

MODELAGEM CONCEITUAL DE SISTEMA DE PRÉ-PROCESSAMENTO POR GRANULAGEM: COMPACTAÇÃO E UNIFORMIZAÇÃO DE BIOMASSAS AMAZÔNICAS PARA PIRÓLISE EM ESCALA DE BANCADA

Wilson Rosa da Rocha, wilson.rocha@unifesspa.edu.br¹

Janaína Damacena Siqueira, janaina.siqueira@unifesspa.edu.br²

Ana Beatriz Fernandes Moraes, byafmoraes@unifesspa.edu.br³

Yasmim Percia Melo Cruz, yasmimpercia@unifesspa.edu.br⁴

Breno Ebinuma Takiuti, takiuti@unifesspa.edu.br⁵

Pedro Christian Ayala Castillo, pedro.ayala@unifesspa.edu.br⁶

UNIFESSPA, Folha 17, Nova Marabá; 68.506-030, Marabá/PA¹

Resumo. Este trabalho apresenta o desenvolvimento conceitual de um sistema automático de pré-processamento de biomassas amazônicas para otimizar a alimentação de reatores de pirólise em bancada. Na fase de projeto informacional, aplicou-se o Desdobramento da Função-Qualidade (QFD) para converter demandas de pesquisadores, professores e operadores do Laboratório de Práticas e Tratamento de Materiais (LPTM) em especificações técnicas — controle de umidade, granulometria, eficiência energética e robustez. No projeto conceitual, utilizou-se brainstorming para gerar ideias, estruturando a função global em cinco subfunções, detalhadas em uma Estrutura Funcional e exploradas por matriz morfológica. A seleção ocorreu via matriz de avaliação, ponderando critérios de eficiência, granulometria, robustez, custo, manutenção, automação e flexibilidade. As tecnologias finalistas serão modeladas em CAD, fechando o ciclo metodológico. Espera-se ter até duas alternativas conceituais que trabalhem com as biomassas amazônicas seguintes: açaí, dendê, cacau, babaçu, macauba e o Buriti, dos Estados do Pará e Maranhão. Este equipamento será capaz de reduzir umidade a 10–20%, produzir partículas de 0,5–3 mm, operar com alta eficiência energética e oferecer facilidade de operação e manutenção, promovendo a viabilidade técnico-econômica da conversão de biomassas amazônicas em bio-óleos.

Palavras chave: Biomassa; Granulagem; Projeto Informacional; Projeto Conceitual; Granulometria.

Abstract. This paper presents the conceptual development of a pre-processing system for Amazonian biomass to optimize the feeding of benchtop pyrolysis reactors. In the Informational Design phase, Quality Function Deployment (QFD) was applied to convert demands from researchers, professors, and operators of the Laboratory of Practices and Materials Treatment (LPTM) into technical specifications — moisture control, particle size, energy efficiency, and robustness. In the Conceptual Design, brainstorming was used to generate ideas, structuring the global function into five subfunctions, detailed in a Functional Structure and explored by Morphological Matrix. The selection occurred via Evaluation Matrix, weighing criteria of efficiency, particle size, robustness, cost, maintenance, automation, and flexibility. The finalist technologies will be modeled in CAD, closing the methodological cycle. Up to two conceptual alternatives are expected to work with the following Amazonian biomasses: açai, dendê, cocoa, babassu, Macauba and Buriti, from the states of Pará and Maranhão. This equipment will be capable of reducing moisture to 10–20%, producing particles of 0.5–3 mm, operating with high energy efficiency and offering ease of operation and maintenance, promoting the technical-economic feasibility of converting Amazonian biomasses into bio-oils.

Keywords: Biomass; Granulation; Informational Project; Conceptual Project; Granulometry.

1. INTRODUÇÃO

A crescente necessidade de diversificação da matriz energética global e a urgência de reduzir as emissões de gases de efeito estufa têm colocado em destaque o aproveitamento de fontes renováveis, especialmente aquelas derivadas de resíduos agroindustriais e florestais. No contexto amazônico, a elevada disponibilidade de biomassas lignocelulósicas — como caroço de açaí (*Euterpe oleracea* Mart.), cacho de dendê (*Elaeis guineensis* Jacq.), casca de cacau (*Theobroma cacao* L.), mesocarpo de babaçu (*Attalea speciosa* Mart.), fibra de macaúba (*Acrocomia aculeata*) e casca/polpa de buriti (*Mauritia flexuosa*) — apresenta uma janela de oportunidade única para gerar energia de forma descentralizada,

fomentando o desenvolvimento regional e reduzindo impactos logísticos e ambientais associados ao transporte de matéria-prima.

