

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE AQUECIMENTO DE UM REATOR DE PIRÓLISE DE CAROÇO DO AÇAÍ

Ana Beatriz Fernandes Moraes, byafmoraes@gmail.com¹

Pedro Henrique Sena Pereira, Pedrophsp1@gmail.com²

Tonny Richard Silva, tonnyrichardsilva53@gmail.com³

Wilson Rosa da Rocha, wilson.rocha@unifesspa.edu.br⁴

Yasmim Percia Melo Cruz, yasmimpercia@unifesspa.edu.br⁵

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

Breno Ebinuma Takiuti, takiuti@unifesspa.edu.br⁷

¹ 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 projeto tem como foco o desenvolvimento de um sistema de fornecimento térmico para reatores de pirólise voltados à conversão termoquímica de biomassas residuais da Amazônia Legal. O objetivo principal é projetar e validar um sistema de aquecimento adaptável a diferentes escalas, com atenção à aplicabilidade em contextos locais e uso de materiais disponíveis regionalmente. Para apoiar o processo de concepção e dimensionamento do sistema, serão realizadas modelagens e simulações computacionais, com ênfase na análise térmica e fluidodinâmica, permitindo a avaliação de desempenho sob diferentes condições operacionais. Espera-se, com este projeto, identificar configurações que permitam o uso de fontes renováveis de energia no fornecimento de calor para o processo de conversão termoquímica, como a energia solar ou o reaproveitamento térmico de gases da própria pirólise. Os resultados visam contribuir para o desenvolvimento de soluções sustentáveis e replicáveis, com potencial de aplicação em comunidades isoladas e em contextos de baixo acesso à infraestrutura energética convencional. A tecnologia resultante poderá ser aplicada na descentralização da produção de energia, agregando valor a resíduos locais e promovendo inovação na área de bioenergia.

Palavras chave: projeto de sistemas térmicos, simulação computacional, transferência de calor, reatores de pirólise, bioenergia

Abstract. This project focuses on the development of a thermal supply system for pyrolysis reactors aimed at the thermochemical conversion of residual biomass from the Brazilian Legal Amazon. The main objective is to design and validate a heating system adaptable to different scales, with attention to applicability in local contexts and the use of regionally available materials. To support the system's design and dimensioning process, computational modeling and simulations will be carried out, with emphasis on thermal and fluid dynamic analysis, allowing performance evaluation under different operating conditions. This project is expected to identify configurations that enable the use of renewable energy sources for the heat supply system in the thermochemical conversion process, such as solar energy or thermal recovery of gases from the pyrolysis itself. The results aim to contribute to the development of sustainable and replicable solutions, with potential application in isolated communities and in contexts with limited access to conventional energy infrastructure. The resulting technology may be applied to decentralized energy production, adding value to local waste and fostering innovation in the bioenergy field.

Keywords: thermal systems design, computational simulation, heat transfer, pyrolysis reactors, bioenergy

1. INTRODUÇÃO

A grande demanda por fontes de energia sustentável e a preocupação com os impactos ambientais causados pelos combustíveis fósseis têm impulsionado a busca por alternativas renováveis e viáveis ecologicamente. Nesse contexto, o Biodiesel se destaca como uma opção favorável, principalmente quando produzido a partir de resíduos orgânicos, por ser biodegradável e menos poluente. De acordo com Silva (2021) “A biomassa é a quarta fonte de energia do mundo, representando aproximadamente 14% do consumo mundial de energia final. Neste contexto, as biomassas vegetais destacam-se pela facilidade de obtenção, principalmente num país tropical como o Brasil, tornando a obtenção de

biocombustíveis mais fácil e eficaz. A região da Amazônia, rica em biodiversidade e com grande geração de resíduos agroindustriais e urbanos, oferece um potencial para a produção de biocombustíveis por meio das matérias-primas locais, como óleos residuais, rejeitos de frutas regionais e outros subprodutos orgânicos (Mota, 2013).

Um dos produtos com maior disponibilidade de resíduos no estado do Pará é o caroço 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. Cerca de 83% da produção total é resíduo (caroço), gerado após o processamento do fruto para a produção de polpa. O caroço é geralmente descartado a céu aberto, apresentando risco de dano ambiental pela destinação incorreta desse resíduo.

A construção de uma planta para a produção de Biodiesel representa uma alternativa eficaz para fins experimentais e para a capacitação técnica de comunidades locais, garantindo a valorização de recursos regionais e contribuindo para a sustentabilidade. Este trabalho tem como objetivo projetar e implementar uma planta em escala laboratorial capaz de processar resíduos orgânicos amazônicos, como o caroço do açaí, na produção de Biodiesel, avaliando a sua eficiência, aplicabilidade na região e viabilidade técnica, ambiental e social. Além de estimular a pesquisa e o desenvolvimento tecnológico, essa iniciativa busca promover a conscientização a respeito da importância do reaproveitamento de resíduos e a geração de energia limpa.

