

## **PROJETO DE UM SISTEMA DE TRANSPORTE E AGITAÇÃO PARA PIRÓLISE DE CAROÇO DO AÇAÍ**

**Yasmim Percia Melo Cruz, yasmimpercia@unifesspa.edu.br<sup>1</sup>**

**Ana Beatriz Fernandes Moraes, byafmoraes@gmail.com<sup>1</sup>**

**Pedro Henrique Sena Pereira, Pedrophsp1@gmail.com<sup>1</sup>**

**Tonny Richard Silva, tonnyrichardsilva53@gmail.com<sup>1</sup>**

**Wilson Rosa da Rocha, wilson.rocha@unifesspa.edu.br<sup>1</sup>**

**Pedro Christian Ayala Castillo, pedro.ayala@unifesspa.edu.br<sup>1</sup>**

**Breno Ebinuma Takiuti ,takiuti@unifesspa.edu.br<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará (Unifesspa), Folha 17, Quadra 04, Lote Especial, s/n.º - Nova Marabá, Marabá - PA, 68505-080

**Resumo.** Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema de transporte e agitação para aplicação em reatores de pirólise, com foco na valorização do caroço de açaí como biomassa residual. A proposta visa otimizar o processo de conversão termoquímica por meio da pirólise, promovendo aquecimento uniforme da matéria-prima e garantindo operação contínua do sistema. A metodologia adotada inclui revisão bibliográfica, definição de requisitos técnicos, definição das etapas do processo, elaboração de uma matriz morfológica e geração de concepções. O projeto também considera o uso de fontes renováveis de energia, como a solar ou o reaproveitamento de gases gerados no processo, buscando soluções sustentáveis e replicáveis para regiões com infraestrutura energética limitada. Os resultados iniciais envolvem a definição dos requisitos do projeto e a elaboração de uma matriz morfológica que orienta o desenvolvimento das primeiras concepções do sistema.

**Palavras-chave:** Conversão termoquímica, biomassa residual, sistema de transporte e agitação, reatores de pirólise, Sustentabilidade.

**Abstract.** This work presents the development of a transport and agitation system for application in pyrolysis reactors, focusing on the valorization of açaí seeds as residual biomass. The proposal aims to optimize the thermochemical conversion process through pyrolysis, promoting uniform heating of the raw material and ensuring continuous system operation. The adopted methodology includes a literature review, definition of technical requirements, definition of process steps, development of a morphological matrix, and generation of design concepts. The project also considers the use of renewable energy sources, such as solar energy or the reuse of gases generated during the process, seeking sustainable and replicable solutions for regions with limited energy infrastructure. The initial results involve the definition of project requirements and the development of a morphological matrix that guides the creation of the system's initial design concepts.

**Keywords:** Thermochemical conversion, residual biomass, transport and agitation system, pyrolysis reactors, sustainability.

### **1. INTRODUÇÃO**

Dante dos impactos ambientais provocados pelos combustíveis fósseis e da crescente necessidade por fontes de energia mais limpas, alternativas renováveis vêm ganhando destaque nas agendas de pesquisa e inovação. O biodiesel, especialmente aquele derivado de resíduos orgânicos, representa uma solução promissora por ser produzido através de recursos renováveis e apresentar menor impacto ambiental em comparação aos combustíveis tradicionais.

O potencial da biomassa como fonte energética é amplamente reconhecido na literatura. Segundo Silva (2021), trata-se da quarta fonte de energia mais consumida no mundo, respondendo por aproximadamente 14% da demanda energética final, sendo que em países tropicais como o Brasil, as biomassas vegetais apresentam vantagens significativas de acesso e produção, o que favorece a adoção de tecnologias de conversão energética de base biológica.

A região amazônica é um exemplo deste potencial, por reunir grande biodiversidade e gerar volumes significativos de resíduos provenientes de atividades agro-industriais e urbanas. Mota (2013) destaca a abundância de subprodutos orgânicos disponíveis na região, como rejeitos de frutas típicas e óleos residuais, que podem ser aproveitados para a produção local de biocombustíveis.

Dentre esses resíduos, o caroço do açaí se sobressai pela expressiva quantidade produzida. O estado do Pará, principal polo nacional da cadeia produtiva do açaí. Segundo pesquisa realizada pela Fundação Amazônia de Amparo a Estudos e Pesquisas (Fapespa 2024), a produção de açaí no estado do Pará, atualmente o maior produtor nacional, foi de cerca de 1760 mil toneladas em 2022, contemplando 90,40% da produção brasileira. Grande parte desse total corresponde aos resíduos gerados no processamento, os quais são descartados inadequadamente, expondo o meio ambiente a riscos de contaminação. A pirólise é um dos possíveis processos em que se consegue processar estes resíduos orgânicos, tendo como possível produto o biodiesel.