Entretanto, para que a conversão termoquímica da biomassa em bio-óleos e gases por meio da pirólise rápida alcance elevados rendimentos e qualidade consistente, é imprescindível que o material vegetal passe por um pré-processamento rigoroso. Partículas com granulometria muito fina (menores que 0,5 mm) podem ser levadas pelo fluxo de gases, reduzindo o rendimento líquido de bio-óleo, enquanto partículas muito grossas (acima de 3 mm) geram gradientes térmicos desfavoráveis, resultando em formação excessiva de biochar e heterogeneidade no produto final. A literatura aponta faixas intermediárias, entre 0,5 mm e 3 mm, como o compromisso ideal entre eficiência térmica e rendimento energético (MORAIS, 2021).

Além disso, o teor de umidade da biomassa deve ser mantido entre 10% e 20%, pois valores mais altos elevam drasticamente o consumo energético na secagem, enquanto teores muito baixos (inferiores a 10%) podem aumentar o atrito mecânico e o desgaste de equipamentos (SOARES, 2016). Com base nesses requisitos, propõe-se avaliar, ao longo das etapas de desenvolvimento conceitual, quatro módulos principais de um sistema automatizado de pré-processamento: secagem, pré-trituragem, peneiramento e moagem fina.

Na fase de secagem, serão comparadas alternativas como secador de leito fluidizado, secador rotativo e estufa com recirculação de ar, visando manter o teor de umidade entre 10% e 20% com monitoramento contínuo de umidade (Liu, 2014). Na pré-trituragem, serão avaliados moinhos de facas, trituradores de martelos e rotores cilíndricos, focando na redução de partículas brutas (até 50 mm) para tamanhos intermediários (5–10 mm) (HENNEBERRY, 2016). O sistema de peneiramento será composto por peneiras vibratórias em série (3 mm, 1,5 mm e 0,5 mm), com recirculação automática das frações fora da faixa desejada. Por fim, na moagem fina, compara-se moinhos de facas, de martelos e de discos, considerando monitoramento de torque por sensor de microssistemas eletromecânicos (Micro–Electro–Mechanical Systems) para otimizar o consumo de energia e minimizar geração de finos indesejáveis (LI, 2016).

A metodologia adotada segue o Processo de Desenvolvimento Integrado de Produtos (PRODIP), dividindo o trabalho em Projeto Informacional, com aplicação do desdobramento da função-qualidade (Quality Function Deployment) para mapear a “voz do cliente”, e projeto conceitual, utilizando *brainstorming*, estrutura funcional, matriz morfológica e matriz de avaliação para gerar e selecionar as soluções mais promissoras. Espera-se que a configuração resultante apresente alta eficiência energética, granulometria controlada com desvio padrão inferior a 10% e robustez operacional compatível com a variabilidade característica das biomassas amazônicas.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção, apresenta-se o conjunto de conceitos e fundamentos que embasam o desenvolvimento do sistema de pré-processamento de biomassa. Discutem-se aspectos gerais das propriedades físicas e químicas dos materiais lignocelulósicos, os efeitos dessas características sobre processos de conversão termoquímica e a relevância de um planejamento rigoroso na etapa inicial de projeto. O objetivo é fornecer uma visão concisa dos princípios essenciais que sustentarão as escolhas de engenharia ao longo de todo o trabalho.

2.1. Projeto Informacional

O projeto informacional é uma etapa fundamental no desenvolvimento de sistemas mecânicos, pois permite o entendimento detalhado das necessidades do processo, definição de requisitos técnicos e seleção adequada dos materiais e componentes a serem utilizados (BACK, 2008). No contexto do presente trabalho, que visa a alimentação de um reator de pirólise com biomassas da Amazônia, o projeto informacional envolve o levantamento e análise das propriedades físico-químicas das matérias-primas, a fim de garantir eficiência na conversão termoquímica e compatibilidade com o sistema de granulagem.