A pirólise/craqueamento oferece uma forma de processar resíduos agrícolas, transformando-os em produtos de maior valor agregado. Este tipo de processo se trata da degradação térmica da biomassa em atmosfera livre de oxigênio, onde a biomassa é reduzida e transformada em carvão (biochar), produtos líquidos (bio-óleo) e gases. A geração de líquido (bio-óleo) é o que diferencia a pirólise das tecnologias de carbonização e gaseificação (Sebben, 2023).

2. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral desenvolver uma planta de pirólise em escala laboratorial, com sistema de aquecimento próprio, destinada ao processamento de resíduos orgânicos amazônicos, especialmente o caroço do açaí, visando à produção de biocombustíveis.

2.1 Objetivos específicos

- a. Levantar informações técnicas e científicas sobre processos de pirólise aplicáveis a biomassas lignocelulósicas e sobre alternativas de fornecimento térmico;
- b. Elaborar uma matriz morfológica de cada etapa necessária para o sistema de aquecimento/queima do material orgânico;
- c. Buscar soluções de fornecimento térmico que integrem fontes de energia renovável, como a energia solar ou o aproveitamento dos gases gerados na pirólise;
- d. Avaliar a viabilidade técnica da planta em escala laboratorial, com foco na aplicabilidade em regiões com baixa infraestrutura energética;
- e. Elaborar um modelo conceitual da planta.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Obtenção do Biodiesel

De Freitas (2022) define como Biodiesel todos os tipos de combustíveis derivados de matéria orgânica, que condiz como alternativa sustentável a produtos provenientes do petróleo a partir da reação entre óleos vegetais e gordura animal com o álcool. Esse processo, sendo o mais comum, denomina-se transesterificação. Durante essa reação química, esses materiais são combinados com álcool e um catalisador, resultando em um combustível que oferece desempenho semelhante ao diesel tradicional.

Outro método que pode ser utilizado para obtenção do Biodiesel é a esterificação. De acordo com Amaral (2022), a esterificação é um processo químico fundamental na produção de biodiesel, especialmente quando se utiliza matérias-primas com alto teor de ácidos graxos livres. Nesse método, os ácidos graxos reagem com um álcool, geralmente metanol ou etanol, na presença de um catalisador ácido, formando ésteres e água.

Ambos os sistemas apresentados envolvem a combinação de duas moléculas como a eliminação de uma molécula pequena como água ou álcool, ou seja, uma condensação. Contudo, o método de obtenção do biodiesel é inerente às propriedades da matéria prima utilizada, tal como condições ou variáveis do processo. Sendo assim, existem diferentes métodos para a obtenção do biodiesel, visto que, há variedades de plantas oleaginosas que consequentemente viabilizam a produção de energia renovável.

3.2 Pirólise e craqueamento

A celulose é um dos principais componentes da biomassa e desempenha um papel essencial na produção de biocombustíveis a partir de matéria-prima vegetal. Durante sua decomposição, forma-se a levoglucosana, que se transforma em substâncias mais leves, como furfural e hidroxi acetaldeídos.

Em seu estudo, Amaral (2022) descreve que no processo de pirólise ou craqueamento de óleos vegetais e gorduras animais, os triacilglicerídeos se quebram, gerando ácidos graxos. Esses ácidos, por sua vez, passam por um processo adicional que resulta em uma mistura de hidrocarbonetos parecidos com os derivados do petróleo. Esse craqueamento ocorre em duas etapas: primeiro, surgem os ácidos carboxílicos a partir da ruptura química; depois, acontece a desoxigenação desses produtos, tornando-os ainda mais semelhantes aos combustíveis fósseis. Ou seja, esses processos são fundamentais para converter biomassa e óleos naturais em fontes de energia mais acessíveis e viáveis.

3.3 Caroço do açaí

O estado do Pará sendo o maior produtor de açaí no Brasil, produz uma grande quantidade de matéria orgânica gerada após o processamento da polpa. A matéria-prima utilizada no processo de craqueamento é analisada quanto às suas características termoquímicas, ou seja, seu comportamento sob altas temperaturas, visto que esse fator influencia diretamente no rendimento do bio-óleo. O caroço de açaí, sendo um produto lignocelulósico, é adequado e esse tipo de processo, pois apresenta, em sua composição, celulose, a qual decompõe-se, em altas temperaturas produzindo vapores contendo carbono. Assim, utilizando-se desse gás liberado, obtém-se biocombustíveis.