Neste contexto, o desenvolvimento de uma planta de pirólise surge como alternativa estratégica, tanto para a valorização de resíduos quanto para a capacitação técnica de comunidades amazônicas. A proposta deste projeto é o projeto de um sistema capaz de converter resíduos locais, como o caroço do açaí, em biodiesel, promovendo o desenvolvimento sustentável e geração de energia limpa. Para isso, serão conduzidas análises técnicas, ambientais e sociais visando avaliar a eficiência do processo, sua adequação às condições regionais e o potencial de replicação em outros contextos com baixa infraestrutura. Ao mesmo tempo, espera-se fomentar o desenvolvimento científico e a conscientização sobre o uso responsável dos resíduos, incentivando práticas sustentáveis e o fortalecimento da bioeconomia regional.

Durante a realização da pirólise, é necessário o transporte da massa orgânica através do queimador (sistema de aquecimento), de forma a garantir que toda a massa seja aquecida a uma determinada temperatura. Com isso, este trabalho tem como objetivo projetar e simular computacionalmente um sistema de transporte de massa e agitação de reatores de pirólise voltados à conversão termoquímica de biomassas. Para isso estão previstas a realização de levantamento bibliográfico sobre reatores de pirólise e o método de transporte e agitação da massa de matéria prima, a simulação computacional do processo de transporte e fornecimento de calor dentro do reator e o desenvolvimento de concepções para a realização do processo de forma ecológica, utilizando materiais reutilizáveis e fontes renováveis de energia para a geração de calor necessária para a pirólise.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Obtenção de combustíveis a partir de resíduos orgânicos

Segundo Sebben (2023), o processo de conversão tem início com a preparação da matéria-prima, na qual as matérias orgânicas são coletados e submetidos à secagem em estufa a 105 °C durante 24 horas, com o objetivo de reduzir o teor de umidade e evitar interferências no processo térmico. Em seguida, os materiais são triturados e peneirados para obtenção de partículas com granulometria entre 0,6 mm e 1,5 mm segundo Mota (2013) garantindo, assim, uma maior uniformidade térmica durante a pirólise. Posteriormente, realiza-se a caracterização inicial da biomassa, que envolve a análise de parâmetros físico-químicos relevantes, como teor de umidade, matéria volátil, cinzas e carbono fixo (análise imediata), além da determinação da composição elementar. Ademais, também é avaliado o poder calorífico superior, fator essencial para compreender o potencial energético do material.

Na sequência, procede-se à configuração do sistema de pirólise, o qual consiste em um sistema de aquecimento (forno) e um reator que transporta a massa orgânica e realiza a agitação para garantir uma queima uniforme. O forno deve possuir uma forma de controle de temperatura. Esse sistema deve ser projetado para operar em uma faixa de temperaturas entre 300 °C e 600 °C. A biomassa é, então, introduzida no reator em quantidades previamente determinadas. Para evitar a combustão da biomassa durante o aquecimento, estabelece-se uma atmosfera inerte por meio da introdução de um fluxo contínuo de gás nitrogênio, o qual é iniciado antes mesmo do aquecimento do sistema, assegurando, assim, a inertização completa do interior do reator.

Durante a pirólise, os vapores gerados são conduzidos pelo fluxo de gás inerte até um sistema de condensação, onde os líquidos (bio-óleo) são separados e armazenados. Simultaneamente, os resíduos sólidos (biochar) devem ser coletados em um sistema de separação, sendo retirados somente após o seu completo resfriamento.

Por fim, os gases não-condensáveis são direcionados para um recipiente apropriado para coleta ou análise posterior. Após a coleta, realiza-se a análise dos produtos obtidos. As frações sólidas, líquidas e gasosas são quantificadas com o objetivo de calcular o rendimento de cada uma. O biochar é analisado quanto à sua morfologia, composição química e estrutura cristalina. Já o bio-óleo é submetido a análises físico-químicas, incluindo determinação de pH, viscosidade, densidade e composição, permitindo uma avaliação detalhada de suas propriedades e aplicações potenciais.

