setor residencial em 2023. Para os setores mais relevantes na demanda energética, em dados de 2019, a bioenergia também foi significativa, correspondendo a 39,9% do consumo energético nas indústrias, 25,1% no setor de transporte e 28,1% nas residências (EPE, 2021). O uso extensivo da bioenergia, juntamente com outras fontes renováveis, posiciona a matriz energética brasileira entre as mais sustentáveis do Mundo (Nogueira, 2019).

Paralelo a esta temática, o consumo populacional de resíduos sólidos aumentou em progressão geométrica, onde a quantidade de resíduos depositados em lixões a céu aberto causa prejuízo à qualidade do meio ambiente, solo e da saúde humana (Araújo *et al.*, 2021). O descarte incorreto dos resíduos sólidos é um grande problema, visto que se torna prejudicial à saúde humana e proporciona a contaminação do meio ambiente. A quantidade de resíduos sólidos urbanos destinados inadequadamente no Brasil cresceu 16,0% na última década, cujo montante

passou de 25,3 milhões de toneladas por ano em 2010 para 29,4 milhões de toneladas por ano em 2019 (Araújo *et al.*, 2021).

Muitas cidades litorâneas do Brasil, que produzem uma grande variedade e quantidade de pescados, geram, em concomitância, uma grande quantidade de resíduos, como vísceras, nadadeiras e escamas de peixe. Essas cidades enfrentam um sério problema ambiental relacionado ao descarte desses resíduos, provenientes das peixarias que comercializam os produtos. Em alguns casos, esses resíduos são descartados de maneira desordenada ou inadequada, muitas vezes em locais isolados ou impróprios (Silva *et al.*, 2019).

No Estado do Maranhão, a produção de pescados é uma das mais importantes atividades econômicas, tanto pela quantidade quanto pela diversidade de espécies, por exemplo pescada-amarela (*Cynoscion acoupa*), pescada-branca (*Plagioscion squamosissimus*) e tambaqui (*Colossoma macropomum*) (Silva, 2019). A produção de pescados no Estado do Maranhão dobrou entre 2016 e 2021, passando de 24 mil para 48 mil toneladas, trazendo destaque para o Estado, que ocupou o 5º lugar no *ranking* nacional de produção de pescados, além de alcançar o 3º maior produtor de peixes nativos no Brasil em 2022 (Peixe BR, 2021).

Durante o processamento de pescados, entre 20,0% e 80,0% do material é descartado, dependendo do nível de processamento, sendo 2,0 a 4,0% constituídos por escamas, que contêm compostos importantes como queratina, colágeno e carbonato de cálcio, com aplicações industriais em setores como têxteis, cosméticos e detergentes (Ghaly *et al.*, 2013). Apesar disso, cerca de 50,0% da matéria-prima inicial é descartada de forma desordenada, resultando em aproximadamente 120 milhões de toneladas anuais de resíduos, que frequentemente são lançados no meio ambiente sem nenhum tratamento adequado (Silva *et al.*, 2019).

Em concomitância, o coco babaçu (*Orbignya phalerata*) ocorre nas regiões do norte, centro e meio-norte do Maranhão e é uma palmeira típica das zonas de transição entre as florestas úmidas da Bacia Amazônica e os ambientes de Cerrado e Caatinga (IPHAN, 2017). Característicos de florestas secundárias que surgem naturalmente após a degradação ou desmatamento das originais, os babaçuais recobrem, em diferentes Estados brasileiros, uma área que, somada, corresponde a 195 mil km², onde os Estados do Maranhão e Piauí apresentam a maior concentração de palmeiras desse gênero (IPHAN, 2017).

No Maranhão, onde as palmeiras ocupam mais de 10,3 milhões de hectares em regiões como Mata de Cocais e Baixada Maranhense, a coleta dos frutos ocorre entre os meses de julho e dezembro, com pico de safra nos meses de setembro a novembro (Costa, 2015). O principal produto comercial extraído do coco babaçu é o óleo proveniente da amêndoa, que corresponde a 6,0 a 7,0% do peso total do fruto e é utilizado principalmente em iguarias tradicionais e/ou

sofisticadas da culinária maranhense, cosméticos e na produção de biocombustíveis (Oliveira *et al.*, 2013).

No âmbito estrutural, o fruto do babaçu é composto por quatro partes distintas: epicarpo, endocarpo, amêndoas e mesocarpo, todas com aplicabilidade significativa. O epicarpo, representando 12,0% do fruto, é a camada externa, caracterizada por uma estrutura fibrosa e uma tonalidade amarelo-avermelhada. Logo abaixo, encontra-se o mesocarpo, que constitui 23,0% do fruto, apresentando uma textura farinhosa e uma riqueza em amido. A coloração deste varia de branco-amarelada de acordo com o grau de maturação, e possui uma espessura de até 1,0 cm (Silva *et al.*, 2019). O endocarpo, responsável por proteger as amêndoas, representa 58,0% do fruto e é vital na produção de um carvão vegetal de alta qualidade. A coloração desta parte geralmente é marrom. No centro do fruto, encontram-se as sementes, das quais três a quatro amêndoas estão presentes em cada fruto (Silva *et al.*, 2019).

A cada tonelada de coco babaçu, são gerados 930 kg de resíduos. Esses resíduos são predominantemente materiais lignocelulósicos, ou seja, biomassa composta por lignina, celulose e hemicelulose, principais componentes estruturais das plantas. Apesar da grande disponibilidade desse tipo de resíduo, a maior parte é descartada de forma inadequada no ambiente, causando impactos negativos, como assoreamento de corpos d'água, emissão de gases de efeito estufa devido à decomposição descontrolada e proliferação de vetores de doenças, comprometendo a qualidade ambiental e a saúde pública (Dias *et al.*, 2012).

Em concomitância, os processos termoquímicos são métodos de conversão de biomassa em energia por meio do calor (Ardila, 2015). A combustão ocorre na presença de oxigênio, gerando calor diretamente, podendo ser utilizada para produção de energia térmica. Já a pirólise é realizada na ausência de oxigênio, convertendo a biomassa em bio-óleo, carvão e gases combustíveis, onde estes são usados para diversas finalidades, como a geração de energia. A gaseificação, por sua vez, transforma a biomassa em um gás sintético rico em hidrogênio e monóxido de carbono, sendo aproveitado para gerar eletricidade ou ser empregado como insumo para a produção de combustíveis. Estes processos são essenciais para o aproveitamento sustentável de resíduos orgânicos, transformando-os em fontes de energia limpa e renovável (Ardila, 2015).

Neste sentido, o presente estudo objetiva a possibilidade de inovação por meio do aproveitamento das cascas de coco babaçu (provenientes do município de Formosa da Serra Negra - MA) e escamas de peixes (coletadas em uma feira livre local), assim como das misturas (blendas) desses materiais, para a geração de energia térmica por meio desses processos termoquímicos. Esse estudo contribui para o meio científico ao propor soluções energéticas

mais sustentáveis. Além disso, é o primeiro trabalho a explorar essa combinação específica de materiais, não havendo, até o momento, registros na literatura que investiguem essas misturas nem as proporções utilizadas para tais aplicações.

2 JUSTIFICATIVA

O presente estudo destaca-se pela relevância de impulsionar o desenvolvimento tecnológico na geração de energia limpa, utilizando biomassa inovadora derivada de cascas de coco babaçu e resíduos pesqueiros, com foco no Estado do Maranhão. Trata-se de uma alternativa viável para mitigar e erradicar a poluição causada por fontes de energia não renováveis, oferecendo soluções que integram benefícios socioambientais, científicos, tecnológicos e sanitários. Além de propor um destino adequado para esses resíduos, a pesquisa representa uma abordagem promissora no campo da bioenergia, atendendo às crescentes demandas de uma sociedade moderna e sustentável.

Do ponto de vista acadêmico, a pesquisa promoveu a inserção de estudantes no campo científico, especialmente, na área de sistemas energéticos, e contribuiu para o avanço técnico-científico no Maranhão, colocando o Estado em destaque na produção de energia limpa a partir de fontes renováveis genuinamente locais. No aspecto socioeconômico, os resíduos de biomassa apresentam vantagens significativas, como a abundância de recursos naturais e a presença de uma agroindústria sólida, com potencial para expandir o mercado de bioenergia e exportar excedentes energéticos para países com déficit energético.

Além de proporcionar o desenvolvimento de regiões economicamente desfavorecidas por meio da geração de empregos e incremento da receita local, o estudo agrega novas perspectivas tecnológicas ao setor de bioenergia, contribuindo para a diversificação das matrizes energéticas e a redução do impacto socioambiental causado pelo descarte inadequado desses resíduos. Portanto, o presente estudo é consolidado como um importante marco no avanço sustentável e na inovação tecnológica no setor energético, com benefícios que transcendem o âmbito regional e alcançam projeção internacional.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Investigar o potencial bioenergético das cascas de coco babaçu (100%CCB) e escamas de peixes (100%EP), bem como as misturas destes nas proporções: 90%CCB:10%EP; 80%CCB:20%EP; 70%CCB:30%EP; 60%CCB:40%EP e 50%CCB:50%EP, para a redução da poluição e desperdício na região.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1) Analisar a composição elementar (carbono, hidrogênio, nitrogênio, oxigênio e enxofre) e análise imediata (umidade, materiais voláteis, carbono fixo e cinzas);
- 2) Avaliar as propriedades morfológicas e estruturais dos resíduos estudados, utilizando microscopia eletrônica de varredura (MEV), espectroscopia de energia dispersiva (EED) e difração de raios-X (DRX);
- 3) Determinar os poderes caloríficos superior (PCS), inferior (PCI) e útil (PCU);
- 4) Identificar os grupos funcionais presentes nas amostras por meio de espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR);
- 5) Caracterizar termicamente (curvas TG/DTG e DSC) as amostras puras e várias misturas em atmosfera inerte (argônio 5.0).

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 BIOCOMBUSTÍVEIS SÓLIDOS E BIOMASSA

A predominância de matérias-primas não renováveis no setor energético tem causado impactos socioambientais significativos. Em contrapartida, o uso de insumos renováveis, como resíduos agroindustriais, surge como uma alternativa sustentável (Milanez *et al.*, 2018). O crescente uso de energia renovável no Brasil origina-se principalmente por meio das usinas hidrelétricas, que atendem 66,6% da produção do país (Branco, 2013).

Contudo, apesar da alta eficiência na geração de energia, a construção deste tipo de usina ocasiona diversos impactos ambientais negativos, como a destruição de ecossistemas aquáticos e terrestres, com a submersão de vastas áreas de florestas e habitats naturais, além da alteração dos cursos de água e da qualidade hídrica, que afeta a fauna aquática e a disponibilidade de água para consumo. Além disso, o represamento pode levar à emissão de gases de efeito estufa, como o metano, devido à decomposição de matéria orgânica submersa, e causar o deslocamento de populações locais, gerando impactos sociais significativos. Portanto, os biocombustíveis para a geração de bioenergia emergem como uma alternativa viável, com potencial de aplicação em diversos setores, uma vez que são caracterizados como fontes de energia originadas de biomassa, seja na forma sólida, líquida ou gasosa, para diferentes finalidades (Lourenço, 2020).

O termo biocombustível se refere a diversos materiais de origem biológica com possibilidade de uso como fonte de energia, uma vez que é considerado limpo e a emissão de gás carbônico (CO₂) durante o processo de produção causa menos poluição do que a proveniente do diesel e da gasolina, contribuindo para diminuir os impactos causados pelo efeito estufa no planeta (Branco, 2013).

A biomassa vegetal ou animal, que pode ser empregada na geração de energia. Esta surge como alternativa devido à necessidade de se obter novas ideias para a criação de fontes alternativas de calor que minimizem as agressões ao meio ambiente e que possua uma grande diversidade de materiais e opções que possam ser empregados (Pereira *et al.*, 2018).

Desta forma, a biomassa pode ser classificada de acordo com a origem da mesma, podendo ser florestal, agrícola, resíduos urbanos e industriais, apresentando diversas vantagens para o setor energético brasileiro, sendo a principal diminuir os impactos ambientais causados pelo descarte incorreto destes (Bento, 2018). Sendo assim, o aproveitamento, sobretudo, dos resíduos gerados pelas atividades doméstica e comercial pode contribuir para a descentralização

da geração, uma vez que, diferente de outras fontes de energia, pode ser utilizada a qualquer hora devido ao grande volume descartado (Bento, 2018).

Atualmente, no Brasil, a biomassa representa cerca de 8,5% dentro da matriz energética, uma vez que o país possui cerca de 630 usinas que utilizam biomassa (Menoncin, 2023). Em compensação, a biomassa pode ser obtida através de diversos setores, onde geralmente está associada a um resíduo e é positiva no meio ambiente, uma vez que pode ser reduzida, reciclada, reutilizada e aproveitada para produzir energia (Lopes *et al.*, 2018). Isto a torna uma alternativa que ajuda a reduzir a necessidade de outras fontes, especialmente, as não renováveis (Lopes *et al.*, 2018).

4.2 RESÍDUOS SÓLIDOS

Resíduos sólidos são todo e qualquer rejeito em que foram esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, sendo o aterro sanitário a única tecnologia permitida para esta finalidade (Pereira, 2013). Desta forma, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) estabelece o uso de tecnologias para a destinação final ambientalmente adequada dos resíduos, sendo as principais a reutilização, reciclagem, compostagem, recuperação e o aproveitamento energético ou outras destinações admitidas pelos órgãos competentes (Pereira, 2013).

Apesar das diretrizes, no Brasil, toneladas de resíduos orgânicos são dispostos diariamente de maneira inadequada, fruto do desconhecimento sobre o potencial econômico, ambiental e social (ESA, 2014). Tecnologias como a compostagem e biodigestão (com ou sem conversão energética) são recomendadas mundialmente para a reciclagem de resíduos orgânicos (ESA, 2014).

A urbanização, o crescimento econômico e aumento populacional têm contribuído para a geração de resíduos urbanos, cuja gestão inadequada se tornou um desafio global. Projeções indicam que, até 2050, a produção mundial de lixo pode alcançar 3,4 bilhões de toneladas anuais (Aguilar, 2021). Análises gravimétricas revelaram que, mesmo em cidades industrializadas, a fração de materiais orgânicos nos resíduos urbanos brasileiros permanece alta, representando mais de 50,0% do total coletado (Nascimento *et al.*, 2019). Esta fração orgânica, composta majoritariamente por restos de alimentos e resíduos de jardim, reforça a necessidade de formas adequadas de aproveitamento, considerando os impactos negativos que a disposição inadequada destes pode causar, como contaminação de solos e águas subterrâneas, proliferação de vetores de doenças e emissão de metano, um gás que contribui fortemente para

o efeito estufa (Nascimento *et al.*, 2019).

