ESCALONAMENTO DE REATOR DE BANCADA PARA AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DO BIOCHAR NA PROMOÇÃO DA AGRICULTURA SUSTENTÁVEL E DA REMOÇÃO DE CARBONO ATMOSFÉRICO

Palavras-Chave: Pirólise, Bioenergia e Agave.

Autores(as):

JOÃO PEDRO DESTRO ALCÂNTARA [RA:257598], FEAGRI – UNICAMP

Prof. Dr. GUSTAVO MOCKAITIS, FEAGRI- UNICAMP

Dr. JEAN CONSTANTINO GOMES DA SILVA, FEAGRI – UNICAMP

INTRODUÇÃO:

O avanço tecnológico e o aumento da demanda global têm gerado um volume crescente de resíduos, que por consequência tem aumentado e acúmulo a concentração de CO_2 na atmosfera desde a revolução industrial. Diante disto, soluções urgentes são necessárias para mitigar as emissões e promover um ciclo de carbono mais equilibrado. Nesse contexto, tecnologias de estocagem e armazenamento de carbono tem surgido como uma estratégia essencial para remoção de CO_2 da atmosfera. Dentre as principais tecnologias, a pirólise, tem se demonstrado ser uma tecnologia robusta e escalável, dado que o biochar, produto sólido, é composto majoritariamente de carbono com ligações aromáticas, o que garante estabilidade a degradação térmica e biológica e assim podendo permanecer por mais de 100 anos no solo. Além disso, o biochar tem propriedades físico-químicas que são favoráveis para a aplicação agrícola, tais como capacidade de retenção de água, adsorção de contaminantes, capacidade de troca de cátions, etc. Sua produção em escala, no entanto, ainda enfrenta desafios técnicos, como a otimização de parâmetros termodinâmicos e operacionais, que variam conforme a matéria-prima utilizada.

METODOLOGIA:

Folhas de Agave foram coletadas em uma área de cultivo de cactos e suculentas (Sítio Boa Esperança, Holambra/SP) e processadas no laboratório BIOMA/UNICAMP. Após trituração, prensagem e tratamento, o bagaço residual foi separado, seco em estufa a 80°C por 48h, triturado novamente e peneirado, ficando pronto para experimentos de pirólise.

Utilizou-se um reator de pirólise de bancada, produto de pesquisa anterior, sendo o foco principal do projeto seu aprimoramento. Buscou-se avaliar os pontos críticos do reator, desde sua configuração,

material de construção e sensores, de modo a garantir o desenvolvimento de um reator multipropósito. Os reatores foram testados sempre com uma quantidade de massa de aproximadamente 100 g de amostras, em temperaturas que variam entre 350-575ºC, taxa de aquecimento de 10ºC/min, e tempos de residência máxima de 60 min. Ao final de cada experimento, a fração sólida foi recuperada, e seu rendimento calculado após resfriado. A fração liquida resultante da condensação não será estudada dentro do escopo da atual proposta, apenas sendo considerada sua massa para determinação dos rendimentos globais mássicos.

Os sólidos foram caracterizados em termos de analise imediata, analise elementar, densidade, pH e condutividade elétrica, seguindo normas pertinentes, tais como ABNT e ASTM.

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Caracterização dos resíduos sólidos

Análises dos resíduos sólidos foram realizadas, que inclui teores de umidade, de material volátil, de carbono fixo e de cinzas, além da análise elementar da biomassa bruta. Mostradas na Tabela 1.

Propriedades físico-químicas (Raw biomass)		Análise Elementar Orgânica	
		C	38,85%
Análise imediata		H	5,44%
Umidade	7,54%	N	1,51%
Material Volátil	79,65%	S	0,11%
Carbono Fixo	9,94%	O	46,59%
Cinzas	10,41%	H/Corg	1,68

Tabela 1 – Caracterizações do bagaço seco

Prototipagem do reator preexistente

O reator de pirólise passou por sete versões de aprimoramento (V1 a V7), com foco na otimização do processo, segurança operacional e praticidade, especialmente frente aos desafios impostos pela biomassa de Agave, cujo bio-óleo apresenta alta viscosidade, causando entupimentos e pressurizações internas indesejadas.

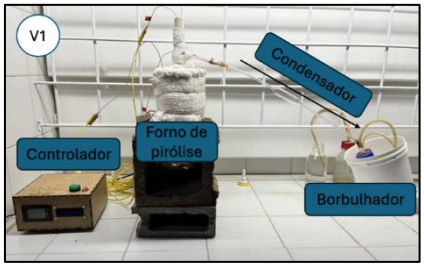

Figure 1 - Primeira versão do reator de pirólise

A versão V1 (Figura 1), apesar de rudimentar, já contava com automação completa e monitoramento em tempo real de temperatura interna, temperatura da parede, temperatura dos gases de saída, taxa de aquecimento e tempo de residência, com registro contínuo dos dados em cartão SD.