Para a seleção e dimensionamento de um sistema de preparação de biomassa, torna-se essencial considerar parâmetros como granulometria ideal, teor de umidade e densidade aparente das matérias-primas. Essas variáveis influenciam diretamente o desempenho do reator de pirólise, o rendimento dos produtos e o consumo energético do pré-processamento. Por exemplo, partículas com granulometria inferior a 0,5 mm tendem a ser arrastadas pelos gases durante a pirólise, reduzindo o rendimento de bio-óleo, enquanto partículas maiores que 3 mm dificultam a transferência de calor, aumentando a formação de biochar. Similarmente, o teor de umidade precisa ser reduzido para a faixa de 10% a 20% para evitar perdas térmicas excessivas, expansão de vapor e emissões não desejadas.

A Tabela 1 apresenta os principais dados físico-químicos das seis biomassas selecionadas para este trabalho: açaí, dendê, cacau, babaçu, macaúba e buriti. Essas informações fundamentam a escolha das condições de operação para o sistema de moagem, secagem e alimentação do reator, conforme as referências Silvio (2013) e Silva (2023).

Tabela 1 – Propriedades físico-químicas das biomassas selecionadas

Tipo de Biomassa	Granulometria (mm)	Umidade (%)	Densidade Aparente (kg/m ³)
Açaí (caroço)	0,5 – 3,0	50 – 60	180 – 250

Dendê (cacho)	0,5 – 2,5	45 – 55	200 – 270
Cacau (casca)	0,8 – 2,8	40 – 50	250 – 300
Babaçu (mesocarpo)	1,0 – 3,0	30 – 45	220 – 280
Macaúba (fibra)	0,6 – 2,0	35 – 50	210 – 260
Buriti (casca/polpa)	0,7 – 2,5	40 – 55	230 – 290

Fonte: Adaptado de Silvio (2013) e Silva (2023).

A biomassa lignocelulósica da Amazônia é composta principalmente por celulose, hemicelulose e lignina, cujas proporções variam conforme a matéria-prima, influenciando tanto a resistência mecânica quanto o comportamento térmico. A degradação térmica ocorre em faixas distintas: hemicelulose entre 200 °C e 300 °C, celulose entre 300 °C e 350 °C e lignina entre 250 °C e 500 °C, o que orienta a definição das condições de secagem e pré-aquecimento (SILVIO, 2013). O teor de umidade inicial, que pode variar de 30% a 60%, deve ser reduzido para 10%–20% a fim de minimizar o consumo energético na secagem e evitar a expansão de vapor durante a pirólise. Em relação à granulometria, partículas menores que 0,5 mm tendem a ser arrastadas pelo fluxo de gases, diminuindo o rendimento de bio-óleo, enquanto partículas maiores que 3 mm geram gradientes térmicos desfavoráveis e aumento de biochar; por isso, faixas entre 0,5 mm e 3 mm equilibram transferência de calor e rendimento energético (SILVA, 2023).

Além disso, o projeto informacional utiliza a metodologia do desdobramento da função-qualidade (QFD), que tem por objetivo traduzir a “voz do cliente” — composta por pesquisadores, operadores de laboratório e comunidades extrativistas — em requisitos técnicos mensuráveis. Por meio de entrevistas semiestruturadas, aplicação de questionários e análise de benchmarking, identificaram-se critérios críticos como precisão granulométrica, controle de umidade, eficiência energética e robustez mecânica. Essas informações foram estruturadas na ferramenta conhecida como Casa da Qualidade, onde cada cruzamento entre necessidade do usuário e característica de projeto recebeu uma pontuação de 0 a 5. Os requisitos com maior peso orientaram o detalhamento dos módulos de secagem, trituração e peneiramento, garantindo que as funcionalidades mais críticas recebessem atenção especial, redundâncias técnicas e maior investimento de engenharia (BACK, 2008).

2.2. Projeto Conceitual

O projeto conceitual tem como objetivo converter os requisitos técnicos e funcionais levantados na etapa de Projeto Informacional em soluções de engenharia viáveis, por meio de um fluxo lógico de geração de ideias, estruturação de funções e avaliação quantitativa. Inicialmente, será aplicada a técnica de brainstorming, que consiste em sessões de criatividade em grupo para reunir o maior número possível de propostas sem julgamentos prévios, assegurando que alternativas inovadoras e diversificadas sejam consideradas para os módulos de secagem, pré-trituração, peneiramento, moagem fina e controle/automação (BACK, 2008). Nessas sessões, participam pesquisadores e operadores do Laboratório de Práticas e Tratamento de Materiais (LPTM) da UNIFESSPA, promovendo um ambiente colaborativo que alimenta o processo com diferentes perspectivas e experiências práticas.