Nesse sentido, por meio do estudo realizado por Rangel (2014), o açaí pode ser considerado um material com potencial para a produção de biodiesel. Para esse fim, utiliza-se principalmente o material descartado, ou seja, o caroço, que representa a maior parte do fruto. Tal material é composto por três camadas estruturais distintas: casca externa, parte intermediária e parte interna. A utilização do caroço como matéria-prima ocorre devido à sua abundância como resíduo agroindustrial e à sua composição lignocelulósica, possibilitando processos termoquímicos, como a pirólise. No modelo industrial de processamento de açaí, na produção de polpa, o caroço é descartado.

4. METODOLOGIA

A metodologia adotada neste projeto está centrada no desenvolvimento completo de um sistema de fornecimento térmico voltado para reatores de pirólise, com foco na eficiência energética, adaptabilidade e sustentabilidade. Inicialmente, será realizada uma revisão técnica detalhada sobre soluções existentes em sistemas térmicos aplicados à pirólise, com atenção às configurações de reatores, tipos de aquecimento utilizados (direto ou indireto), materiais construtivos viáveis e métodos de controle térmico. Este levantamento servirá como base para a concepção preliminar do sistema, seguindo os princípios de análise funcional e levantamento de requisitos de projeto (Nisbett, 2010 e Norton, 2004).

A etapa seguinte consistirá na definição dos requisitos funcionais e operacionais do sistema de aquecimento, considerando a faixa de temperaturas de operação típica da pirólise (geralmente entre 400°C e 600°C). Para isso, serão realizadas análises teóricas e simulações computacionais dos processos de transferência de calor e das características estático-estruturais do dispositivo. A partir desses requisitos, serão elaboradas propostas iniciais de configuração geométrica e de funcionamento, com uso de ferramentas de modelagem por CAD. Essa fase será conduzida segundo diretrizes de projeto centrado no usuário e no ciclo de vida do produto, conforme abordagens propostas por Back et al. (2008).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Inicialmente determinou-se os requisitos do projeto. Para esta etapa, segundo Back *et al* (2008), deve-se primeiro estabelecer as necessidades do usuário/cliente, realizando entrevistas com potenciais clientes, distribuindo questionários estruturados e através de pesquisa de mercado e benchmarking. Apesar disso, devido ao nível de complexidade do projeto deste tipo de dispositivo, os requisitos foram obtidos baseando-se em informações encontradas na literatura. Baseando-se nos trabalhos como Mota (2013) e Sebben (2023), foi decidido que a escala de produção inicial seria a escala de bancada.

Para o projeto do sistema de aquecimento em particular, elaborou-se a tabela de requisitos do projeto, conforme mostra a Tab. 1.

Tabela 1. Requisitos do projeto do sistema de aquecimento para pirólise

Prior.	Descrição	Modo de verificação	Possíveis riscos
1	Produção contínua	Medição da produtividade	• Complexidade no aquecimento; • Componentes móveis em altas temperaturas; • Dificuldade de vedação e isolamento térmico.
2	Capacidade de processar 2kg de matéria orgânica por hora	Testes com amostras de resíduo contendo o peso estabelecido	• Complexidade na montagem; • Custos elevados; • Maior gasto energético.
3	Atingir entre 400°C e 600°C	Termopares	• Consumo de energia; • Redução na durabilidade dos componentes; • Perigo durante a montagem e operação.
4	Dimensão máxima (escala de bancada): 3m x 1m x 1m	Medição das dimensões	• Complexidade na produção e montagem de componentes pequenos.
5	Peso máximo de 20kg por módulo/conjunto	Pesagem	• Limitação de materiais mais densos e resistentes; • Redução na robustez.
6	Utilizar fontes de energia eficientes/renováveis	Consumo de energia	• Dificuldade no controle da temperatura; • Indisponibilidade de energia.

Como pode ser observado na Tab. 1, estabeleceram-se 5 requisitos para o projeto do sistema de aquecimento para pirólise, sendo estes mostrados em ordem decrescente de prioridade. Estabeleceu-se que a prioridade do projeto seria a capacidade de operar de forma contínua, já que a produção de biocombustível a partir do caroço do açaí é um processo demorado, e a produção em bateladas iria tornar o processo mais demorado. Os itens de prioridade 2 e 3 foram estabelecidos de acordo com o conceito de escala de bancada. Já os itens de prioridade 4 e 5 se devem à característica de portabilidade e sustentabilidade buscado para este trabalho.