No entanto, os resíduos sólidos urbanos podem ser reaproveitados de forma eficiente. A matéria orgânica presente nos aterros sanitários, ao sofrer degradação anaeróbica, gera biogás, que pode ser convertido em energia elétrica ou aproveitado em biodigestores (Aguiar, 2021). A transição de uma economia linear para uma circular, prezando pelo reaproveitamento e redução de desperdícios demonstra-se essencial para reduzir impactos ambientais e a criação de novas oportunidades econômicas (Mirandas *et al.*, 2018).

Desta forma, a produção de biocombustíveis se mostra uma maneira promissora, possuindo o atrativo de reaproveitamento de resíduos orgânicos, sólidos ou líquidos, podendo ser adotado como uma tecnologia sustentável. A aplicação efetiva reduz impactos ambientais e gera benefícios socioeconômicos, promovendo o desenvolvimento sustentável (Aguiar, 2021).

4.3 SISTEMAS TÉRMICOS: COMBUSTÃO, PIRÓLISE E GASEIFICAÇÃO

As tecnologias de conversão termoquímica (pirólise, gaseificação e combustão) são opções promissoras para a transformação de matérias-primas de biomassa em gases que, a partir de outros processos, podem gerar energia, biocombustíveis e produtos químicos (Ardila, 2015).

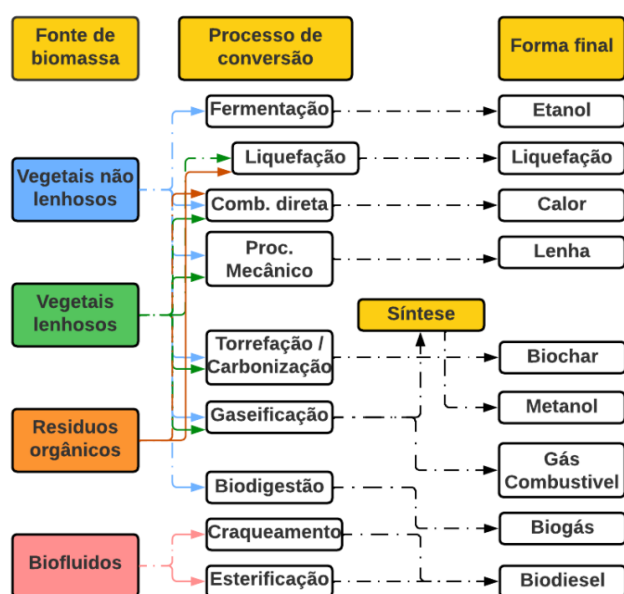
A distinção de gaseificação em relação a pirólise e combustão é definida pela quantidade de oxidante utilizada e os produtos de interesse gerados. A combustão é um processo termoquímico que ocorre quando a biomassa é queimada na presença de uma quantidade excessiva de oxigênio (O_2). Esse processo é utilizado principalmente para a geração de calor, sendo amplamente empregado em sistemas de aquecimento e geração de eletricidade. Durante a combustão, a biomassa reage com o oxigênio, gerando principalmente dióxido de carbono (CO_2) e vapor de água (H_2O) como produtos de reação. O calor liberado durante a combustão pode ser aproveitado diretamente, contudo, em alguns casos, a alta emissão de CO_2 apresenta-se um ponto negativo desse processo (Rey, 2018).

Em contrapartida, a pirólise é definida como um processo termoquímico realizado na ausência de oxigênio, onde a biomassa é aquecida a altas temperaturas e o objetivo principal é a produção de compostos sólidos (como o carvão vegetal) e gases, dependendo das condições operacionais. Este processo ocorre em temperaturas geralmente entre $300^{\circ}C$ e $900^{\circ}C$ e em um ambiente controlado para evitar a presença de oxigênio (Rey, 2018).

Já a gaseificação é um processo termoquímico que ocorre com quantidades limitadas de oxigênio ou vapor d'água em relação ao necessário para a combustão completa. O principal objetivo da gaseificação é a produção de gases combustíveis como hidrogênio (H_2), monóxido

de carbono (CO) e dióxido de carbono (CO₂), que podem ser usados como vetores energéticos (Ardila, 2015). Durante a gaseificação, a biomassa é aquecida a altas temperaturas, mas em condições controladas de oxigênio, o que evita a combustão completa e favorece a formação de um gás sintético (syngas), ou seja, gás gerado que pode ser utilizado em processos de geração de eletricidade ou até mesmo como matéria-prima para a produção de combustíveis sintéticos e produtos químicos (Ardila, 2015). A Figura 1 ilustra os principais tipos de agente gaseificante.

Figura 1 – Principais rotas de biomassa baseada no tipo de agente gaseificante.



Fonte: Adaptado de Rey (2018).

A gaseificação e pirólise se interligam, uma vez que a pirólise é responsável pela degradação da matéria orgânica presente na biomassa/resíduo, geralmente na forma de voláteis, sendo uma etapa presente em vários processos térmicos (Paula, 2024). No reator de gaseificação ocorrem, basicamente, quatro reações: (1) secagem; (2) pirólise; (3) combustão e (4) redução (Rey, 2018). No começo da pirólise, quando a biomassa atinge temperaturas de 230 e 350 °C, componentes termicamente instáveis, como a hemicelulose e celulose, são quebrados e evaporam com outros compostos voláteis (Ardila, 2015).

Uma das maiores desvantagens na utilização de bagaço de cana, palha, madeira ou outras biomassas lignocelulósicas é a presença de componentes não degradáveis como a lignina. O processo de gaseificação em biomassas celulósicas pode ser uma abordagem para superar este obstáculo e, assim, produzir gás de síntese (Sousa, 2019). O gás de síntese (*syngas*) é um elemento importante na produção de combustíveis e produtos químicos, visto que os processos catalíticos são usados para converter este gás em uma variedade de combustíveis e/ou produtos químicos, como metanol, metano, gasolina, entre outros (Sousa, 2019).

4.4 RESÍDUOS PESQUEIROS

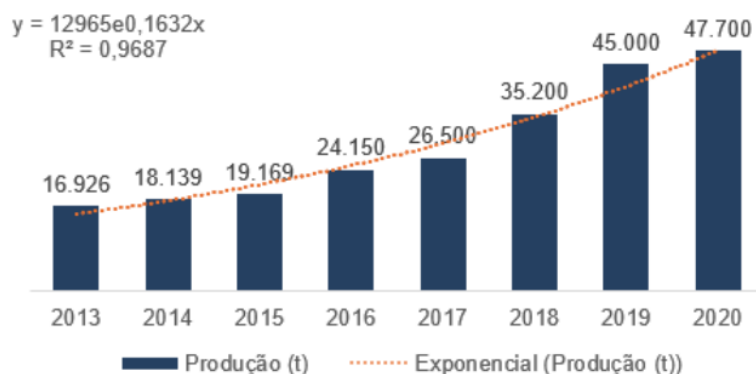
As atividades humanas, especialmente a pesca, destaca-se na produção de alimentos que geram volumes significativos de resíduos, uma vez que o produto desta se tornou relevante no setor alimentício devido às características nutricionais, como a disponibilidade de vitaminas, ácidos graxos e proteínas, sendo inserido na dieta de populações de diferentes culturas e países (Silva *et al.*, 2029). No entanto, o gerenciamento inadequado dos resíduos gerados ao longo da cadeia produtiva da pesca apresenta desafios significativos para a sustentabilidade ambiental.

No Brasil, a pesca é uma das atividades econômicas mais tradicionais, exercida por extrativistas autônomos, em regime de economia familiar ou individual, que atuam na proximidade da costa, dos lagos e rios (Embrapa, 2020). A balança comercial de pescado em 2022 teve um aumento de 22,0% no volume das exportações brasileiras quando comparado ao ano de 2021, sendo 61.955 toneladas de pescados no período (Seafood, 2023). Estes resíduos pesqueiros, ricos em matéria orgânica, frequentemente são descartados de forma inadequada, contribuindo para a poluição de solos, rios e do ar devido à fermentação e formação de chorume, além da proliferação de vetores contaminantes e do mau cheiro (Mendez, 2017).

Embora estes materiais sejam tratados como rejeitos, possuem um grande potencial de reaproveitamento, tanto para a produção de subprodutos industriais quanto para o enriquecimento de solos agrícolas (Mendez, 2017). A utilização destes resíduos na fabricação de produtos como colágeno, biofertilizantes e biocombustíveis é ecologicamente viável, contribuindo para a redução de impactos ambientais e a geração de novas fontes de renda (Souza, 2019).

O Estado do Maranhão destaca-se como um dos principais produtores de pescados do Brasil, produzindo 48 mil toneladas de pescado por ano, com um aumento de 6,0% na produção, evidenciado na Figura 2 (Peixe BR, 2022). Contudo, práticas inadequadas de processamento e descarte dos resíduos gerados, como a disposição em terrenos baldios e praias, violam legislações sanitárias e ambientais (Cestonaro, 2022). Com a expansão da aquicultura, o desafio de manejar os resíduos de forma sustentável se torna ainda mais evidente, dado que apenas cerca de um terço da matéria-prima é utilizada na comercialização de filés, enquanto o restante é descartado (Cestonaro, 2022).

Figura 2 – Curva de crescimento da produção de pescados no Maranhão entre 2013 e 2020.



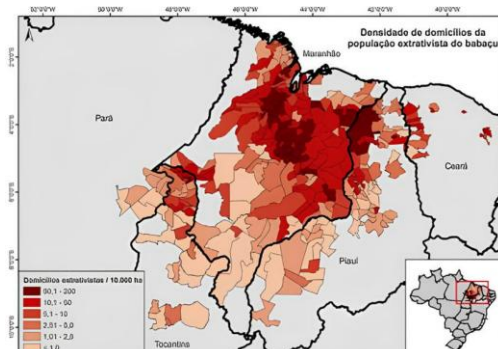
Fonte: Retirado de Souza *et al.* (2022).

O aproveitamento pleno desses materiais ainda é limitado por barreiras tecnológicas e de conhecimento sobre processos de manejo e transformação sanitariamente adequados (Daboor *et al.*, 2012). Nesse contexto, a implementação de planos de gerenciamento de resíduos torna-se indispensável para mitigar os problemas ambientais e de saúde pública associados ao descarte inadequado (Rodrigues *et al.*, 2013). Além disso, iniciativas voltadas ao reaproveitamento desses resíduos podem alavancar a economia local, especialmente em comunidades pesqueiras (Rodrigues *et al.*, 2013).

4.5 COCO BABAÇU

O coco babaçu, pertencente à espécie *Orbignya phalerata*, é uma palmeira nativa do Brasil, amplamente distribuída em regiões tropicais, com destaque para os Estados do Maranhão, Piauí e Tocantins, exposto da Figura 3, onde forma extensas áreas de ocorrência conhecidas como “babaçuais” (Santos, 2020). Na região conhecida como Mata dos Cacaís, que abrange uma transição entre os biomas da Amazônia, Cerrado e Caatinga, o babaçu ocupa cerca de 196 mil km², evidenciando a relevância ecológica e econômica deste (Santos, 2020).

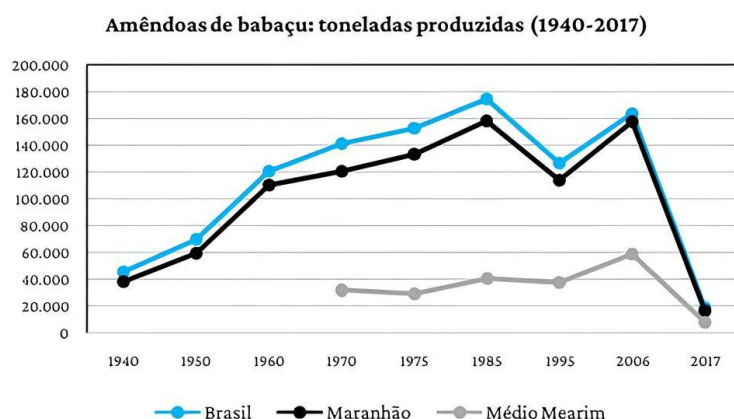
Figura 3 – Mapa de incidência de babaçu no Maranhão.



Fonte: Adaptado de Lima (2019).

Apesar da significativa presença, a produção de coco babaçu no Brasil tem enfrentado alguns desafios, como o desmatamento e perda de *habitat*, além da baixa valorização do produto (Lima, 2019). De acordo com Lima (2019), a produção de amêndoas nas mesorregiões Leste, Oeste e Sul do Maranhão apresentaram uma diminuição de 50,0%, indicando uma redução progressiva na produção de amêndoas desde o final da década de 1980, como apresentado na Figura 4.

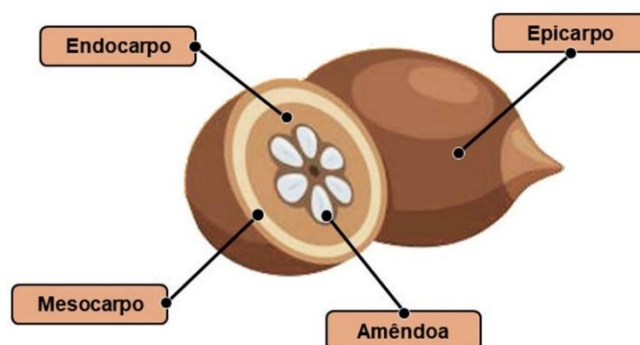
Figura 4 – Produção de amêndoas de babaçu no Brasil, Maranhão e Médio Mearim.



Fonte: Adaptado de Lima (2019).

Estas partes oferecem uma ampla gama de aplicações, desde a produção de carvão vegetal de alta qualidade até uso nos setores industriais e farmacêuticos (Costa, 2015). Enquanto o endocarpo representa 58,0% do fruto e é utilizado principalmente como fonte de energia, as amêndoas, que correspondem a apenas 7,0%, fornecem um óleo rico em ácidos graxos saturados, essencial para a indústria de cosméticos, farmacêutica e biocombustíveis (Costa, 2015). Adicionalmente, o mesocarpo, que constitui 23,0% do fruto, é subutilizado pela indústria, mas possui alto teor de amido, sendo empregado na produção de suplementos alimentares e biofilmes para aplicações farmacêuticas (Araruna *et al.*, 2021). A Figura 5 exhibe os componentes descritos.

Figura 5 – Principais componentes do coco babaçu (*Orbignya phalerata*).



Fonte: Retirado de Araruna *et al.* (2021).