Em seguida, procede-se à construção da estrutura funcional, que decompõe a função global “pré-processar biomassa para pirólise” em subfunções elementares — por exemplo, “reduzir teor de umidade” torna-se “secagem”, e “garantir granulometria alvo” divide-se em “pré-trituração”, “peneiramento” e “moagem fina” (BACK, 2008). Essa decomposição assegura rastreabilidade plena entre cada requisito do cliente e a solução técnica correspondente, evitando omissões e facilitando a associação de tecnologias específicas a cada etapa do processo.

Com a estrutura funcional definida, utiliza-se a matriz morfológica, ferramenta que cruza cada subfunção com um conjunto de alternativas tecnológicas, gerando centenas de combinações possíveis e estimulando a descoberta de soluções não óbvias (BACK, 2008). Essa abordagem sistemática garante que todas as ramificações de cada subfunção sejam exploradas antes da seleção final, ampliando o leque de opções e fortalecendo a inovação.

Por fim, adota-se a matriz de avaliação para comparar quantitativamente cada configuração gerada na matriz morfológica contra uma referência neutra. São definidos critérios ponderados — como eficiência energética, precisão granulométrica, robustez mecânica, custo de implementação, facilidade de manutenção, nível de automação e flexibilidade operacional —, aos quais são atribuídos símbolos “+”, “0” ou “–” conforme o desempenho de cada alternativa (MONTGOMERY, 2017). O cálculo dos scores ponderados permite ordenar as opções de forma objetiva e escolher a combinação de tecnologias mais adequada aos requisitos do sistema.

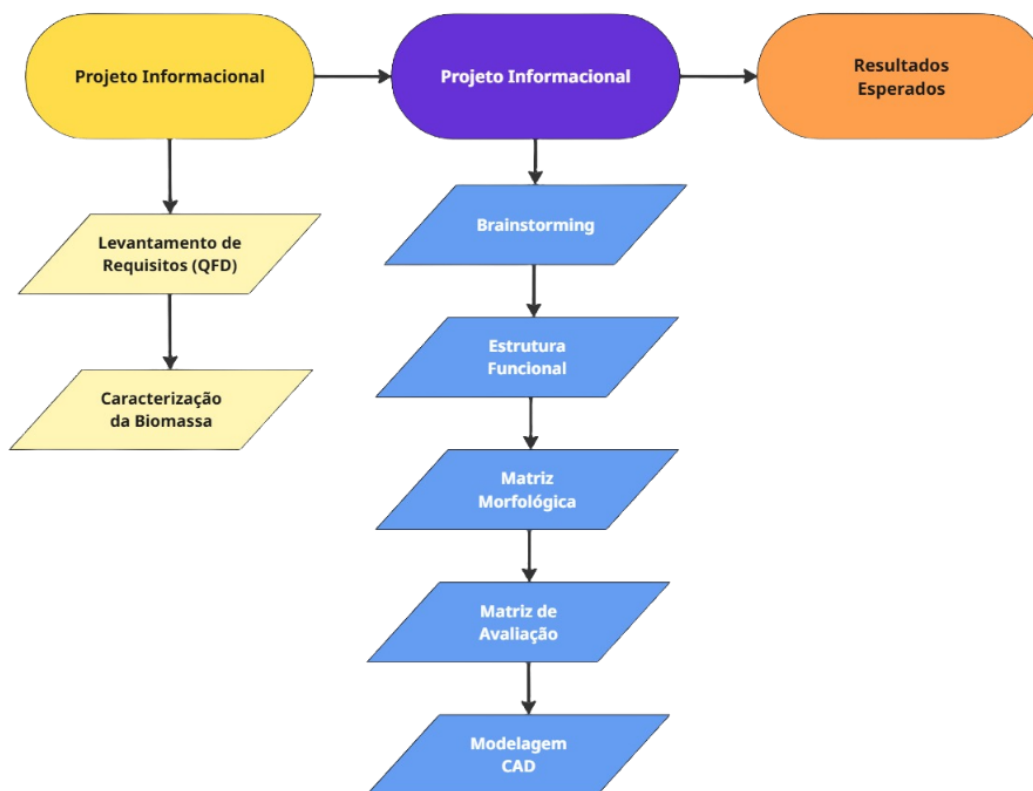
3. METODOLOGIA

A metodologia adotada neste trabalho integra etapas sequenciais e interdependentes, conforme ilustrado no Fluxograma Metodológico da Figura 1. No projeto informacional, realiza-se o levantamento de requisitos (QFD), aplicando o desdobramento da função-qualidade para converter as expectativas dos pesquisadores e operadores do LPTM em requisitos técnicos mensuráveis (controle de umidade, granulometria, eficiência energética e robustez mecânica). Na

sequência, procede-se à caracterização da biomassa, com ensaios físicos e químicos (teor de umidade, densidade aparente e composição lignocelulósica) das seis matérias-primas selecionadas, de modo a definir as condições iniciais de secagem e trituração.