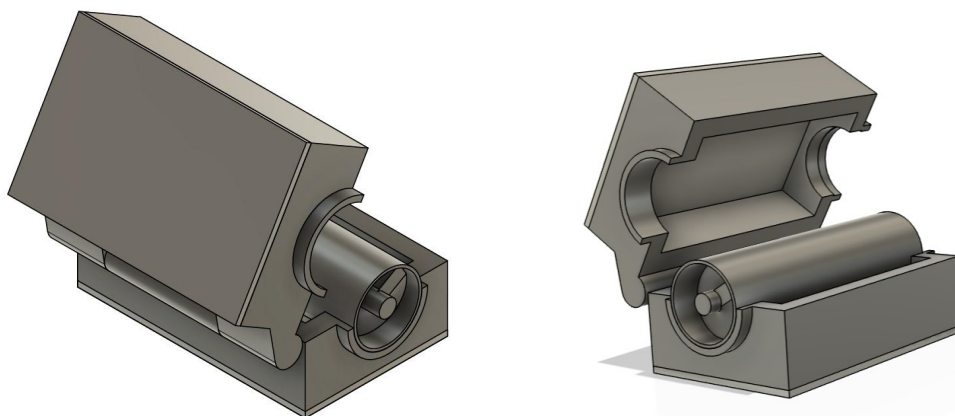
A partir do estabelecimento dos requisitos do projeto, partiu-se para a montagem da matriz morfológica, em que realizaram-se sessões de brainstorming (chuva de ideias) para propor diferentes características (linhas da matriz) e diferentes concepções (colunas da matriz). A Tab. 2 mostra a matriz morfológica construída.

Tabela 2. Matriz morfológica do sistema de aquecimento para pirólise

1. Fonte de Calor/Aquecimento	1.1. Fonte de energia							
	1.2. Transmissão de calor							
	1.3. Transporte de calor							
	1.4. Controle de temperatura							
	1.5. Reaproveitamento							
2. Material de Construção	2.1. Estrutura externa							
	2.2. Isolamento térmico							
3. Interface	3.1. Acionamento							
	3.2. Programação							
	3.3. Dispositivos de segurança							

A matriz morfológica tem o objetivo de auxiliar na concepção do produto, em que cada linha representa uma etapa ou característica necessária e cada coluna apresenta uma possível solução para conseguir obter aquela característica. Dessa forma, após elaborada a matriz, deve-se selecionar uma coluna (concepção) para cada linha da matriz, construindo-se assim uma possível idealização do produto. Um exemplo dessa concepção seria a utilização de um sistema de aquecimento baseado em resistências elétricas, em que a matéria orgânica deve passar pelo forno de aquecimento através de um sistema de hélice contínua movida por um motor elétrico, como mostrado na Fig. 1, através de um modelo conceitual desenhado em software CAD (Computer Aided Design).

Figura 1. Modelo conceitual de um forno com reator cilíndrico



6. CONCLUSÕES

O projeto apresentado ainda encontra-se em fase inicial, no qual foram apresentadas as etapas desenvolvidas no processo de concepção de um protótipo de uma planta de pirólise de resíduos do açaí. Para isso foram realizadas as etapas de projeto informacional e início do projeto conceitual, no qual foram apresentadas a lista de requisitos do projeto e a matriz morfológica obtida. A partir da matriz construída, um modelo conceitual foi desenvolvido em software CAD para fins de demonstração de uma das possíveis configurações da planta.

Para as etapas seguintes, espera-se prosseguir com a etapa de projeto conceitual, elaborando-se pelo menos três possíveis concepções a partir da matriz morfológica. A partir disto, serão aplicadas metodologias para seleção de concepções, onde cada uma será avaliada e somente a melhor será selecionada para a etapa final (projeto detalhado), em que serão realizadas simulações computacionais para testar a concepção, e elaboradas as plantas de cada componente da planta. Por fim, espera-se construir o protótipo e testar a planta.

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

- Amaral, A. R. *Estudo de viabilidade econômica do processo de pirólise e craqueamento termo-catalítico em escala piloto utilizando-se material ligno-celulósico, lipídico, de óleo de palma (elaeis guineensis, jacq) e resíduo da neutralização do óleo de palma*. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia) - Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2022.
- Back, N.; Ogliari, A.; Dias, A.; Silva, J. C., *Projeto Integrado de Produtos: planejamento, concepção e modelagem*. São Paulo: Manole, 2008.
- De Freitas, S. G. D. *et al. Produção de biodiesel a par do óleo de soja, milho, girassol e canola por transesterificação: uma revisão sistemática*. Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento, 2022.
- 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-Acai-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.
- Rangel, R. N. *Modelagem, caracterização e simulação da pirólise do caroço de açaí*. Monografia (Bacharelado em Engenharia de Energia)—Universidade de Brasília, Brasília, 2014.
- 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.