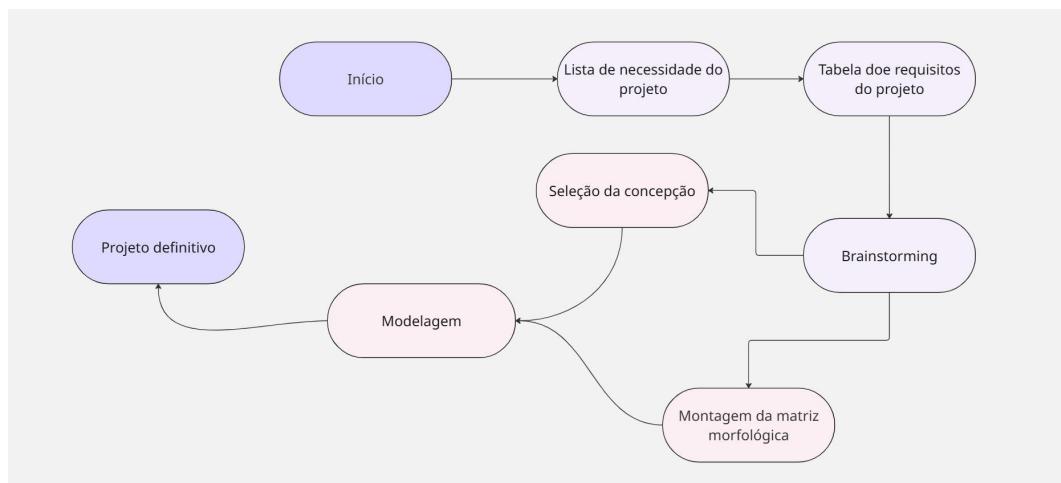
## 4. METODOLOGIA

A metodologia deste projeto está centrada no desenvolvimento de um sistema térmico para reatores de pirólise, com foco em eficiência energética, adaptabilidade e sustentabilidade. A primeira etapa consiste em uma revisão técnica detalhada sobre as soluções existentes para sistemas térmicos aplicados à pirólise. Essa revisão abordará as configurações de reatores, os métodos para o transporte contínuo da biomassa através do sistema de queima, os materiais construtivos adequados e as metodologias para a distribuição uniforme do calor em toda a massa orgânica.

Na sequência, serão definidos os requisitos funcionais e operacionais do sistema de aquecimento, levando em conta a faixa de temperatura típica de operação da pirólise, entre 400°C e 600°C. Serão realizadas análises teóricas e simulações computacionais, com o objetivo de avaliar a transferência de calor e as características estruturais do dispositivo. Com esses dados, serão propostas as primeiras configurações geométricas e operacionais, utilizando ferramentas de modelagem por CAD para a visualização e ajuste do projeto.

A etapa final será conduzida com base em diretrizes de design centrado no usuário e no ciclo de vida do produto, conforme as abordagens de Back et al. (2008). O processo de desenvolvimento visa garantir que o sistema seja eficiente, sustentável e adaptável a diferentes escalas, além da possibilidade de transporte (portabilidade) do conjunto, para a realização de demonstrações em escolas e comunidades locais. A Fig. 1 mostra o fluxograma das etapas realizadas para o desenvolvimento do reator.

Figura 1. Fluxograma do processo de projeto do sistema de transporte e agitação do reator



## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A primeira etapa consistiu na definição dos requisitos do projeto. Segundo Back et al. (2008), esse processo envolve inicialmente a identificação das necessidades do usuário/cliente, o que pode ser realizado por meio de entrevistas com possíveis clientes, aplicação de questionários estruturados, além de pesquisa de mercado e benchmarking. Para este projeto, os requisitos foram obtidos a partir da análise de informações disponíveis na literatura. Com base em trabalhos como os de Mota (2013) e Sebben (2023), optou-se por definir a escala de produção como sendo a escala de bancada. A partir destas informações, foi criada uma tabela contendo os requisitos específicos do projeto, conforme observado na Tab. 1.

Tabela 1. Requisitos do projeto do sistema de transporte e agitação para pirólise

Prior.	Descrição	Modo de verificação	Possíveis riscos
1	Produção contínua	Medição da produtividade	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Complexidade no transporte;</li> <li>● Componentes móveis em altas temperaturas;</li> <li>● Dificuldade de vedação e isolamento térmico.</li> </ul>
2	Capacidade de processar 2kg de matéria orgânica	Testes com amostras de resíduo contendo o peso estabelecido	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Complexidade na montagem;</li> <li>● Custos elevados;</li> <li>● Maior gasto energético.</li> </ul>
3	Atingir um fluxo de até 4kg por hora	Cronometragem	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Consumo de energia;</li> <li>● Motores com maior capacidade;</li> <li>● Maior ruído.</li> </ul>
4	Movimentar o material processado	Medir quantidade de material processado	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Custo;</li> <li>● Ruído.</li> </ul>
5	Dimensão máxima (escala de bancada): 3m x 1m x 1m	Medição das dimensões	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Complexidade na produção e montagem de componentes pequenos.</li> </ul>
6	Peso máximo de 20kg por módulo/conjunto	Pesagem	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Limitação de materiais mais densos e resistentes;</li> <li>● Redução na robustez.</li> </ul>