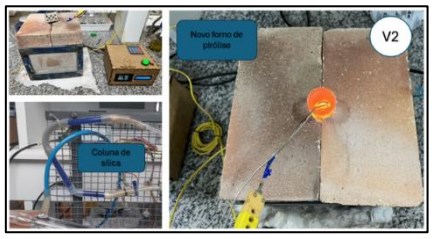

Figura 1 – Segunda versão do reator de pirólise

A versão V2 (Figura 2) incorporou um forno com tijolos refratários em estrutura metálica, aumentando o isolamento térmico e o volume útil. Um motor de 12 V foi instalado para reciclagem de gases, mas apresentou falhas devido à presença de particulados e fração líquida. Para contornar o problema, foi instalada uma coluna de sílica (1,5 cm de diâmetro por 25 cm de comprimento, com partículas de 3 mm) para filtragem, além de melhorias nas conexões e vidrarias do sistema de condensação.

Figura 2 - Terceira versão do reator de pirólise

A versão V3 (Figura 3) introduziu vidrarias com camisa e dois condensadores inclinados a 45°, com o objetivo de ampliar a área de contato e melhorar a condensação do bio-óleo. Devido à alta viscosidade do produto, um banho de aquecimento, a temperatura de 50ºC, foi necessário. Vazamentos persistentes nas conexões foram solucionados com silicone de alta temperatura.

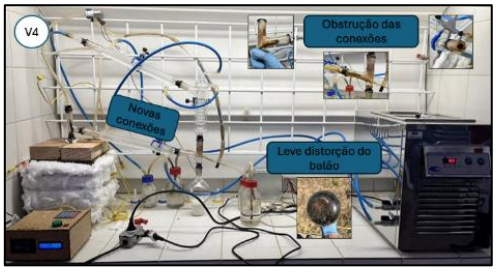

Figura 3 - Quarta versão do reator de pirólise

A V4 (Figura 4) deu continuidade às melhorias estruturais do sistema de condensação, mas ainda apresentou acúmulo de bio-óleo em regiões frias, principalmente nas junções, apontando a necessidade de reconfigurar o fluxo térmico.

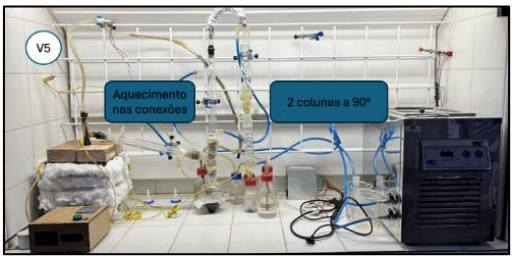

Figura 4 - Quinta versão do reator de pirólise

Na V5 (Figura 5), foram inseridas mangueiras de aquecimento ao redor das conexões para evitar pontos frios e obstruções, além da reorganização das vidrarias com colunas verticais que direcionavam o bio-óleo em ângulo de 90° para os frascos de coleta, conferindo maior robustez e eficiência.

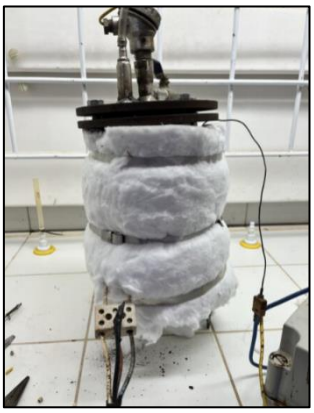

Figura 5 - Sexta versão do reator de pirólise

Já a V6 (Figura 6) marcou a transição estrutural para aço, abandonando o uso de vidrarias devido ao alto custo, fragilidade e limitação térmica (vidros suportam até 650 °C). Utilizando peças usinadas no laboratório, foi construído um reator metálico mais seguro e resistente, com volume útil de 18 cm de diâmetro por 23 cm de altura, mantendo o sistema de monitoramento em tempo real. Porém, ainda não havia sistema de arrefecimento integrado.

Por fim, a versão V7 (Figura 7) consolidou a proposta mais funcional e confiável. O reator passou a suportar temperaturas entre 300 °C e 750 °C, sem apresentar vazamentos, operando com maior simplicidade. O sistema de condensação foi totalmente redesenhado, aproveitando melhor a área superficial para troca térmica com o ambiente, o que aumentou a eficiência na recuperação do bio-óleo. Essa versão não apresentou entupimentos, mesmo com o bio-óleo altamente viscoso do Agave. Entretanto, sua operação depende da presença de gás de arraste.

Figura 6 - Sétima versão do reator de pirólise

Caracterização do Biochar

Foram realizadas análises dos biochars produzidos nas temperaturas de 575 °C, 500 °C, 425 °C e 350 °C, com taxa de aquecimento de 10 graus Celsius por minuto e tempo de residência de 60 minutos, abrangendo rendimento, análise imediata, análise elementar orgânica e densidade.

Pirólise				
Temperatura	575 ºC	500 ºC	425 ºC	350 ºC
Tempo	60 min			
Taxa	10 ºC/min			
Rendimento	26,38%	28,33%	38,04%	52,60%
Rendimento Conversão de C	49,57%	52,63%	70,37%	89,61%

Tabela 1 - Rendimento e Conversão de C para os experimentos realizados

Testes do biochar no solo em milho

Devido às demandas prioritárias de desenvolvimento e otimização do reator de pirólise em escala de bancada, não foi possível realizar, dentro do escopo deste projeto, os testes de aplicação do biochar no solo. A complexidade das adaptações técnicas e o tempo dedicado à evolução do reator (através das versões V1 a V7) limitaram a execução dessa etapa complementar. No entanto, se espera ter resultados preliminares até a entrega do relatório final.