No projeto conceitual, conduz-se primeiro o *Brainstorming*, em que a equipe do LPTM gera ideias sobre tecnologias de secagem, pré-trituração, peneiramento, moagem fina e controle/automação; tais ideias são então organizadas na Estrutura Funcional e Matriz Morfológica, que decompõe a função global “pré-processar biomassa para pirólise” em subfunções elementares e cruza cada subfunção com múltiplas alternativas tecnológicas. Por fim, as alternativas construídas são comparadas quantitativamente na Matriz de Avaliação, em que cada conceito é avaliado frente a uma referência neutra segundo critérios ponderados (eficiência, granulometria, robustez, custo, manutenção, automação e flexibilidade). Os dois conceitos de melhor desempenho são então encaminhados para a etapa de Modelagem CAD, completando o ciclo metodológico e fornecendo bases sólidas para a fase experimental subsequente.

Figura 1 – Fluxograma metodológico completo — do levantamento de requisitos aos resultados esperados



Fonte: Elaboração própria.

4. RESULTADOS ESPERADOS

Esta seção apresenta os principais resultados da fase conceitual, convertendo a fundamentação teórica e metodológica em soluções práticas de engenharia. Entre os entregáveis estão as matrizes de desdobramento, registros de brainstorming, estrutura funcional, matriz morfológica e avaliação de alternativas com base em critérios técnicos. O uso do método QFD (BACK et al., 2008) garantiu o alinhamento entre as demandas dos usuários e os requisitos do sistema, orientando escolhas fundamentadas e priorização de funções críticas.

4.1. Caracterização das Biomassas

A caracterização físico-química das biomassas amazônicas utilizadas no estudo — como açaí, dendê e babaçu — é fundamental para orientar o projeto dos módulos de secagem, trituração e peneiramento. Parâmetros como umidade inicial, granulometria bruta e densidade aparente influenciam diretamente na escolha dos mecanismos e no desempenho do sistema. Além de fornecer insumos técnicos para o dimensionamento, esses dados servem como base para validações futuras e garantem que o sistema seja compatível com as variáveis específicas das matérias-primas da região (MORAIS, 2021; SILVA, 2023).

Como base para as etapas subsequentes do projeto, foram realizados ensaios físico-químicos em seis biomassas amazônicas — açaí, dendê, cacau, babaçu, macaúba e buriti — com o objetivo de determinar parâmetros fundamentais para o sistema. Os resultados esperados incluem o teor de umidade inicial, que deve variar entre 30% e 60%, sendo

reduzido para a faixa de 10% a 20% (SILVIO, 2013; SILVA, 2023), além da granulometria bruta e final, com faixas ideais de 0,5 a 3 mm para aplicações em pirólise rápida (MORAIS, 2021), e a densidade aparente, que orienta o dimensionamento de componentes como alimentadores e transportadores. Esses dados, consolidados na Tabela de caracterização das biomassas, apresentada na fundamentação teórica, servirão como insumos diretos para a definição de parâmetros nos módulos de secagem, trituração e peneiramento.

4.2. Matriz de Desdobramento da Função-Qualidade (QFD)

A Matriz QFD foi utilizada para converter as necessidades dos usuários em requisitos técnicos, pontuando criticidade de 0 a 5 (BACK et al., 2008). Com isso, foram priorizados aspectos como precisão granulométrica, controle de umidade e robustez, servindo de guia para decisões de projeto.

A matriz de desdobramento da função-qualidade (*Quality Function Deployment*) consolida as necessidades dos usuários em requisitos de projeto, com pontuação de 0 a 5 conforme criticidade.