Economicamente, o coco babaçu foi o segundo produto florestal não madeireiro mais valioso do Brasil até 2011, sendo superado por produtos como castanha-do-pará (*Bertholletia excelsa*) e carnaúba (*Copernicia prunifera*) nos anos subsequentes (IBGE, 2016). O Maranhão, maior produtor nacional, concentra 94,0% da produção brasileira de amêndoas, com 65,0% da área de babaçuais do país. Esta abundância de matéria-prima residual oferece oportunidades para o aproveitamento sustentável, especialmente, na produção de carvão vegetal para abastecer usinas siderúrgicas locais (ABRAF, 2012).

Por outro lado, a subutilização de resíduos lignocelulósicos do coco babaçu representa um desafio ambiental. Estima-se que apenas 8,7% do fruto seja efetivamente aproveitado, com 91,3% sendo descartado inadequadamente (Lima, 2023). Este desperdício contrasta com o potencial estimado de 6,8 milhões de toneladas anuais de frutos no Brasil, sendo o Maranhão responsável por 92,0% desse montante (Lima, 2023).

No presente contexto, iniciativas que visem agregar valor ao coco babaçu são essenciais. O desenvolvimento de novos produtos e tecnologias, como bioenergia, carvão vegetal de alta qualidade e biopolímeros a partir do mesocarpo, pode não apenas fortalecer a economia local, mas também promover a conservação dos babaçuais e melhorar as condições de vida das comunidades agroextrativistas que dependem dessa palmeira multifuncional (Santos, 2020).

5 MATERIAL E MÉTODOS

A caracterização das amostras puras de cascas de coco babaçu, escamas de peixes e das *blends* em diferentes proporções foi realizada por meio de diversas técnicas analíticas, com o objetivo de investigar as propriedades físico-químicas, morfoestruturais, composicionais e o comportamento térmico dos materiais lignocelulósicos e colagenosos. Estas análises visam avaliar o potencial das amostras como fontes alternativas de bioenergia. O detalhamento das técnicas empregadas é apresentado nas seções 5.2 a 5.9.

5.1 ORIGEM E PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

As escamas de peixes foram coletadas em uma feira livre local, situada na cidade de São Luís, Estado do Maranhão, Brasil (2° 31' 48" Sul; 44° 18' 10" Oeste), através da colaboração de colaboradores locais. Com o propósito de deixar o conteúdo mais homogêneo, os resíduos pesqueiros foram especificados como derivados de pescada-amarela (*Cynoscion acoupa*), espécie abundante e muito apreciada no Estado.

As cascas de coco babaçu são oriundas do município de Formosa da Serra Negra (6° 25' 47" Sul; 46° 10' 31" Oeste), localizado no centro do Estado do Maranhão, cerca de 646 km da capital maranhense (São Luís, Maranhão), tendo como predominância uma vegetação do cerrado maranhense, marcado pela presença de árvores de grande porte, como os babaçuais (CRPM, 2011). A coleta ocorreu por meio da colaboração das trabalhadoras locais (quebradeiras de coco) que a realizaram com a finalidade de comercialização dos frutos de babaçu.

O fluxograma apresentado na Figura 6 resume previamente as etapas com uma visão geral e comum em ambas as amostras.

Figura 6 – Etapas de coleta e preparação das amostras de coco babaçu e escamas de peixes.



Fonte: A autora (2025).

As amostras coletadas passaram separadamente por três lavagens com água corrente para eliminação total das impurezas e odores característicos. Após isso, foram levadas à estufa (Tecnal TE-393-80L) para secagem e liberação do excedente de umidade em temperatura média aproximada de 60 °C por 48 horas para as duas biomassas, como apresentado na Figura 7. Posteriormente, as cascas de coco babaçu secas foram levadas a um triturador forrageiro (Trapp TRF 400 Super) por 1 hora, devido ao tamanho e espessura do mesmo. Após realizar a pré-redução, foram transferidas para o moinho de facas (Tecnal R-TE-648) com este procedimento sendo realizado por 4 horas, juntamente com as escamas de peixes, para a redução de granulometria, e posterior peneiramento (peneiras da série ASTM com aberturas de 355 µm e 300 µm) para seleção das amostras em tamanhos médios de partículas ($\approx 328 \mu\text{m}$).

Figura 7 – Etapa do processo de secagem das cascas de coco babaçu (100% CCB) na estufa à 60 °C por 48 horas.



Fonte: A autora (2024).

A etapa de preparo foi conduzida através de uma análise bibliográfica proveniente de Silva *et al.* (2019), seguida de modificações e adequações aos métodos analíticos. As amostras de cascas de coco babaçu apresentaram um nível de umidade superior as escamas de peixes, prolongando as etapas de pré-tratamento e exigindo um maior rigor no processamento destas.

Por fim, as amostras foram separadas nas proporções supracitadas e misturadas em agitador magnético (Figura 8c), garantindo uma homogeneização eficiente dos materiais por meio da rotação controlada do campo magnético, o que favorece a dispersão uniforme das partículas.

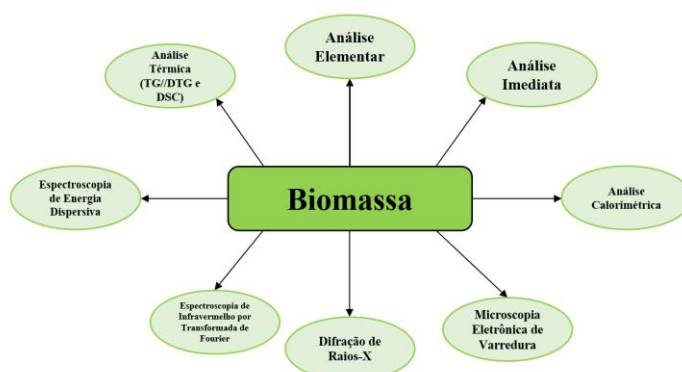
Figura 8 – Amostras de escamas de peixes (100% EP) após os processos de: a) secagem; b) moagem e c) preparação de amostras em blendas.



Fonte: A autora (2024).

Os procedimentos desta pesquisa foram conduzidos em uma sequência de análises interdependentes, conforme ilustrado no fluxograma da Figura 9.

Figura 9 – Fluxograma de análises e métodos realizados na investigação das amostras estudadas.



Fonte: A autora (2025).

Nos próximos tópicos, são descritas todas as análises utilizadas e ajustadas ao longo do estudo, incluindo detalhes que facilitam a reprodução dos experimentos.

5.2 ANÁLISE ELEMENTAR (AE)

A análise elementar determina o percentual dos principais elementos químicos presentes nas amostras, incluindo carbono (C), nitrogênio (N), hidrogênio (H) e enxofre (S). O teor de oxigênio (O) das amostras foi determinado pela diferença em relação a 100%, conforme mostrado na Equação 1 (Silva; Torquato; Cruz, 2019).

$$\%O = 100\% - (\%C + \%N + \%H + \%S) \quad (1)$$

Esta análise auxilia na caracterização dos biocombustíveis sólidos devido à associação da energia gerada, fruto da queima desta, com a entalpia dos elementos associados. Os gases resultantes da combustão em oxigênio puro são quantificados em um detector de condutividade térmica. Neste estudo, um analisador elementar *FlashEA 112 SERIES*, localizado na Central de Análises Químicas e Instrumentais (CAQI) do Instituto de Química de São Carlos da Universidade de São Paulo (IQSC – USP).

5.3 ANÁLISE IMEDIATA (AI)

Essencialmente, esta análise implica na determinação dos teores de umidade, cinzas, materiais voláteis e de carbono fixo (Monroe *et al.*, 2024). Estas características são importantes para entender como a amostra reagirá no processo de queima para a geração de energia e ocorre nas respectivas temperaturas de 110 °C, 600 °C e 900 °C (Monroe *et al.*, 2024). Para o controle de temperatura em cada etapa da análise imediata, utilizou-se um forno do tipo mufla a vácuo da marca *INTI*, modelo MLVC 1300/7, operado por um controlador eletrônico da marca *FLYEVEER*, modelo FE50RPN. O equipamento está instalado no Laboratório de Materiais e Processos de Fabricação do Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Maranhão. Os experimentos foram realizados em triplicata para garantir maior precisão, e os valores médios mais desvio-padrão das composições imediatas asseguram a confiabilidade e reprodutibilidade dos resultados.

Os subtópicos 5.3.1 a 5.3.4 apresentam a metodologia utilizada para a caracterização da biomassa, assim como as equações empregadas no cálculo dos parâmetros da análise, sendo uma adaptação da tese desenvolvida por Narita (2020) em diferentes temperaturas.

5.3.1 Umidade

A umidade é a medida da quantidade de água livre presente na amostra estudada, calculada através da perda de massa após ser submetida em temperaturas de aproximadamente 110 °C (Monroe *et al.*, 2024). O cálculo para determinação foi realizado através da Equação 2:

$$\%Umidade = (m_i - m_{110}/m_i) * 100 \quad (2)$$

onde m_i é a massa inicial e m_{110} é a massa após o tratamento térmico a 110 °C.

5.3.2 Materiais Voláteis

São substâncias formadas pela queima de elementos químicos, como carbono, hidrogênio e oxigênio. A quantidade destes é influenciada pela hemicelulose e celulose, estruturas da biomassa (Froehlich, 2014). A amostra é aquecida até 600 °C em atmosfera inerte. O cálculo é realizado baseado na Equação 4:

$$\%Materiais\ Voláteis = [(m_i - m_{600}/m_i)*100] - \%Umidade \quad (3)$$

onde m_i é a massa inicial e m_{600} é a massa após o tratamento térmico a 600 °C.

5.3.3 Cinzas

As cinzas correspondem a quantidade residual da biomassa que foi produzida após a queima completa da mesma em atmosfera oxidante (ar sintético ou ambiente) a 900 °C. A Equação 5 descreve o cálculo para encontrar o teor de cinzas das amostras:

$$\%Cinzas = (m_{cinzas}/m_i)*100 \quad (4)$$

onde m_i é a massa inicial e m_{cinzas} é a massa do resíduo após a queima completa da biomassa a 900 °C.

5.3.4 Carbono Fixo

O carbono fixo depende do teor de lignina da biomassa utilizada. Quanto maior a quantidade de carbono fixo, maior será o índice de combustão da partícula, ou seja, mais rapidamente ela irá queimar quando exposta ao calor. O mesmo é calculado por meio da diferença em 100% entre a soma das porcentagens de umidade, materiais voláteis e cinzas. O cálculo foi feito através da Equação 3:

$$\%Carbono\ fixo = 100\% - (\%Umidade + \%Materiais\ Voláteis + \%Cinzas) \quad (5)$$

5.4 ANÁLISE CALORIMÉTRICA (AC)

A análise calorimétrica tem o objetivo determinar o Poder Calorífico Superior (PCS), classificando o potencial energético da biomassa através de uma avaliação da quantidade de energia liberada na queima completa de uma unidade de massa do material (Protásio *et al.*, 2011). O PCI representa o calor liberado nas mesmas condições, mas desconsidera a condensação do vapor d'água formado durante a queima (Silva *et al.*, 2019).

Para a determinação do PCS experimental, utilizou-se uma bomba calorimétrica do modelo IKA C-200, localizada na Faculdade de Engenharia Mecânica (FEM), da Universidade de Campinas (Unicamp), Campinas (SP). Para o cálculo do Poder Calorífico Inferior (PCI), utilizou-se a Equação 6, baseado no PCS obtido experimentalmente, e considerando a análise elementar, umidade e um balanço termodinâmico (Monroe *et al.*, 2024).

$$PCI = [(PCS - \lambda * (r + 0,9 * H)) * (100 - W) / 100] \quad (6)$$

onde λ é referente ao calor latente de vaporização da água = 2,31 MJ kg⁻¹ a 25 °C, W é a umidade contida na amostra, H é o percentual de hidrogênio obtido através da análise elementar e r é uma razão baseada na umidade ($r = W / (100 - W)$).

Além disso, determinou-se a quantidade de energia efetivamente liberada pelo biocombustível em base seca, conhecida como Poder Calorífico Útil (PCU). Esse valor, calculado pela equação (9), pode ser utilizado juntamente com o Poder Calorífico Superior (PCS) ou como alternativa ao Poder Calorífico Inferior (PCI) (Petriscoski *et al.*, 2020).

$$PCU = [PCS - K * (1 - W) - (600 * W) / 238,89] \quad (7)$$

onde K é a constante de vaporização da água (324 kcal g⁻¹) a 100 °C; 600 kcal g⁻¹ é a taxa de troca de calor por convecção (condensação) da água a 0 °C e 238,89 é uma constante que converte kcal g⁻¹ em MJ kg⁻¹ (Petriscoski *et al.*, 2020).

5.5 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) apresenta a área ou o microvolume a ser analisado onde ocorre a irradiação de um fino feixe de elétrons ao invés da radiação da luz e, como resultado da interação do feixe de elétrons com a superfície da amostra, fornecem informações características sobre a amostra (topografia da superfície, morfologia, composição, textura, contorno de grãos etc) (Protásio *et al.*, 2011). As imagens de MEV foram obtidas através de um microscópio eletrônico de varredura *Leo Electron Microscopy* LEO440, situado na Universidade Federal Rural de Pernambuco.

5.6 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X

A difração de raios-X (DRX) representa o fenômeno de interação entre o feixe de raios-X incidente e os elétrons dos átomos componentes de um material, relacionado ao espelhamento coerente (Protásio *et al.*, 2011). Esta técnica consiste na incidência de irradiação em uma amostra e na detecção dos fótons difratados, permitindo que, em um material cujos átomos estejam arranjados periodicamente no espaço, as características das estruturas cristalinas e amorfas das amostras sejam verificadas (Protásio *et al.*, 2011). A Equação 8 apresenta o método de Segal, cujo objetivo principal é calcular o índice de cristalinidade (%IC) das blendas (cascas de coco babaçu e escamas de peixes) (Cruz, 2015).

$$\%IC = [(I_{002} - I_{am}) / I_{002}] * 100 \quad (8)$$

onde I_{002} e I_{am} representam a intensidade da região cristalina e amorfa, respectivamente. No presente estudo foi utilizado o difratômetro *Rigaku Multiflex Miniflex*, onde este emprega radiação de $CuK\alpha$; ($\lambda = 1.541 \text{ \AA}$, 40 kV-40 mA), baseado na metodologia do pó. A taxa de varredura (2θ) das amostras foi no intervalo entre 5 e 70° com velocidade de $0,05^\circ \text{ min}^{-1}$. Esta técnica foi realizada na Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Campus Cabo Agostinho, Pernambuco (PE).