Propriedades físico-químicas				
Análise Elementar Orgânica				
◦C	65,64%	62,28%	62,90%	60,84%
◦H	2,85%	3,22%	6,74%	7,90%
◦N	1,93%	2,12%	1,77%	2,50%
◦S	0,25%	0,22%	0,18%	0,20%
H/Corg	0,468	0,535	1,125	1,433
Densidade				
◦Loss	106,71 kg/m³	121,30 kg/m³	165,35 kg/m³	147,86 kg/m³
◦Bulk (In natura)	173,23 kg/m³	171,08 kg/m³	211,50 kg/m³	174,30 kg/m³
◦Bulk (Macerated)	570,18 kg/m³	600,28 kg/m³	614,80 kg/m³	463,00 kg/m³
Outros				
pH	9,165	9,405	9,4	8,19
Condutividade	681,50 uS/cm²	1009,50 uS/cm²	1544,00 uS/cm²	2105,00 uS/cm²

Tabela 2 - Propriedades do Biochar produzido

Participação em Capítulo de livro

Durante o período desta iniciação cientifica tive a participação, dentre os autores, de um capítulo de livro nesta área da nossa linha de pesquisa. Dados gerados durante as atividades da iniciação cientifica foram utilizados para a constituição de parte dos resultados do capítulo de livro. Livro *"Sustainable Agave Fiber Production: Evaluating Biorefinery Strategies for Residue Conversion by Integrating Bio- and Thermochemical Processes."*. Mostrado na Figura 8. Atualmente se consta a uma etapa anterior a revisão dos editores.

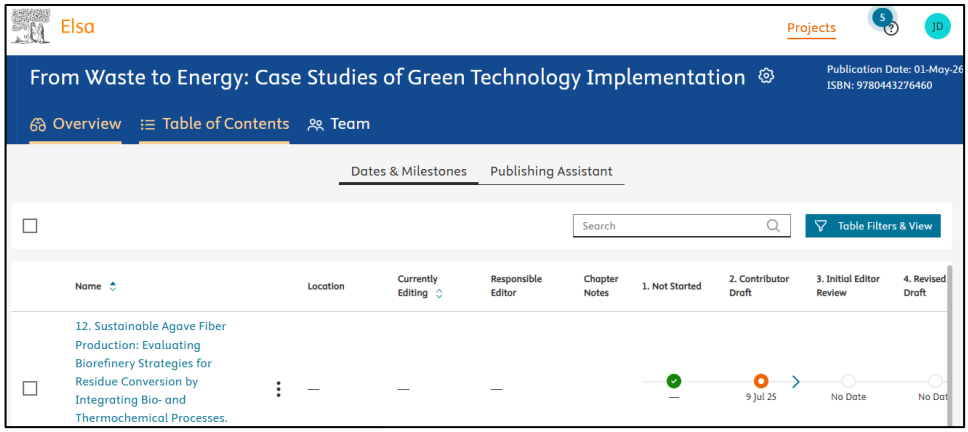

Figura 7 - Status da publicação do capítulo de livro

Participação como coautor em Artigo Científico

Durante o decorrer da iniciação cientifica, os dados gerados foram de grande utilidade em um artigo científico, sendo coautor do artigo - **From Semi-Arid Biomass to Carbon Sequestration: Role of Pyrolysis Atmosphere and Temperature on Agave-Derived Biochar Properties** (DA SILVA et al., 2025)

CONCLUSÕES:

O sistema de pirólise desenvolvido mostrou-se eficiente na produção de biochar a partir do bagaço de Agave, com rendimentos consistentes em relação ao esperado pela literatura (26-50%). A caracterização da biomassa e a operação do reator demandaram esforços significativos devido às complexidades técnicas envolvidas no desenvolvimento e aprimoramento do equipamento até sua versão final. Embora os testes controlados com aplicação de biochar em culturas – para avaliação de sequestro de carbono e efeitos agronômicos – não tenham sido realizados dentro do cronograma deste projeto, devido às demandas prioritárias de otimização do reator, esses experimentos permanecem como uma etapa essencial para estudos futuros. Este trabalho reforça o potencial da pirólise como rota sustentável para valorização de resíduos agroindustriais, alinhando produção de bioenergia e soluções para a mitigação das mudanças climáticas.

BIBLIOGRAFIA

DA SILVA, J.C.G.; RODRIGUES, L.A..M.; ALCÂNTARA, J.P.D.; ALVES, J.L.; GABRIEL FILHO, J.B.; MARACCINI, J.V.O.; PEREIRA, G.A.G.; MOCKAITS, G. From Semi-Arid Biomass to Carbon Sequestration: Role of Pyrolysis Atmosphere and Temperature on Agave-Derived Biochar Properties. ChemRxiv. 2025