Tabela 2: Matriz de Desdobramento do Projeto Informacional

Nº	Entradas	Atividades	Tarefas	Mecanismos	Saídas
1.1	Demanda inicial do projeto	Definir requisitos do cliente para o sistema de granulagem	- Identificar necessidades dos usuários (pesquisadores, alunos, técnicos) - Converter necessidades em requisitos do cliente - Hierarquizar requisitos dos clientes	- Entrevistas e observação em laboratório - <i>Brainstorming</i> com equipe - Matriz de Desdobramento da Função-Qualidade (<i>Quality Function Deployment</i>)	- Lista de necessidades e requisitos priorizados - Documento de requisitos v1.0
1.2	Requisitos dos clientes; estado da técnica	Definir requisitos técnicos do sistema de granulagem	- Converter requisitos dos clientes em requisitos técnicos mensuráveis - Estabelecer especificações-meta - Monitorar a evolução dos requisitos	- Matriz de Desdobramento da Função-Qualidade - Estudo de caso e <i>benchmarking</i> - Reuniões e matriz de rastreabilidade	- Requisitos técnicos detalhados (pressão, tempo, bandejas) - Especificações-meta consolidadas
1.3	Biomassas amazônicas; requisitos técnicos	Caracterizar matérias-primas	- Analisar propriedades físicas (granulometria, densidade aparente) - Analisar propriedades químicas (umidade, cinzas, extrativos)	- Testes de granulometria e densidade aparente - Análise elementar e de umidade	- Relatório físico-químico das biomassas

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Back (2008)

4.3. Desdobramento das Atividades do Projeto Conceitual

As etapas da fase conceitual foram organizadas em uma matriz de atividades que descreve entradas, tarefas, mecanismos e saídas. Essa estruturação permitiu o alinhamento entre os requisitos definidos e a lógica de desenvolvimento adotada, reforçando a rastreabilidade e a clareza do processo. (BACK, 2008)

A tabela a seguir organiza e detalha as principais atividades desenvolvidas na fase de projeto conceitual do sistema de granulação. Seu objetivo é estruturar de forma clara as etapas, entradas, tarefas e saídas, auxiliando na definição dos requisitos do projeto e no alinhamento com as necessidades dos usuários e características técnicas envolvidas.

Tabela 3: Matriz de Desdobramento do Projeto Conceitual

Nº	Entradas	Atividades	Tarefas	Mecanismos	Saídas
3.1	Especificações de projeto	Definir estrutura funcional e gerar alternativas	• Formular função global e subfunções • pesquisar princípios de solução por subfunção	Matriz Morfológica	Estrutura funcional e lista de alternativas
3.2	Estruturas funcionais alternativas	Selecionar estrutura e sintetizar concepções	• Avaliar alternativas segundo requisitos e custo-meta • combinar princípios em configurações-esboço	Brainstorming; CAD básico	Concepções alternativas documentadas
3.3	Concepções alternativas	Triar e priorizar concepções	• Comparar requisitos, custo-meta e riscos • classificar e ranquear soluções	Método de Avaliação; checklist de requisitos	Concepção conceitual selecionada

3.4	Concepção selecionada	Levantar viabilidade de manufatura	• Mapear processos internos/externos • verificar prazos de fornecedores	Benchmarking de processos; reuniões	Plano preliminar de manufatura
3.5	Plano de manufatura e concepção	Avaliar segurança e submeter aprovação de fase	• Conduzir FMEA e propor mitigações • atualizar cronograma e orçamento; assinar aprovação	Normas de segurança; ficha de etapa	Relatório de segurança e ficha de passagem de fase

Fonte: Elaborado pelo autor com base em BACK (2008)

4.4. Registro das Sessões de *Brainstorming*

As sessões de brainstorming resultaram em alternativas técnicas para cada subfunção, como secagem, trituração e controle. As propostas foram descritas com seus parâmetros operacionais e justificativas, baseando-se em critérios de desempenho e viabilidade de aplicação.

Tabela 4: *Brainstorming* – Ideias Selecionadas por Subfunção

Função	Alternativa	Parâmetros	Justificativa
Secagem	Leito fluidizado	150–250 °C; 2–5 m/s	Alta troca térmica; variação de umidade
	Secador rotativo	120–200 °C; 5–20 rpm	Controle de residência
	Estufa Ar forçado	100–180 °C; 10–20% U.R.	Simplicidade construtiva
Pré-trituração	Moinho de facas	1 000–3 000 rpm; abertura 5–10 mm	Granulometria ajustável
	Martelos ajustáveis	2 000–4 000 rpm; martelos intercambiáveis	Alta taxa de redução
	Rotor cilíndrico	Ø200–400 mm; 500–1 500 rpm	Fácil manutenção
Peneiramento	Vibratória série	Malhas 0,5–3,0 mm; amp. 0,5–1,5 mm	Alta eficiência de separação
	Tambor rotativo	Ø1–2 m; 30–100 rpm	Manejo de grandes fluxos
	Óptica por sensor	CMOS 2 MP; 0,5 m/s esteira	Classificação sem contato
Moagem fina	Disco	2 000–6 000 rpm; 0,5–3,0 mm	Baixa geração de finos
	Rolos	10–30 MPa; 100–500 rpm	Eficiência energética elevada
Controle	CLP + IHM	PID; amostragem 1 s	Integração e confiabilidade
	SCADA remoto	OPC UA; latência < 100 ms	Monitoramento distribuído
	Touchscreen	Tela 7"; GUI customizável	Usabilidade intuitiva

Fonte: Elaboração própria.