5.7 ESPECTROSCOPIA DE INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)

A espectroscopia na região do infravermelho é uma técnica simples, rápida e não destrutiva, a qual pode ser utilizada na caracterização de compostos orgânicos. Assim como outros tipos de espectroscopia, esta é baseada em interações entre as moléculas e/ou átomos e a radiação eletromagnética, provocando vibrações de acordo com a amplitude das ligações covalentes existentes na molécula (Ruschel, 2014). Provoca o aparecimento de bandas no espectro infravermelho em faixas específicas de frequência, as quais também são influenciadas pela presença de grupos funcionais próximos (Cruz, 2015). Também exhibe resultados qualitativos por conta da proporcionalidade das intensidades de absorção nas bandas no espectro em relação à concentração da mesma (Ruschel, 2014).

Esta análise foi realizada em um espectrofotômetro *Shimadzu IR-Prestige-21*, registrando espectros entre 4000 e 400 cm^{-1} em modo transmitância para as amostras de granulometria de $\approx 328 \text{ }\mu\text{m}$, formando pastilhas e estas foram preparadas com KBr (brometo de potássio). O equipamento está localizado na Central Analítica, Programa de Pós-Graduação em Química

(PPGQuim), do Departamento de Química da Universidade Federal do Maranhão.

5.8 ESPECTROSCOPIA DE ENERGIA DISPERSIVA (EED)

Para determinar a composição de elementos orgânicos e inorgânicos, utilizou-se a técnica de Espectroscopia de Energia Dispersiva (EED). Essa técnica foi acoplada a um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), permitindo a obtenção de imagens de alta resolução da microestrutura das amostras, além da identificação qualitativa e semi-quantitativa dos elementos presentes. As amostras foram preparadas em forma de pastilhas, utilizando uma prensa hidráulica, e fixadas em suportes de alumínio com fita adesiva dupla face de material carbonoso, garantindo a minimização de interferências na análise elementar. O experimento foi realizado em um microscópio eletrônico de varredura *Leo Electron Microscopy* LEO440, localizado na Universidade Federal Rural de Pernambuco.

5.9 ANÁLISES TÉRMICAS (CURVAS TG/DTG E DSC)

A Termogravimetria (TG) e a Derivada da Termogravimetria (DTG) são técnicas amplamente utilizadas para identificar os estágios de degradação térmica dos principais componentes lignocelulósicos, como hemicelulose, celulose e lignina, de maneira simples, rápida e direta (Silva *et al.*, 2019). Neste estudo, ambas as técnicas foram aplicadas para avaliar a degradação térmica de amostras de cascas de coco verde, escamas de peixes e as respectivas blendas. A Termogravimetria foi empregada para analisar a variação de massa em função da temperatura ao longo do tempo, enquanto a Derivada da Termogravimetria (DTG) permitiu avaliar a taxa de perda de massa com o aumento da temperatura (Monroe *et al.*, 2024).

A Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) é uma técnica que mede o fluxo de calor da amostras, a qual foi utilizada para identificar eventos endotérmicos e exotérmicos associados às etapas de perda de massa das espécies estudadas (Lever *et al.*, 2014).

Os ensaios de TG/DTG e DSC foram conduzidos simultaneamente em equipamentos da marca *Netzsch*. O experimento foi realizado nas faixas de 25 °C (temperatura ambiente) a 800 °C, sob atmosfera inerte (argônio 5.0) a 100 mL min⁻¹, com a massa de $\approx 10,0 \pm 0,5$ mg de amostra e taxa de aquecimento de 10 °C min⁻¹. Os procedimentos experimentais ocorreram no Laboratório de Análise Térmica e Vidros Especiais (LANTVE), do Programa de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologia dos Materiais (PPGCTM), do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão (IFMA).

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As seções 6.1 a 6.7 apresentam os resultados das análises realizadas por meio de técnicas de caracterização das propriedades físico-químicas, térmicas e morfológicas, e a correlação destes resultados com o potencial das *blends* de cascas de coco babaçu e escamas de peixes para aplicação em processos térmicos e geração de energia limpa e renovável.

6.1 ANÁLISES ELEMENTAR (AE), IMEDIATA (AI) E CALORIMÉTRICA (AC)

Os resultados obtidos pela análise elementar são apresentados na Tabela 1, exibindo os teores de carbono, hidrogênio, nitrogênio, enxofre e oxigênio presentes.

Tabela 1 – Análise elementar das amostras puras de cascas de coco babaçu e escamas de peixes, assim como as respectivas blends.

Análise Elementar (AE)					
Biomassas	Elementos (%)				
	Carbono	Hidrogênio	Nitrogênio	Enxofre	Oxigênio
100%CCB	41,03±0,28	5,99±0,29	n.d.	n.d.	52,97±0,55
90%CCB: 10%EP	38,90±1,94	5,44±0,28	0,66±0,05	n.d.	54,97±2,16
80%CCB: 20%EP	35,16±0,46	5,08±0,06	1,39±0,10	n.d.	58,36±0,36
70%CCB: 30%EP	32,85±0,85	4,81±0,10	2,39±0,18	n.d.	59,94±0,78
60%CCB: 40%EP	29,88±0,79	4,60±0,14	4,11±0,57	n.d.	61,40±0,45
50%CCB: 50%EP	28,95±0,27	4,37±0,16	4,39±0,61	n.d.	62,27±0,85
100%EP	19,47±0,43	3,40±0,03	5,87±0,02	n.d.	71,26±0,44

n.d.: não detectado ou abaixo do limite de detecção do equipamento.

O* = 100% - (%C + %N + %H + %S).

Fonte: A autora (2025).

As composições elementares de carbono e hidrogênio referentes às amostras puras de cascas de coco babaçu ($41,03 \pm 0,28$ e $5,99 \pm 0,29\%$) foram superiores quando comparados às escamas de peixes ($19,47 \pm 0,43$ e $3,40 \pm 0,03$). Esta característica justifica-se pela presença de elementos que majoritariamente inorgânicos, principalmente hidroxiapatita presente nas escamas de peixes (Silva *et al.*, 2019).

Os teores de nitrogênio, oxigênio e enxofre existentes nas amostras compostas predominantemente de cascas de coco babaçu, ou seja, 90%CCB:10%EP e 80%CCB:20%EP, apresentaram unidades aproximadas da pesquisa realizada por Souza *et al.* (2019), o qual realizou o comparativo do potencial energético de cascas de coco babaçu e castanhas de caju, obtendo valores da ordem de 0,03% para nitrogênio, 46,48% de oxigênio e sem conteúdo de enxofre.

De acordo com Rodrigues (2018), os baixos teores de nitrogênio e enxofre são utilizados para indicar a presença de uma biomassa menos poluente, com escórias reduzidas quando aplicadas em processos termoquímicos, pois esses elementos estão diretamente relacionados à formação de poluentes atmosféricos, como óxidos de nitrogênio (NO_x) e dióxido de enxofre (SO₂), que contribuem para a poluição do ar e acidificação. A biomassa com baixos teores desses compostos resulta em uma combustão mais limpa e eficiente, minimizando os impactos ambientais negativos (Rodrigues, 2018).

Contudo, as amostras contendo o maior percentual de escamas de peixes (100%EP, 50%CCB:50%EP e 60%CCB:40%EP) apresentaram valores de oxigênio próximos aos encontrados por Silva *et al.* (2019), quando estes estudaram escamas heterogêneas do litoral nordestino (Maranhão, Brasil), isto é, na faixa de 70,0%. Quando são observados em concomitância com os teores de carbono encontrados nas mesmas amostras ($19,47 \pm 0,43$, $28,95 \pm 0,27$ e $29,88 \pm 0,79\%$, respectivamente), verificou-se amostras com baixas densidades energéticas, uma vez que os maiores valores de oxigênio e hidrogênio em relação ao carbono reduzem o potencial energético por meio da redução das energias presentes nas ligações C-O e C-H (Silva *et al.*, 2019).

As baixas densidades energéticas justificam-se devido ao grau de oxidação presente nas ligações C-O, produzindo uma redução da energia disponível para liberação durante a combustão, enquanto a formação de água a partir do hidrogênio dissipa parte da energia na forma de calor latente (Rush, 2021). Desta forma, materiais com maiores proporções de oxigênio e hidrogênio apresentam menores densidades energéticas devido à menor quantidade de energia liberada na combustão (Rush, 2021).

A redução da presença de enxofre em biomassas é altamente benéfica, uma vez que a emissão de óxidos de enxofre (SO_x) torna-se mínima, sendo um atrativo para o estudo, visto que estes são responsáveis por impactos ambientais como chuva ácida e poluição atmosférica (Monroe *et al.*, 2024). Outrossim, a presença reduzida deste elemento impede a corrosão em equipamentos térmicos industriais e/ou laboratoriais, conforme apontado por Cruz (2015).

Portanto, todas as amostras deste estudo não apresentaram valores de enxofre nas composições elementares, sugerindo um potencial energético considerável em relação à sua eficiência e sustentabilidade, com a vantagem adicional de não contribuir para a emissão de compostos sulfurados durante a utilização destas como biocombustíveis (Monroe *et al.*, 2024).

Não obstante, os valores referentes a análise imediata para as amostras estudadas estão presentes na Tabela 2.

Tabela 2 – Composição imediata das amostras de cascas de coco babaçu, escamas de peixes e as respectivas *blends*.

Análise Imediata (%)				
Biomassas	Umidade	Materiais Voláteis	Carbono Fixo	Cinzas
100%CCB	12,17±0,02	71,17±0,49	12,42±0,09	4,24±0,18
90%CCB:10%EP	12,86±0,05	71,02±1,24	12,01±0,51	4,11±0,03
80%CCB:20%EP	12,48±0,08	71,05±0,59	12,15±0,24	4,32±0,81
70%CCB:30%EP	11,76±0,15	71,95±0,01	12,11±0,92	4,18±0,31
60%CCB:40%EP	11,62±0,51	72,07±0,43	12,07±0,07	4,24±1,00
50%CCB:50%EP	11,57±0,46	70,05±0,60	12,98±0,65	5,40±0,04
100%EP	11,91±0,27	72,26±0,14	11,99±0,49	3,84±0,92

Fonte: A autora (2025).

As biomassas contendo 100%EP e 60%CCB:40%EP apresentaram os maiores valores de materiais voláteis (72,26±0,14 e 72,07±0,43%, respectivamente). Estes valores estão próximos aos encontrados por Carvalho (2022), que reportou teores de materiais voláteis da ordem de 72,04 e 77,23% para os resíduos de coco verde. Os combustíveis que apresentam um alto teor de materiais voláteis são facilmente queimados e/ou oxidados de forma mais rápida (Carvalho, 2022). Sendo assim, os altos teores de materiais voláteis apresentados neste estudo indicaram uma alta reatividade e volatilidade em processos de combustão e/ou pirólise, favorecendo a

produção de bio-óleo e contribuindo para o processo de gaseificação, pois esses materiais voláteis são rapidamente liberados durante a decomposição térmica da biomassa, facilitando a conversão em produtos energéticos como gases combustíveis e líquidos bioquímicos (Rasam *et al.*, 2020).

Além disso, as amostras de 90%CCB:10%EP e 80%CCB:20%EP apresentaram valores de carbono fixo na faixa de $12,86 \pm 0,05$ e $12,48 \pm 0,08\%$, respectivamente. Esse resultado é atribuído ao processo de carbonização ou torrefação, que são capazes de elevar os valores de carbono fixo das biomassas ao remover componentes voláteis e aumentar a estabilidade do material (Teixeira, 2020). Segundo Teixeira (2020), valores de carbono fixo na faixa de 13,0% garantem uma combustão mais uniforme e um maior tempo de queima (residência), favorecendo a utilização deste como fonte de energia em processos térmicos.

Em contrapartida, os baixos valores de umidade ($11,91 \pm 0,27$ e $11,57 \pm 0,46\%$) estão presentes majoritariamente nas amostras contendo maiores proporções de escamas de peixes (100%EP e 50%CCB:50%EP), demonstrando efetividade no processo de secagem prévia antes da utilização destas em processos termoquímicos. De acordo com Santana Júnior (2020), baixos teores de umidade estão diretamente associados à eficiência energética, reduzindo perdas térmicas e aumentando o rendimento energético durante o processo térmico.

Considerando, as amostras compostas exclusivamente por cascas de coco babaçu (100%CCB), estas apresentaram um maior teor de cinzas ($4,24 \pm 0,18\%$) em comparação com as escamas de peixes ($3,84 \pm 0,92\%$). Um elevado teor de cinzas pode impactar negativamente o processo de combustão, pois esses resíduos são frequentemente depositados na parte inferior de reatores termoquímicos, podendo causar entupimentos (Silva, 2019). Contudo, os teores de cinzas obtidos neste estudo foram inferiores aos relatados para outros resíduos sólidos urbanos, como o lodo de esgoto, que apresenta um teor de cinzas da ordem de 43,15% (Nozela *et al.*, 2018).

Paralelamente, os valores dos poderes caloríficos superior (PCS), inferior (PCI) e útil (PCU) das amostras estão presentes na Tabela 3.

Tabela 3 – Análise calorimétrica (PCS, PCI e PCU) para as biomassas puras e respectivas blends.

Análise Calorimétrica (MJ kg ⁻¹)			
Biomassas	PCS	PCI	PCU
100%CCB	17,26±0,04	16,20±0,80	15,34±0,51
90%CCB:10%EP	16,75±0,19	15,52±0,07	15,14±0,15
80%CCB:20%EP	15,93±0,17	14,77±1,00	14,63±1,03
70%CCB:30%EP	15,17±0,20	14,11±0,94	13,80±0,02
60%CCB:40%EP	14,45±0,08	13,35±0,56	13,26±0,68
50%CCB:50%EP	13,54±0,11	12,63±0,74	12,43±0,19
100%EP	11,38±0,06	10,26±0,48	10,09±0,25

Fonte: A autora (2025).

O Poder Calorífico Superior (PCS) das amostras puras de cascas de coco babaçu foi aproximadamente 52,0% superior em comparação às amostras puras de escamas de peixes, ou seja, uma diferença de 5,88 MJ kg⁻¹. Esse aumento contribui para uma melhora na qualidade da combustão, proporcionando uma queima mais prolongada da biomassa lignocelulósica (Rusch, 2021). O PCS derivado da amostra de 100%CCB apresentou um valor aproximado aos encontrados por Monroe *et al.* (2024), o qual apresentou uma avaliação físico-química e morfológica de cascas de coco verde e escamas de peixes (puras e combinadas), com valores de PCS da ordem de 16,64 MJ kg⁻¹ para o coco verde e 13,03 MJ kg⁻¹ para as escamas de peixes.

As possíveis diferenças nos valores de PCS entre este estudo e o de Monroe *et al.* (2024) são atribuídas à composição química específica das biomassas, pois, apesar das semelhanças estruturais (fibrosas) entre as cascas de coco verde e babaçu, a presença de amido no mesocarpo do coco babaçu pode influenciar no aumento do poder calorífico (Schvade, 2023). Este conteúdo de amido pode estar presente devido a resíduos do mesocarpo aderidos às cascas durante o processamento, além das variações na umidade, proporção de lignocelulose e presença de extrativos voláteis, bem como diferenças nas condições climáticas e vegetação, além da etapa de secagem na preparação das amostras (Carvalho, 2022).