Em seguida passou-se para o desenvolvimento de uma matriz morfológica (Tabela 2), estabelecendo-se os principais sistemas necessários para o processo de pirólise contínua. Tais sistemas foram obtidos baseando-se nos requisitos propostos na Tab. 1. O principal desafio para o sistema em desenvolvimento é a necessidade de realizar a pirólise através de um sistema de produção contínua, ou seja, a biomassa deve ser processada ininterruptamente, à uma certa taxa de produção. Essa característica faz com que seja necessária a utilização de componentes móveis dentro de um sistema de aquecimento que pode atingir até 600°C. A literatura clássica sobre projeto de elementos de máquinas (Nisbett, 2009 e Norton 2004) estabelece que temperaturas acima de 500°C passam a apresentar maiores riscos de falha por fadiga.

Tabela 2. Matriz morfológica do sistema de aquecimento para pirólise

1.Leito	1.1. Tipo							
	1.2. Movimento							
	1.3. Direção	 		 	 			
	1.4. Mecanismo de movimentação	 	 	 	 	 	 	
	1.5. Acionamento do movimentador							
	1.6. Controle do acionamento							
	1.7. Controle de tempo de permanência							
2. Material de Construção	2.1. Estrutura							
	2.2. Revestimento interno							
3. Interface	3.1. Acionamento							
	3.2. Dispositivos de segurança							

A matriz morfológica tem como objetivo apoiar a concepção do produto, sendo que cada linha representa uma etapa ou característica necessária e cada coluna apresenta uma solução potencial para atingir essa característica. Após a construção da matriz, deve-se selecionar uma coluna para cada linha, criando assim uma possível idealização do produto. Para a próxima etapa, deve-se desenvolver diferentes concepções para o reator e em seguida são aplicadas metodologias para a seleção da melhor concepção, que será desenvolvida em maiores detalhes.

## 6. CONCLUSÕES

O projeto apresentado encontra-se ainda na fase inicial, tendo sido desenvolvidas as primeiras etapas do processo de concepção de um sistema de transporte e agitação para um reator de pirólise de resíduos do açaí. Nessa fase, foram realizadas a etapa de projeto informacional e o início do projeto conceitual, com a apresentação dos requisitos do projeto e a construção da matriz morfológica.

Nas etapas subsequentes, será finalizada a fase de projeto conceitual, elaborando-se um conjunto de concepções alternativas com base na matriz morfológica. Em seguida, serão aplicadas metodologias para a seleção das melhores concepções, onde cada uma será cuidadosamente avaliada e, após essa análise, apenas a mais adequada será escolhida para a etapa final, no qual serão realizadas simulações computacionais para testar a viabilidade da concepção selecionada, além da elaboração detalhada dos desenhos técnicos de cada componente da planta. Por fim, o projeto espera-se seguir para a construção do protótipo e para a realização de testes práticos.

## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro, concedido através da Chamada CNPq/MCTI/FNDCT Nº 19/2024, processo 445228/2024-5.

## 6. REFERÊNCIAS

- Back, N.; Ogliari, A.; Dias, A.; Silva, J.C., *Projeto Integrado de Produtos: planejamento, concepção e modelagem*. São Paulo: Manole, 2008.
- Fapespa. *Nota Técnica: Conjuntura da Economia do Açaí – 2024*. Belém: Fundação Amazônia de Amparo a Estudos e Pesquisas do Pará (FAPESPA), 2024. Disponível em: <https://www.fapespa.pa.gov.br/wp-content/uploads/2024/06/Nota-Tecnica-Conjuntura-da-Economia-do-Acaí-2024.pdf>. Acesso em: 1 maio 2025
- Nisbett, J. K e Budynas, R. G. *Elementos de máquinas de Shigley*. São Paulo: McGraw Hill Brasil, 2009.
- Norton, R. L. *Projeto de máquinas: Uma abordagem integrada*. Porto Alegre: Bookman, 2004.
- Mota, S. A. P. *Craqueamento termocatalítico de óleos vegetais em diferentes escalas de produção*. Tese de doutorado, Universidade Federal do Pará, Pará, 2013.
- Silva, T. F. *Caroço de açaí: uma alternativa bioenergética*. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2021.
- Sebben, V. H. A. *Implementação de planta de pirólise de baixo custo em escala laboratorial para processamento de biomassa residual e desenvolvimento de novos produtos*. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Energia) – Unidade Universitária Porto Alegre, Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023.

## 7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.