4.5. Estrutura Funcional

A função global do sistema foi decomposta em subfunções como secagem, pré-trituração, peneiramento, moagem fina e controle. Cada uma foi detalhada com parâmetros técnicos e referências, garantindo alinhamento com os requisitos definidos e facilitando a seleção de soluções (PAHL et al., 2005).

Tabela 5. Estrutura Funcional do Sistema com Parâmetros

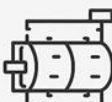
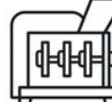
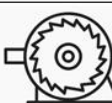
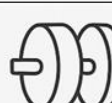
Função	Descrição	Parâmetros	Referência
Secagem	Umidade 10–20% U.R.; controle térmico	120–250 °C; 2–5 m/s	Silvio (2013)
Pré-trituração	Partículas 5–10 mm	500–3 000 rpm; abertura variável	Back (2008)
Peneiramento	Frações 3,0; 1,5; 0,5 mm com recirculação	Malhas múltiplas; vibração 0,5 mm	—
Moagem fina	Granulometria final 0,5–3,0 mm	2 000–6 000 rpm; gap 0,5–3,0 mm	Li (2016)
Controle	Supervisão via CLP+IHM	PID em cascata; amostragem 1 s	Silvio (2013)

Fonte: Elaborado pelo autor com base em (Back et al. 2008).

4.6. Matriz Morfológica

A matriz morfológica relacionou cada subfunção às possíveis alternativas tecnológicas, compondo um panorama das opções viáveis para o sistema. Essa ferramenta permitiu o cruzamento de soluções e a criação de configurações combinadas para análise posterior.

Figura 2. Matriz Morfológica

SUBFUNÇÕES	ALTERNATIVAS			
SECAGEM	 Estufa ar forçado	 Leito fluidizado	 Secador rotativo	 Solar assistida
PRÉ TRITURAGEM	 Desintegrador	 Rotor cilíndrico	 Martelos	 Moinho de facas
PENEIRAMENTO	 Óptica	 Tambor	 Ultrassônica	 Vibratória
MOAGEM FINA	 Disco	 Facas modulares	 Martelos	 Rolos
CONTROLE	 Arduino + Touch	 CLP + IHM	 PLC + Supervisório	 SCADA remoto

Fonte: Elaboração própria.

4.7. Matriz Avaliação

Com base na matriz morfológica, foram selecionadas alternativas que melhor atenderam aos critérios definidos: secador rotativo, desintegrador com facas modulares, peneira vibratória, controle por Arduino e touchscreen. A matriz de avaliação ponderou critérios como eficiência energética, manutenção e flexibilidade, confirmando a viabilidade técnica e operacional da configuração escolhida.

Avaliação quantitativa das alternativas acima serão baseadas conforme a tabela abaixo para a matriz de avaliação.

Tabela 6: Matriz de Avaliação

Critério	Peso	Unidade	Definição	Conc. A	Conc. B
Eficiência Energética	0,25	kWh/t	Consumo de energia por tonelada	1	-1
Precisão Granulométrica	0,2	mm	Desvio padrão das partículas	1	1
Robustez Mecânica	0,15	Índice (1-5)	Resistência a falhas	-1	1
Manutenção	0,1	h (MTBF)	Tempo médio entre falhas	1	-1
Automação	0,1	Nível (0-5)	Grau de automação	0	1
Flexibilidade Operacional	0,1	Índice (1-5)	Adaptabilidade de biomassa	1	0

Fonte: Elaborado pelo autor com base em (Back et al. 2008).

A composição que apresentou melhor desempenho inclui o secador rotativo, o desintegrador com facas modulares, peneira vibratória, controle por Arduino e interface touchscreen. Essa configuração obteve a maior pontuação nos critérios de maior peso — como eficiência energética e precisão de partícula — além de vantagens em manutenção e custo. O secador rotativo, por exemplo, permite maior controle do tempo de secagem com bom aproveitamento térmico, enquanto as facas modulares garantem facilidade de manutenção e adaptação.