Quanto aos valores de PCI, as duas amostras *in natura* apresentaram uma redução de apenas cerca de 2,0%, o que pode ser explicado pelo fato de que a conversão do hidrogênio nas amostras não causou uma perda significativa no poder calorífico das biomassas analisadas (Silva, 2019).

O PCU reflete a quantidade de energia efetivamente aproveitável de um combustível, desconsiderando a energia necessária para evaporar a umidade contida na biomassa (Petricoski

et al., 2020). O Poder Calorífico Útil apresentou uma diminuição progressiva à medida que a quantidade de cascas de coco babaçu diminuiu nas amostras, ou seja, as amostras de 90%CCB:10%EP e 50%CCB:50%EP apresentaram uma diferença de PCU da ordem de $1,48 \text{ MJ kg}^{-1}$.

Apesar da variação observada, as biomassas analisadas não mostraram diferenças significativas na energia total produzida durante a combustão. Este comportamento pode ser explicado pelo baixo teor de umidade intrínseca das amostras, o que sugere que estas apresentam boas propriedades para estocagem e transporte, sem comprometimento da perda de qualidade dos materiais (Cai *et al.*, 2017).

6.2 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

Os micrográficos obtidos por meio de imagens MEV ilustram as características morfológicas dos compostos isolados e das misturas de cascas de coco babaçu e escamas de peixes nas diferentes proporções. Essas imagens foram geradas a partir de uma visualização amostral em diversos pontos das amostras analisadas. A Figura 10 (a-b) apresenta as imagens das amostras puras de cascas de coco babaçu (100%CCB).

Figura 10 – Micrográficos de MEV para as amostras puras de cascas de coco babaçu *in natura* com magnitudes de: a) 150 e b) 250 vezes.

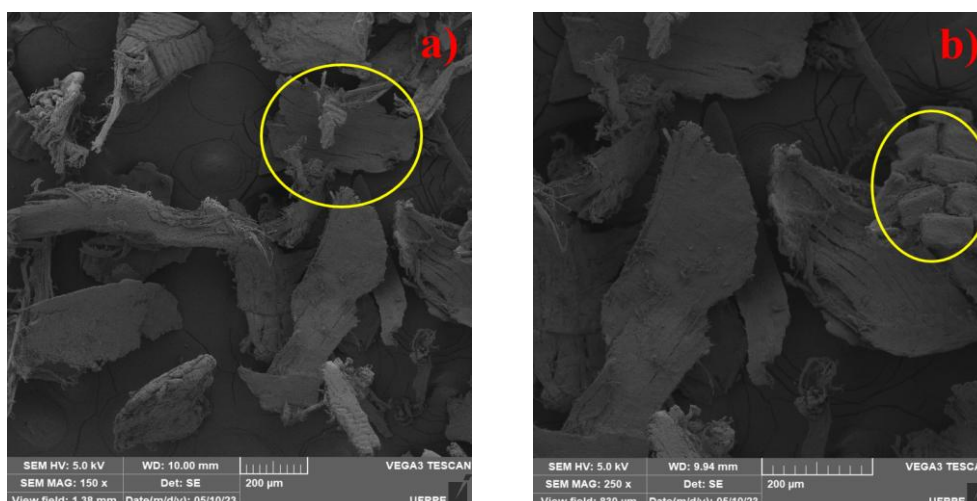


Fonte: A Autora (2025).

A Figura 10 (a-b) (100%CCB) apresenta resultados semelhantes aos obtidos por Sousa *et al.* (2017), que, ao analisarem imagens de MEV de cascas de coco babaçu para adsorção de pesticidas em ambientes aquáticos, observaram partículas no formato de esferóides. Os autores também sugeriram que a presença dessas estruturas decorre da quebra da matriz lignocelulósica inicial, na qual essas partículas (cadeias de amido) estavam agregadas, além de uma redução significativa no tamanho original das mesmas (Sousa *et al.*, 2017).

Na Figura 11 (a-b), estão presentes as imagens de MEV para as amostras puras de escamas de peixes (100%EP), nas ampliações mencionadas, 150 e 250, consecutivamente.

Figura 11 – Micrografias de MEV para as amostras de escamas de peixes *in natura* (100%EP), com magnitudes: a) 150 e b) 250 vezes.



Fonte: A Autora (2025).

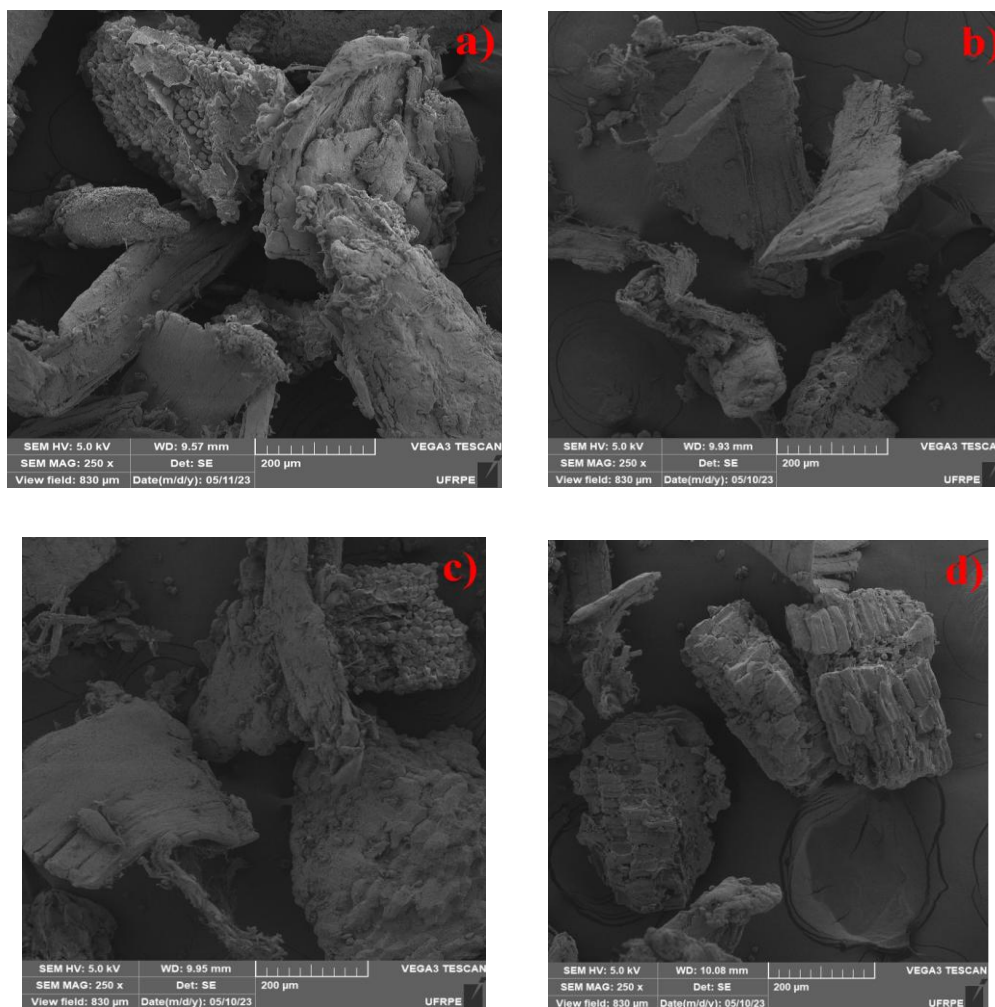
A análise de MEV das escamas de peixes *in natura* revelou um arranjo estrutural característico da presença de hidroxiapatita, material também identificado por Ferreira (2020), ao estudar a caracterização da hidroxiapatita proveniente de resíduos de escamas de peixes da espécie pirapema (*Megalops atlanticus*). Esse material orgânico é composto por poros, conferindo-lhe características de um material cerâmico, o que o torna um biomaterial de grande relevância, especialmente pelas propriedades de biocompatibilidade e baixa toxicidade (Lopes, 2015).

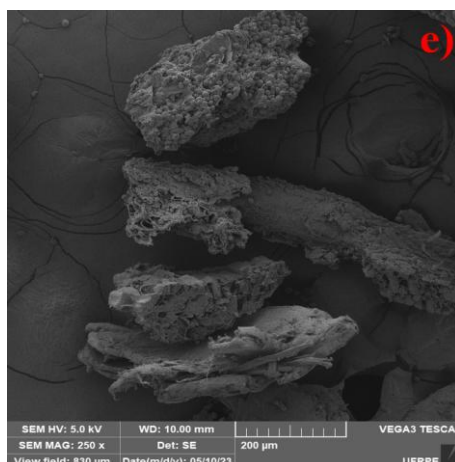
Além disso, a presença de hidroxiapatita nas escamas analisadas sugere o potencial destas para diversas aplicações tecnológicas, especialmente, na produção de biocerâmicas e materiais

para Engenharia de tecidos. Segundo Silva *et al.* (2019), a hidroxiapatita extraída de resíduos marinhos, como as escamas de peixes, pode ser utilizada na síntese de materiais bioativos com propriedades semelhantes às do tecido ósseo humano, favorecendo a aplicação das mesmas em enxertos e/ou implantes. Essa importante característica, aliada à biocompatibilidade mencionada por Lopes (2018), reforça o alto valor agregado desses resíduos, ampliando as possibilidades de aproveitamento além da geração de bioenergia, para setores como o biomédico e a Engenharia de materiais sustentáveis.

A Figura 12 (a-e) apresenta as imagens das misturas nas diferentes proporções em ampliação de 250 vezes.

Figura 12 – Micrografias de MEV para as misturas de cascas de coco babaçu e escamas de peixes com magnitudes de 250x: a) 50%CCB:50%%EP, b) 60%CCB:40%EP, c) 70%CCB:30%EP, d) 80%CCB:20%EP e e) 90%CCB:10%EP.





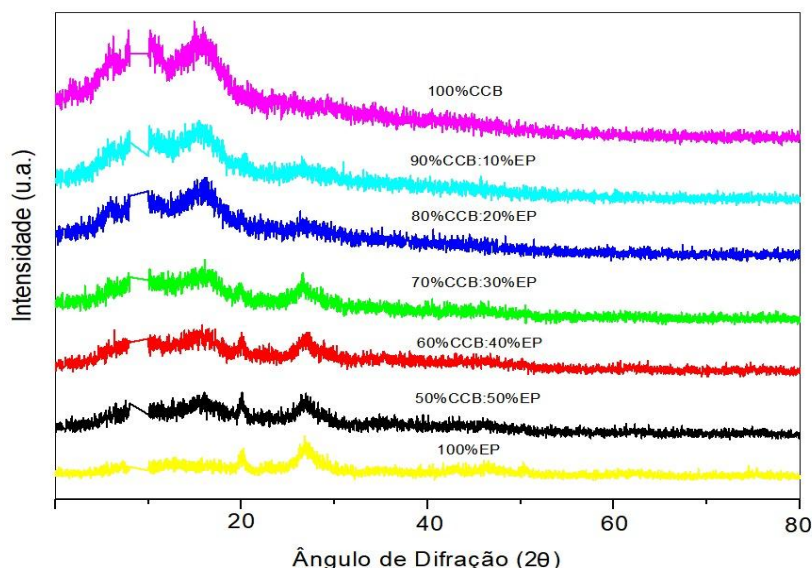
Fonte: A autora (2025).

A Figura 12 (a-e) exhibe as imagens de MEV das blendas de cascas de coco babaçu e escamas de peixes nas proporções mencionadas. Nas amostras com maiores concentrações de escamas de peixes (50%CCB:50%EP e 60%CCB:40%EP), foram observadas fibras, lamelas e estruturas com características semelhantes ao colágeno (Bezerra *et al.*, 2018). Além disso, a ampliação das imagens revelou uma maior homogeneidade entre as cascas de coco babaçu e escamas de peixes, atribuída à forma como essas biomassas foram misturadas, permitindo uma melhor interação entre os diferentes componentes. Em concomitância, as escamas de peixes são ricas em colágeno e hidroxiapatita, substâncias que atuam como agente ligante e promovem a estabilidade e rigidez estrutural, permitindo uma maior coesão entre as partículas (Rush, 2021). A presença dessas substâncias facilita a interação entre as biomassas, tornando a mistura mais estável e homogênea devido às ligações formadas entre os componentes estruturais das cascas de babaçu e escamas (Silva *et al.*, 2019).

6.3 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX)

Por meio deste procedimento, foi possível detectar a forma como a biomassa lignocelulósica está configurada, bem como esta pode sofrer uma influência por meio dos processos termoquímicos, presentes na Figura 13.

Figura 13 – Difrátogramas de raios-X das amostras de escamas de peixes, cascas de coco babaçu e as respectivas blends.



Fonte: A autora (2025).

A partir da Figura 13, observou-se que as amostras puras de cascas de coco babaçu (100%CCB) e escamas de peixes (100%EP) apresentaram índices de cristalinidade da ordem de 18,7% e 28,4%, respectivamente. Além disso, as *blends*, ou seja, 90%CCB:10%EP; 80%CCB:20%EP; 70%CCB:30%EP; 60%CCB:40%EP e 50%CCB:50%EP, apresentaram valores de 17,5; 15,9; 25,6; 27,2 e 28,3%, na respectiva ordem, mantendo as características predominantemente amorfas.

Esses resultados indicaram baixos índices de cristalinidade, o que evidencia a predominância de uma estrutura amorfa nas amostras. Materiais amorfos, como os polímeros vegetais, apresentam uma disposição desordenada de moléculas, o que facilita sua decomposição e reatividade em processos termoquímicos (Rodrigues, 2018). Em contraste, materiais cristalinos possuem uma estrutura ordenada e regular, o que dificulta sua decomposição e torna os processos térmicos mais lentos e menos eficientes. Essa característica em polímeros vegetais favorece o processo de conversão termoquímica, pois a estrutura amorfa permite uma maior interação com o calor, promovendo uma decomposição mais rápida e eficiente durante a combustão, pirólise ou gaseificação (Rodrigues, 2018).