No controle, a combinação Arduino e tela touchscreen oferece uma solução acessível e funcional, adequada para ambientes de pesquisa e ensino, mantendo bom nível de automação. A peneira vibratória, por sua vez, assegura a separação eficaz das faixas granulométricas desejadas. Conforme descrito na Tab. 7.

Tabela 7: Escolha dos Componentes com Base nos Critérios Avaliados

Componente	Critérios Relevantes	Desempenho nos Critérios	Justificativa da Escolha
Secador Rotativo	Eficiência Energética, Flexibilidade	+ Alta transferência de calor	Escolhido pelo bom desempenho térmico, robustez e capacidade de operação contínua.
		+ Controle de tempo	
		+ Adaptável a diferentes biomassas	
Desintegrador	Robustez, Flexibilidade Operacional	+ Alta resistência	Indicado para o processamento inicial da biomassa devido à sua resistência e adaptabilidade.
		+ Aplicável a diversas matérias-primas	
		+ Boa durabilidade	
Facas Modulares	Manutenção, Custo	+ Fácil substituição	Permite manutenção simples e rápida, aumentando a disponibilidade do sistema.
		+ Redução do tempo de parada	
		+ Baixo custo de peças	
Peneira Vibratória	Precisão Granulométrica, Flexibilidade	+ Separação eficiente	Garante precisão na separação das partículas, essencial para a alimentação do reator.
		+ Ajuste de malhas	
		+ Recirculação facilitada	
Arduino + Interface Touchscreen	Automação, Custo, Flexibilidade, Usabilidade, Automação	+ Baixo custo	Alternativa econômica e funcional, compatível com os objetivos acadêmicos do projeto.
		+ Configuração customizável	
		+ Visualização clara dos parâmetros	

Fonte: Elaborado pelo autor com base em (Back et al. 2008).

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará (UNIFESSPA) pelo apoio financeiro e à equipe laboratorial pelo suporte técnico.

6. REFERÊNCIAS

- BACK, N. et al. Projeto Integrado de Produtos: Planejamento, Concepção e Modelagem. Barueri, SP, Brasil: Manole Ltda., 2008. Acesso em: 22 fev. 2025. ISBN 978-85-204-2208-3.
- HENNEBERRY, T. . Promise of combined hydrothermal/chemical and mechanical pretreatment of lignocellulosic biomass. *Biotechnology for Biofuels*, v. 9, p. 50, 2016.
- LI, X. . A high performance torque sensor for milling based on a piezoresistive mems strain gauge. *Sensors*, v. 16, n. 4,p. 513, 2016.
- LIU, Y.; PENG, J.; KANSHA, Y. Novel fluidized bed dryer for biomass drying. *Fuel Processing Technology*, v. 122, p.170–176, 2014.
- PAHL, G.; BEITZ, W.; FELDHUSEN, J.; GROTE, K.-H. *Projeto na engenharia: fundamentos do desenvolvimento eficaz de produtos – métodos e aplicações*. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2005.
- MONTGOMERY, D. C. Design and Analysis of Experiments. 9. ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2017. Acesso em: 15 mar. 2025. ISBN 9781119299363.
- MORAIS, P. S. Estudo Comparativo de Processos de Conversão de Biomassa para biocombustíveis. Rio Grande do Sul,Brasil: [s.n.], 2021. TCC. Acesso em: 11 fev. 2025.
- SILVA, R. Produção e aplicação de biocombustíveis na amazônia: Desafios e perspectivas. *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, v. 10, n. 2, p. 45–62, 2023. Acesso em: 08 mar. 2025.
- SILVIO, A. P. M. d. Craqueamento Termo-Catalítico de Óleos Vegetais em Diferentes Escalas de Produção. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Pará, Pará, Brasil, 2013. Acesso em: 08 abr. 2025.
- SOARES, J. Produção de biodiesel a partir de resíduos agroindustriais: Um estudo de viabilidade. *Química Nova*, v. 39,n. 4, p. 350–358, 2016. Acesso em: 25 jan. 2025.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores Wilson Rosa Da Rocha, Janaína Damacena Siqueira, Ana Beatriz Fernandes Moraes, Yasmim Percia Melo Cruz, Breno Ebinuma Takiuti e Pedro Christian Ayala Castillo são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.