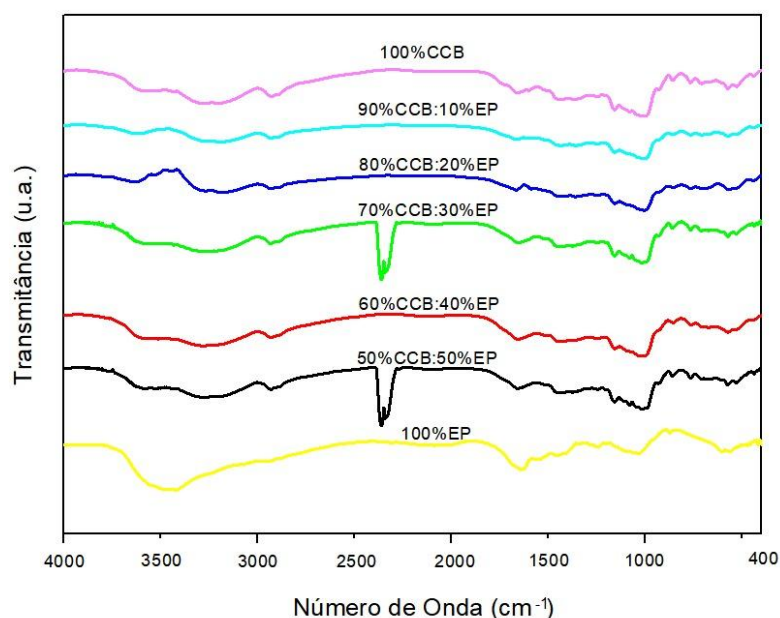
O índice de cristalinidade das cascas de coco babaçu *in natura* foi 60,0% inferior aos valores encontrados para biofilmes produzidos com a mesma matéria-prima, onde estes apresentaram uma cristalinidade de 46,0% (Lima, 2019).

Além disso, os valores obtidos para as amostras de cascas de coco babaçu *in natura* foram aproximados aos valores obtidos por Monroe *et al.* (2024), os quais encontraram valores de 20,13%. Em contrapartida, os valores encontrados para escamas de peixes pelos mesmos autores foram inferiores em comparação à atual pesquisa, obtendo índices de cristalinidade da ordem de 10,09%. A diferença entre os valores de cristalinidade das escamas de peixes para as duas pesquisas, sugere que a biomassa utilizada por Monroe *et al.* (2024) apresentou uma estrutura bem mais amorfa devido às variações na composição mineral, inorgânica, lipídica e proteica dessas escamas (Monroe *et al.*, 2024).

6.4 ESPECTROSCOPIA DE INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)

A análise de infravermelho por transformada de Fourier para amostras de cascas de coco babaçu, escamas de peixes e as respectivas misturas é mostrada na Figura 14.

Figura 14 - Espectrômetro de infravermelho por transformada de Fourier para as amostras puras (100%CCB e 100%EP) e as blends destes nas proporções estudadas.



Fonte: A autora (2025).

Com base nesses resultados, foi possível identificar os principais grupos funcionais presentes nas amostras, evidenciando padrões de absorção semelhantes, porém com variações nas intensidades. As bandas largas de absorção, com máximos entre 3400 e 3500 cm⁻¹, foram observadas nas amostras das misturas 50%CCB:50%EP e 60%CCB:40%EP e estão associadas aos estiramentos dos grupos funcionais N-H, O-H ou à sobreposição de ambos (Silva, 2019).

Além disso, a banda situada na faixa de 1350 cm^{-1} na amostras contendo escamas de peixes *in natura* foi atribuída às deformações da amida tipo II, característica da estrutura do colágeno (Silva, 2019). A Tabela 4 apresenta os principais grupos funcionais identificados neste estudo.

Tabela 4 – Principais grupos funcionais das amostras de cascas de coco babaçu, escamas de peixes e as respectivas blends.

Grupos Funcionais	Comprimentos de onda (cm^{-1})						
	100% CCB	90%CCB: 10%EP	80%CCB: 20%EP	70%CCB: 30%EP	60%CCB: 40%EP	50%CCB: 50%EP	100 %EP
NH	3447	3433	3441	3411	3412	3415	3406
OH	3491	3489	3495	3493	3487	3501	3499
C=O	2852	2822	2827	2864	2855	2867	2878
C=C	1757	1758	1761	1768	1764	1767	1770
C-O	1361	1362	1357	1359	1356	1363	1364
C-N	1165	1159	1162	1156	1152	1161	1170

Fonte: A autora (2025).

Os picos situados entre 2700 e 3000 cm^{-1} das amostras puras de cascas de coco babaçu e escamas de peixes estão relacionados às ligações C=O ou à amida tipo I. Além disso, as bandas localizadas em 2500 cm^{-1} , identificadas nas misturas 50% CCB:50% EP e 70% CCB:30% EP, correspondem aos estiramentos assimétricos e simétricos, bem como às vibrações de dobramento dos grupos fosfato da hidroxiapatita (Silva, 2019).

Rodrigues (2018), ao estudar algumas estruturas lignocelulósicas provenientes dos resíduos da colheita de mandioca (cascas, caule e folhas), também identificou esses grupos funcionais, embora com intensidades distintas, concluindo que a presença destes pode estar relacionada a compostos como carboidratos, açúcares, água, ácido acético, metanol, hemicelulose, celulose e lignina existentes nessas estruturas.

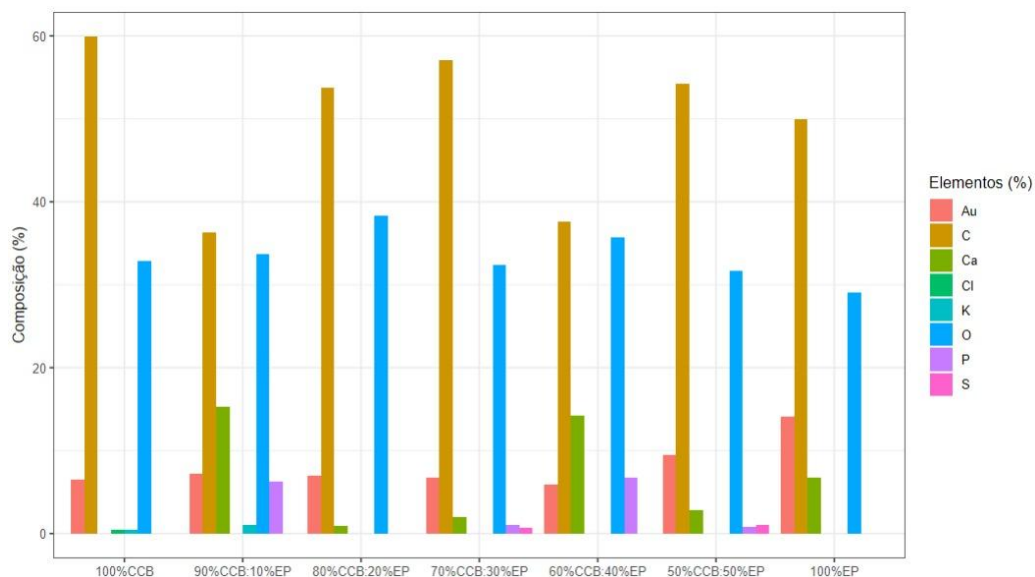
Logo, a detecção de hidrocarbonetos e compostos orgânicos presentes nas biomassas reforça os resultados obtidos pela análise elementar, indicando a presença de carbono, hidrogênio e oxigênio, elementos essenciais para a produção de biocombustíveis.

6.5 ESPECTROSCOPIA DE ENERGIA DISPERSIVA (EED)

A Figura 15 apresenta a quantificação dos percentuais médios da composição química de alguns elementos metálicos e/ou inorgânicos por espectroscopia de energia dispersiva (EED).

Os valores médios apontaram a predominância dos elementos carbono e oxigênio para as sete proporções amostrais.

Figura 15 – Principais componentes presentes nas amostras de cascas de coco babaçu e escamas de peixes *in natura* e nas respectivas misturas obtidos por EED em termos percentuais.



Fonte: A autora (2025).

Por meio da análise de EED, foi possível identificar a presença de alguns elementos metálicos, como cálcio (Ca), carbono (C) e fósforo (P), os quais são elementos prejudiciais ao processo de combustão, quando participam da formação de óxidos, hidróxidos e carbonatos em processos térmicos (Cruz, 2015). Os teores de carbono e oxigênio foram mais pronunciados neste experimento quando comparado com a análise elementar, contudo, a quantidade percentual relativa continua sendo semelhante aos valores encontrados na análise do potencial de escamas de peixes em processos termoquímicos por Silva (2019), sendo estes de 47,07% e 42,67% para carbono e oxigênio, respectivamente. Contudo, tais compostos apresentaram níveis inferiores e aceitáveis, quando comparados aos demais elementos evidenciados, conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 - Principais elementos metálicos e/ou inorgânicos presentes nas amostras avaliadas por EED.

Elementos (%)	100% CCB	90%CCB: 10%EP	80%CCB: 20%EP	70%CCB: 30%EP	60%CCB: 40%EP	50%CCB: 50%EP	100% EP
C	59,8±0,89	36,3±1,22	53,8±1,80	57,1±0,76	37,6±0,08	54,2±1,93	50,0±0,01
O	32,9±0,03	33,7±0,64	38,3±0,11	32,4±0,48	35,7±1,13	31,7±0,04	29,1±0,87
Au	6,5±1,01	7,2±0,10	7,0±1,67	6,7±0,35	5,9±0,72	9,5±0,72	14,1±0,54
Cl	0,4±0,06	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
K	0,4±0,81	1,2±0,08	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Ca	n.d.	15,3±0,14	0,9±0,25	2,0±0,92	14,2±1,43	2,8±0,98	6,8±0,29
S	n.d.	n.d.	n.d.	0,7±1,55	n.d.	1,0±1,12	n.d.
P	n.d.	6,3±0,05	n.d.	1,1±1,02	6,6±0,14	0,8±0,02	n.d.

n.d.: não detectado ou abaixo do limite de detecção do equipamento.

Fonte: A autora (2025).

É válido destacar que o conteúdo de Cl na biomassa contendo a amostra pura de cascas de coco babaçu foi baixo e, em certos casos, foi inferior ao de combustíveis fósseis, como carvão mineral (0,01 a 0,5%), óleo combustível (0,01 a 0,03%) e coque de petróleo (até 0,1%). Uma vez que a maioria dos casos de combustão emitem HCl (ácido clorídrico), essa questão não pode ser negligenciada (Werther et al., 2000).

Os valores de Ca para as amostras compostas por 100%EP foram aproximados aos encontrados por Silva (2019), no estudo do potencial de aplicação de escamas de peixes em processos termoquímicos, com valores de 5,36%.

Em condições reais de processos térmicos, estes elementos podem dar origem a óxidos, hidróxidos e carbonatos, como CaO, Ca(OH)₂ e CaCO₃, os quais impactam positivamente a combustão e/ou o funcionamento de usinas térmicas, agindo como catalisador em processos de queima, contribuindo para a redução nas emissões de CO₂. Entretanto, os níveis desses elementos traço foram inferiores em comparação aos outros componentes das escamas de peixes (Silva et al., 2019).

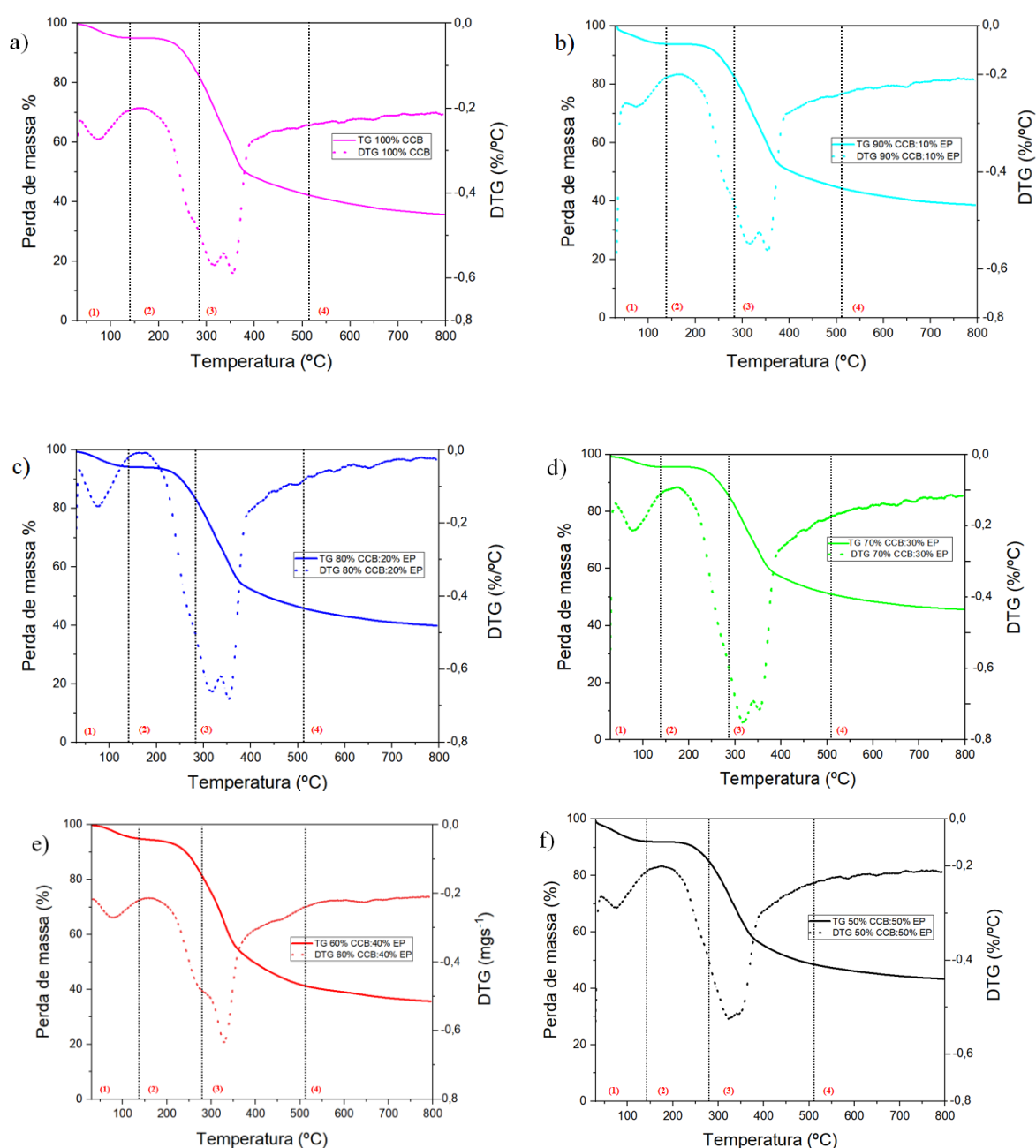
Verificou-se que o teor de enxofre foi mais pronunciado nesse método em comparação à análise elementar. No entanto, os valores percentuais permanecem consistentes com aqueles relatados em outros estudos, como o teor médio de enxofre de 0,12% identificado por Da Silva (2019), quando esta avaliou amostras de podas urbanas (folhas e caules).

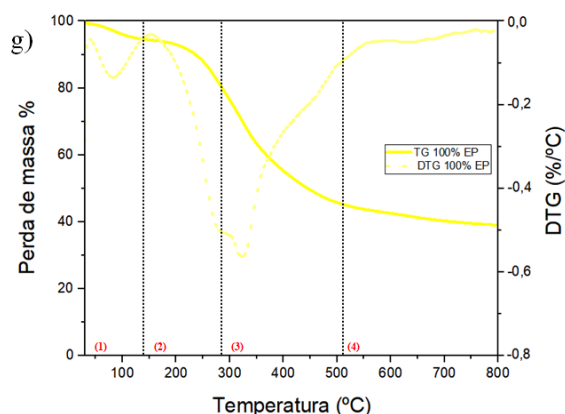
Por conseguinte, é importante destacar que os elementos traços ou oligoelementos detectados neste estudo apresentaram valores próximos a 1,0%, aumentando proporcionalmente à incorporação de escamas de peixes nas diferentes amostras.

6.6 ANÁLISE TÉRMICA (CURVAS TG/DTG E DSC)

A análise das curvas TG/DTG (Figura 16 a-g) revelou os quatro principais estágios de degradação térmica das amostras, divididos com base nas variações identificadas nas curvas, empregando o método de separação por picos térmicos (Cruz *et al.*, 2020).

Figura 16 – Curvas TG/DTG para as amostras de cascas de coco babaçu e escamas de peixes, bem como as misturas, em atmosfera inerte (argônio 5.0): a) 100%CCB; b) 90%CCB:10%EP; c) 80%CCB:20%EP; d) 70%CCB:30%EP; e) 60%CCB:40%EP; f) 50%CCB:50%EP; e g) 100%EP.





Fonte: A autora (2025).

Foram identificados quatro estágios de perda de massa com o aumento da temperatura. O primeiro estágio ocorreu entre 50 e 150 °C e está relacionado à liberação de umidade. Neste estudo, a variação de perda de umidade das amostras analisadas variou entre 8,0 a 12,0%, para as amostras de 100%EP e 50%CCB:50%EP, valores semelhantes aos encontrados por Silva *et al.* (2019), para o potencial de aplicação de escamas de peixes em processos termoquímicos, com valor para a perda de massa no primeiro estágio da ordem de 13,6%, caracterizando a evaporação da umidade como um processo endotérmico.

Ademais, as composições contendo maiores proporções de cascas de coco babaçu (90%CCB:10%EP e 100%CCB) apresentaram valores de perda de umidade de 10,0 e 12,6%, respectivamente. Em contrapartida, o valor de perda de massa média obtida por Monroe *et al.* (2024) para as cascas de coco verde e escamas de peixes, apresentou-se inferior aos encontrados nesta pesquisa, ou seja, da ordem de 7,02%. Esta diferença associa-se à baixa higroscopicidade e estrutura lignocelulósica densa das cascas de coco babaçu, limitando a retenção de umidade e resultando em perdas menores desta (Islam *et al.*, 2018).

Os segundos e terceiros estágios de perda de massa ocorreram entre 150 e 260 °C e entre 260 e 530 °C, respectivamente. No segundo estágio ocorreu a degradação térmica dos materiais voláteis de base leve, como hidrogênio, oxigênio e monóxido de carbono, gerando uma perda de massa de 14,86% para as amostras contendo 100%EP, valor não obstante encontrado por Silva *et al.* (2019), cujo avaliou o potencial termoquímico de escamas de peixes, com uma perda de massa de 15,38%. A diferença da perda de massa neste estágio ocorre devido à diversos fatores, por exemplo, a proporção de proteínas minerais e lipídios, influenciando na degradação térmica e pequenas variações nessa faixa de temperatura.

Para a amostra contendo 70%CCB:30%EP obteve-se valor de 31,0% de perda de material volátil, conteúdo inferior ao encontrado por Monroe *et al.* (2024) para as amostras de coco verde. Estes estágios estão associados à decomposição térmica da hemicelulose e celulose,

principais componentes da biomassa vegetal, também sendo denominados holocelulose, a qual pode ser evidenciada pela presença de um “ombro” na curva DTG em torno de 310 °C ou deslocado para 320 °C, dependendo de cada espécie de biomassa (Cruz *et al.*, 2019).

Ademais, Yang *et al.* (2018) destacaram que a decomposição da hemicelulose ocorre entre 220 e 315 °C, celulose entre 315 e 400 °C, da lignina entre 160 e 900 °C. Alguns fatores podem contribuir para a variação de temperatura, como as taxas de aquecimento, massa da amostra e transferência de calor e massa. Tal comportamento justifica a ocorrência dos diferentes estágios de oxidação das biomassas apresentados nas curvas TG/DTG (Monroe *et al.*, 2024).

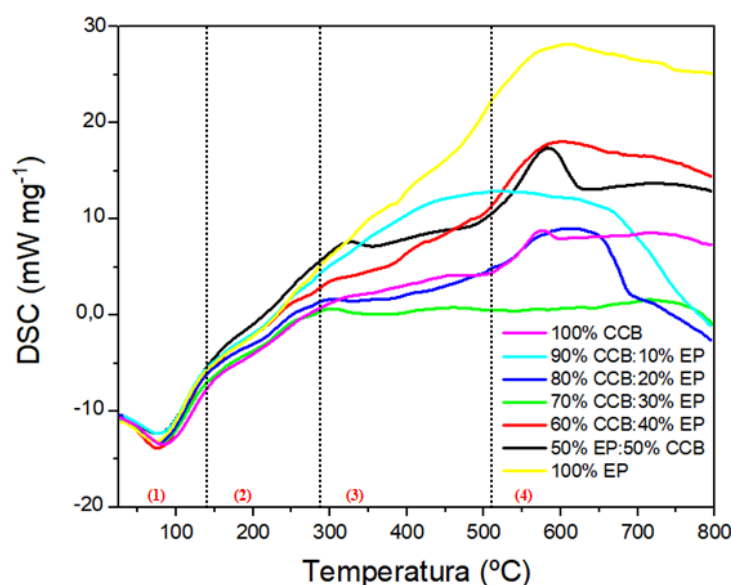
O quarto estágio ocorreu entre 530 e 800 °C e está relacionado à formação do carbono fixo, composto este presente na formação de componentes com elevado teor energético (Monroe *et al.*, 2018). O restante do carbono presente nas biomassas foi liberado na forma de materiais voláteis (condensáveis e não-condensáveis) e forma os principais compostos derivados de carbono, ou seja, o monóxido de carbono (CO) e dióxido de carbono (CO₂) (Monroe *et al.*, 2024).

Além disto, o último estágio expõe a presença de lignina nas amostras contendo na maioria destas cascas de coco babaçu (100%CCB, 90%CCB:10%EP e 80%CCB:20%EP), confirmadas pelas mudanças de perfis térmicos nas curvas TG/DTG. Esta estrutura associa-se à celulose presente na parede celular de organismos vegetais, cuja função é conferir rigidez à planta (Mitu *et al.*, 2019).

Após as análises termogravimétricas, as amostras puras de escamas de peixes (100%EP) e cascas de coco babaçu (100%CCB) exibiram uma perda de massa média de aproximadamente 42,3% em relação ao valor inicial. O material remanescente pós processo de pirólise é o biocarvão, que contém carbono e cinzas em sua composição. Esse resultado era esperado, pois, nessas condições, há apenas a remoção da umidade (evaporação) e liberação de compostos voláteis (devolatilização), permanecendo predominantemente carbono fixo (carbonização) na amostra (Da Silva *et al.*, 2021).

As curvas DSC (Figura 17) complementam as análises fornecendo informações adicionais sobre o comportamento energético das biomassas durante a variação de temperatura.

Figura 17 – Curvas DSC em atmosfera inerte (argônio 5.0) para as amostras de cascas de coco babaçu, escamas de peixes e as respectivas blends.



Fonte: A autora (2025).

As curvas DSC (Figura 17) evidenciaram um fluxo de energia das biomassas, apresentando eventos endotérmicos e exotérmicos. Todas as amostras apresentaram um processo endotérmico até a faixa de 150 °C, associado à perda de umidade, relatadas na ordem de 12,56% para as amostras contendo na maioria destas escamas de peixes (100%EP e 50%EP:50%CCB), além de uma possível transição endotérmica próxima aos 350 °C. Estes valores foram semelhantes aos obtidos por Silva *et al.* (2019), quando da avaliação de escamas de peixes heterogêneas para aplicação em processos termoquímicos, obtendo valores na ordem de 12,10%. Em contrapartida, os picos exotérmicos estão presentes entre a temperatura de 570 e 620 °C. Os valores dos picos exotérmicos foram semelhantes aos encontrados por Silva *et al.* (2019), obtendo valores entre 435 e 640 °C para escamas de peixes. Em concomitância, as amostras contendo 60%CCB:40%EP e 70%CCB:30%EP exibiram picos exotérmicos entre as temperaturas de 585 e 595 °C, respectivamente.

A análise das curvas TG/DTG e DSC também forneceu informações fundamentais sobre o comportamento energético das biomassas durante o processo de termoconversão. Os picos endotérmicos indicaram a energia consumida pela biomassa na evaporação da umidade, enquanto, os picos exotérmicos corresponderam à liberação de energia durante a decomposição de componentes estruturais, como holocelulose e lignina para as amostras puras de coco babaçu e, para as amostras de escamas de peixes, à decomposição de compostos orgânicos e inorgânicos presentes, como proteínas e lipídios, que ocorreram a temperaturas elevadas, liberando calor durante o referido processo (Mitu *et al.*, 2019). De acordo com Da Silva (2022),

esses processos são essenciais para otimizar as tecnologias de aproveitamento energético de diferentes biomassas, como combustão e/ou pirólise, aumentando o rendimento energético das mesmas.

Quando comparados com outros estudos sobre biomassa, os resultados deste trabalho são consistentes com os encontrados por Silva *et al.* (2019) e Monroe *et al.* (2024), que investigaram a decomposição térmica de diferentes tipos de biomassas, como escamas de peixes e cascas de coco verde (separadas e/ou combinadas), respectivamente, e encontraram faixas de decomposição térmica semelhantes. Essas comparações evidenciaram a importância da análise térmica para caracterizar o comportamento das diferentes biomassas durante variados processos de termoconversão.

Em síntese, a análise térmica das amostras revelou a decomposição das principais frações da biomassa (puras e/ou misturas), com ênfase na liberação de umidade, degradação térmicas dos materiais voláteis de base leve ou pesados (bio-óleo e/ou *syngas*), e retenção do carbono fixo (*biochar*). Esses dados são essenciais para entender o comportamento energético das biomassas e têm grande aplicação em processos termoquímicos, como pirólise, combustão e/ou gaseificação, voltados para a produção de bioenergia.

7 CONCLUSÃO

A crescente busca por fontes de energia renováveis e a necessidade de minimizar impactos socioambientais motivaram a investigação do potencial bioenergético das cascas de coco babaçu (CCB) e escamas de peixes (EP), bem como as misturas em diferentes proporções destas. Os resultados confirmaram a viabilidade dessas biomassas para a geração de bioenergia, contribuindo para a redução da poluição e do desperdício na região estudada.

A análise da composição elementar e imediata revelou altos teores de carbono e oxigênio, elementos fundamentais para a produção de biocombustíveis, e elevados níveis de materiais voláteis, com destaque para as amostras 100%EP (72,26%) e 60%CCB:40%EP (72,07%), indicando excelente potencial para processos termoquímicos como pirólise e/ou gaseificação.

As propriedades morfológicas e estruturais das amostras analisadas por MEV/EED e DRX, permitindo identificar a presença de compostos estruturais como colágeno e hidroxiapatita nas misturas com maiores teores de escamas de peixes (100%EP e 50%CCB:50%EP). Tais características aumentam o valor agregado dos resíduos e ampliam as aplicações das mesmas para além da geração de energia, como em materiais biomédicos e Engenharia de tecidos.

Os poderes caloríficos superiores (PCS) indicaram uma boa viabilidade energética, especialmente, para as amostras com maiores proporções de CCB: 100% (17,26 MJ kg⁻¹) e 90% (16,75 MJ kg⁻¹). O FTIR confirmou a presença de grupos funcionais essenciais para a conversão bioenergética, corroborando a eficiência das biomassas estudadas.

As curvas TG/DTG e DSC demonstraram a estabilidade térmica e o comportamento energético das amostras durante a termoconversão. Foi observado que a decomposição térmica ocorre em múltiplas etapas, com liberação de compostos voláteis e retenção de carbono fixo na forma de biochar, produto essencial para aplicações energéticas.

Por fim, o estudo evidencia o potencial das cascas de coco babaçu e escamas de peixes como fontes viáveis de bioenergia, com propriedades comparáveis a outras biomassas já empregadas em processos industriais. Ademais, a valorização desses resíduos pode impulsionar a economia circular e contribuir para a redução dos impactos ambientais, promovendo um desenvolvimento mais sustentável na região litorânea brasileira.

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Diante dos diversos fatores que envolvem o estudo do potencial energético da biomassa de coco babaçu e escamas de peixes, propõem-se algumas sugestões para trabalhos futuros e/ou alternativas de aprimoramento desta análise:

- O teor de umidade presente na matéria orgânica influencia significativamente a eficiência energética dos biocombustíveis. Para minimizar essa limitação, sugere-se investigar técnicas de pré-tratamento térmico ou a mistura com outras biomassas de menor teor de umidade, criando *blends* otimizadas para combustão e/ou pirólise;
- Considerando a disponibilidade dessas biomassas em regiões litorâneas e a potencial aplicação energética destas, recomenda-se a compactação dos resíduos para a formação de peletes ou briquetes, reduzindo volume e facilitando o transporte e armazenamento;
- Estudos sobre a viabilidade técnica e econômica da produção desses biocombustíveis compactados seriam essenciais para a aplicação comercial dos mesmos;
- Uma das principais limitações de estudos laboratoriais é a dificuldade de transpor os resultados para escalas industriais. Portanto, sugere-se a realização de experimentos em unidades piloto para avaliar o desempenho das blendas de coco babaçu e escamas de peixes em processos de combustão, gaseificação e/ou pirólise, analisando a viabilidade técnica e econômica das amostras;
- A implementação da tecnologia de blendas como alternativa energética renovável exige o apoio de políticas governamentais. Pesquisas futuras podem abordar estratégias para a inserção dessas biomassas na matriz energética nacional, incentivando a criação de pequenas usinas bioelétricas em nível regional. Além disso, a integração dessas biomassas em cadeias produtivas locais pode contribuir para a economia circular e a descarbonização do setor energético.

REFERÊNCIAS

ABRAF (Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas). **Anuário Estatístico da ABRAF 2012: Ano Base 2011**. Brasília: ABRAF, 2012. 145 p.

AGUIAR, E. S. **Panorama da disposição de resíduos sólidos urbanos e sua relação com os impactos socioambientais em estados da Amazônia brasileira**. 2021. DOI: 10.1590/2175-3369.013.e20190263.

ARARUNA, F. O. **Amido de Mesocarpo de *Attalea speciosa* Mart. ex Spreng. (Babaçu) na Fabricação de Filmes Cicatrizantes**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Maranhão, 2021.

ARDILA, Y. C. **Gaseificação da biomassa para a produção de gás de síntese e posterior fermentação para bioetanol: modelagem e simulação do processo**. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, 2015.

BEZERRA, W. B. A. *et al.* **Caracterização de Escamas de Pirarucu e Compósitos Reforçados com Escamas de Pirarucu por DRX, EDS e MEV**. Anais do Congresso Anual da ABM, vol. 73, p. 917-924. São Paulo, 2018.

BRANCO, L. G. B. **Biocombustíveis: Vantagens e Desafios**. Revista Eletrônica de Energia, vol. 03, p. 16-33, 2013.

CAI, Z. *et al.* **Gender and attitudes toward technology use: A meta-analysis**. Computers & Education, 2017. DOI: 10.1016/j.compedu.2016.11.003.

CARVALHO, J.S. **Análise Imediata e Avaliação do Poder Calorífico Superior da Biomassa de Carnaúba com Diferentes Aglutinantes para uso em Forno Industrial**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.

CESTONARO, T. **Interaction between the gut microbiome and diet in metropolitan Sao Paulo dwellers and rural Amazonian riverine**. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, 2022.

COSTA, C. L. **Caracterização Físico-Química de Óleos Fixos Artesanais do Coco Babaçu (*Orbignya phalerata*) de Regiões Ecológicas do Estado do Maranhão, Brasil**. Vol. 20, pp. 27-38, 2015.

COSTA, C. L.; FRANÇA, E. T. R.; SANTOS, D.S.; COSTA, M. C. P.; BARBOSA, M. C. L.; NASCIMENTO, M. D. S. B. **Caracterização Físico-Química de Óleos Fixos Artesanais do Coco Babaçu (*Orbignya phalerata*) de Regiões Ecológicas do Estado do Maranhão**. Pesquisa em Foco, 2016. DOI: 10.18817/pef.v20i1.711.

CRUZ, G. **Características físico-químicas de biomassas lignocelulósicas e a correlação entre suas emissões e os resíduos gerados sob diferentes condições atmosféricas em um forno tubular de queda livre (DTF)**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

DABOOR, S. M. *et al.* **Isolation and activation of collagenase from fish processing waste, Bioscience and Biotechnology**. n.3, p. 191-203, 2012.

DE CARVALHO, V. S. **Estudo da cinética da pirólise da cana energia da espécie *Saccharum robustum* Linnaeus mediante análise termogravimétrica**. Tese de Doutorado. 2017.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Babaçu: Programa Nacional de Pesquisa**. Departamento de Orientações e Apoio à Programação de Pesquisa. Brasília, Brasil, 89 p, 2020.

EPE (Empresa de Pesquisa Energética). **Anuário Factsheet**. 2021. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/anuario-factsheet.pdf>>. Acesso em: 26 jan. 2025.

EPE (Empresa de Pesquisa Energética). **Atlas de Eficiência Energética Brasil 2024**. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/atlas-de-eficiencia-energetica-brasil-2024>>. Acesso em: 26 jan. 2025.

FROEHLICH, C. **Publicações internacionais sobre sustentabilidade**: uma revisão de artigos com o uso da técnica de análise de conteúdo qualitativa. Revista de Administração da UFSM. v. 7, n.2, 2014.

GHALY, A.; RAMAKRISHNAN, V. V.; BROOKS, M. S.; BUDGE, S. M. **Fish Processing Wastes as a Potential Source of Proteins, Amino Acids and Oils: A Critical Review**. Journal of Microbial & Biochemical Technology, 2013. DOI: 10.4172/1948-5948.1000110.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). **Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura** 2016. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9105-producao-da-extracao-vegetal-e-da-silvicultura.html>>. Acesso em: 15 jan. 2025.

IPHAN (Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional). **O universo cultural da palmeira babaçu**. 2017. Disponível em: <http://portal.iphan.gov.br/uploads/publicacao/universo_cultural_da_palmeira_babacu.pdf>. Acesso em: 16 dez. 2024.

ISLAM, R. *et al.* **Hand gesture feature extraction using deep convolutional neural network for recognizing American sign language**. In: 4th International Conference on Frontiers of Signal Processing (ICFSP). IEEE, 2018. p. 115-119.

LEVER, Peter; HAINES, Jean; ROUQUEROL, Edward L.; CHARLESLEY, Paul Van Eckerens; BURLETT, Donald J. ICTAC nomenclature of thermal analysis (IUPAC Recommendations 2014). 2014.

LIMA, M. F. **Estudo do Comportamento do Mesocarpo de Coco Babaçu na Forma de Biofilmes Aditivados com Compostos Antioxidantes – Cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*)**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2019.

LIMA, R. C.; DE CARVALHO, A. P. A.; DA SILVA, B. D.; TORRES-NETO, L.; DE FIGUEIREDO, M. R. S.; CHAVES, P. H. T.; DE ALMEIDA, A. E. C. C.; CONTE-JUNIOR, C. A. **Green Ultrasound-Assisted Extraction of bioactive compounds of babassu (*Attalea speciosa*) mesocarp: effects of solid-liquid ratio extraction, antioxidant capacity, and antimicrobial activity.** Applied Food Research, v. 3, p. 100331, 2023.

LOPES, J. R.; OLIVEIRA, J. A. C.; ESTEVES, A. A. **Síntese e caracterização de pós de hidroxiapatita $[CA_{10}(PO_4)_6(OH)_2]$ obtidas a partir do processo sol-gel.** Revista Foco, v. 6, n. 8, 2015.

LOPES, R. F.; MELLO, J. C. C. B. S. de; SILVA, I. M. da. **Analysis of efficiency of biodiesel production in a laboratory scale using a Network Data Envelopment Analysis - DEA methodology.** Revista Eletrônica Em Gestão, Educação E Tecnologia Ambiental, n. 22, 2018. DOI: 10.5902/2236117032229.

LOURENÇO, V. A. **Produção de Biocombustíveis a partir de Resíduos e Efluentes da Indústria Arrozeira: Biodiesel e Metano.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pelotas, 2020.

MENDEZ, C. F. **Alocação de energia em peixes de duas categorias tróficas em uma área de várzea na Amazônia Brasileira.** Dissertação (Mestrado) – Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, 2017.

MENONCIN, M.; SILVA, I. C. R.; ASSOLARI, F. R.; BELINI, U. L. **Biomassa como Matéria-Prima Renovável: Obstáculos para Utilização.** IX Sustentável, vol. 9, n. 5, p. 125-139, 2023.

MILANEZ, A. Y.; MANCUSO, R. V. **Biocombustíveis.** Agendas Setoriais para o Desenvolvimento, p. 89-104, 2018.

MIRANDAS, N. M.; MATTOS, U. A. O. **Revisão dos Modelos e Metodologias de Coleta Seletiva no Brasil.** Sociedade e Natureza, v. 30, n. 02, p. 1-22. 2018.

MITU, M., ISLAM, M. A., RAHMAN, M. S. *et al.* (2019). **Pyrolysis Kinetics study on waste particle residue from particle board industry.** J Indian Acad Wood Sci. DOI: 10.1007/s13196-019-00236-x.

MONROE, A. P. R. *et al.* **Evaluation of the Bioenergy Potential of Blends (Green Coconut Shells and Fish Scales) as a Feedstock in Thermochemical Processes for Clean Energy Production.** Processes, v. 12, n. 4, p. 710, 2024.

NARITA, C. Y. **Carvões ativados a partir de resíduo de coco verde por diferentes ativadores:** obtenção, caracterização e aplicações. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.

NASCIMENTO, M. C.; MARCHI, C. M. D. F.; PIMENTEL, P. C. B. **Proposição de metodologia em educação ambiental para minimizar impactos de resíduos sólidos em ecossistema de manguezal.** PerCursos, Florianópolis, vol. 19, n. 41, p. 158–178, 2019. DOI: 10.5965/1984724619412018158.

NOGUEIRA, I. B. **Conversão de Resíduos Agroindustriais na Produção de Bioemulsificantes por *Stenotrophomonas maltophilia* UCP 1601 e Aplicação na Remoção de Poluentes Hidrofóbicos.** 2019. Dissertação (Mestrado) – Universidade Católica de Pernambuco.

NOZELA, W. C. *et al.* **Kinetic study of the energetic reuse from torrefied sewage sludge and urban pruning blends.** Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, v. 0123456789, 2018. DOI: 10.1007/s10973-018-7534-y.

OLIVEIRA, J. F. **Composição e estrutura trófica de peixes em reservatórios no semiárido neotropical.** Dissertação (Doutorado) - Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2017.

OLIVEIRA, V. D. *et al.* **Mulheres do babaçu:** gênero, maternalismo e movimentos sociais no Maranhão. 2013. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Fluminense, 2013.

PEREIRA, L. M.; BORGES, A. W. **Os biocombustíveis no plano nacional de energia e a garantia do direito fundamental ao ambiente equilibrado**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, 2018.

PEREIRA, S. S. **Uso de indicadores na gestão dos resíduos sólidos urbanos: uma proposta metodológica de construção e análise para municípios e regiões**. 2018. DOI: 10.1590/S1413-41522018162872.

PEREIRA, T. M. d. M. **Caracterização térmica (TG/DTG, DTA, DSC, DSC-fotovisual) de hormônios bioidênticos (estriol estradiol)**. 2013. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

PETRICOSKI, S. M. *et al.* **Briquettes produced with a mixture of urban pruning waste, glycerin and cassava processing residue**. J. Agric. Sci., v. 12, p. 158-169, 2020.

Piscicultura PEIXE BR 2021. São Paulo: PEIXE BR, 2022. Disponível em: <<https://www.peixebr.com.br/anuario-2021/>>. Acesso em: 12 jan. 2025.

PORTELLA, A. C. **Efeito da sazonalidade na reprodução de peixes Characiformes em um rio Neotropical**. 2012. DOI: 10.1590/1678-4766e2021012.

PROTÁSIO, T. P. *et al.* **Relação entre o poder calorífico superior e os componentes elementares e minerais da biomassa vegetal**. Pesquisa Florestal Brasileira, v. 31, n. 1, p. 113-122, 2011.

RASAM, S. *et al.* **Thermal behavior, thermodynamics and kinetics of copyrolysis of binary and ternary mixtures of biomass through thermogravimetric analysis**. Fuel, 2020, May, p. 118665, 2020. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.118665.

REY, J. R. C. **Avaliação Técnico-Econômica da Incorporação de Ciclos Combinados Associados à Gaseificadores de Leito Fluidizado Circulante no Setor Sucroalcooleiro**. Dissertação (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2018.

RODRIGUES, A. L. P., Caracterização físico-química de biomassa lignocelulósica para utilização em sistemas de conversão termoquímica com fins energéticos. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente). Universidade CEUMA. São Luís – MA, 2018.

RODRIGUES, A. P. O.; LIMA, A. F.; ALVES, A. L.; ROSA, D. K.; TORATI, L. S.; SANTOS, V. R. V. dos. **Piscicultura de água doce: multiplicando conhecimentos**. Brasília, DF, 2013.

RUSCH, F. et al. **Energy properties of bamboo biomass and mate coproducts**. SN Applied Sciences, v. 3, n. 6, p. 1-8, 2021.

RUSCHEL, C. F. C. *et al.* **Análise exploratória aplicada a espectros de reflexão total atenuada no infravermelho com transformada de Fourier (ATR-FTIR) de blendas de biodiesel/diesel**. *Química Nova*, v. 37, n. 5, p. 810-815, 2014.

SANTANA JÚNIOR, C. C. **Utilização de Biomassas Lignocelulósicas da Amazônia Legal para Produção de Bioprodutos em um Contexto Econômico e Socioambiental**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2020.

SANTOS, J. A. A. **Avaliação da atividade cicatrizante do babaçu (*Attalea speciosa* Mart. ex Spreng, Arecaceae) a partir do seu uso etnomedicinal**. Dissertação (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco, 2020.

SCHVADE, D. C. **Produção de biocarvão a partir de biomassa de babaçu visando a aplicação agrícola**. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Unisinos, São Leopoldo. 2023.

SEAFOOD BRASIL. **Consumo de peixe no Brasil**. 2022.

SILVA, A. V. S.; TORQUATO, L. D. M.; CRUZ, G. **Potential application of fish scales as feedstock in thermochemical processes for the clean energy generation**. *Waste Management*, Vol. 100, pp. 91-100, 2019.

SILVA, I. D. N.; ALMEIDA, J.M.F.D.; FERNANDES, N.S. **Kinetic study in removal of dye in Aque-ous solution by the Babassu Coconut Charcoal modified with citric acid**. Periodico Tche Quimica, v. 14, n. 28, pp. 42-49, 2017.

SOUSA, A. A. R. **Gaseificação de Pellets do Bagaço de Cana-de-Açúcar para Obtenção de Energia Limpa e de Alto Poder Calorífico**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Tecnologia em Produção Sucroalcooleira) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2019.

SOUSA, M. R. A. et al. **Modificação Química do Mesocarpo do Coco Babaçu com o Polímero Tetrametil-2,6-Bromoioneno para Adsorção do Pesticida Paration Metílico**. São Luís – MA, 2017.

SOUZA, A. C. F. *et al.* **Piscicultura no Estado do Maranhão: Perspectivas para aceleração da produção de peixes nativos**. Scientia Plena, v. 18, n. 2, 2022.

SOUZA, D. R. *et al.* **Comparativo de Análise Elementar de Cascas de Coco Babaçu e Cascas de Castanha de Caju**. Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agricultura, Palmas, TO, 2019.

TEIXEIRA, M. A. **Biomassa de Babaçu no Brasil**. São Paulo, 2020. Disponível em: <<http://www.proceedings.scielo.br/pdf/agrener/n4v1/032.pdf>>. Acesso em: 06 de dez. de 2024.

WERTHER, J. et al. **Combustion of agricultural residues**. Progress in Energy and Combustion Science, v. 26, n. 1, p. 1-27, 2000.

YANG, B. *et al.* **The characteristics of air pollutants from the combustion of biomass pellets**. Energy Sources, Part A Recovery, Util. Environ. Eff., v. 40, p. 351-357, 2018.