

UNIVERSIDADE FEDERAL DA FRONTEIRA SUL
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA
CAMPUS CHAPECÓ

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA E PROJEÇÃO ECONÔMICA DA
BIOMASSA CAMA DE AVIÁRIO E SEUS PRODUTOS ATRAVÉS DA
CONVERSÃO ENERGÉTICA PELA PIRÓLISE**

ACADÊMICO: Marcos Vinicius Farfus Cavalli

ORIENTADOR Prof.: Dr. Guilherme Martinez Mibielli

Agosto - 2022

MARCOS VINIVIVUS FARFUS CAVALLI

**Análise de viabilidade técnica e projeção econômica da
biomassa cama de aviário e seus produtos através da
conversão energética pela Pirólise**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito
para obtenção de grau de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária da
Universidade Federal da Fronteira Sul.

Orientador: **Prof. Dr. Guilherme Martinez Mibielli**

Este trabalho de conclusão de curso foi defendido e
aprovado pela banca em: 29/08/2022

BANCA EXAMINADORA



Documento assinado digitalmente
GUILHERME MARTINEZ MIBIELLI
Data: 30/08/2022 09:45:36-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Dr. Guilherme Martinez Mibielli - UFFS



Documento assinado digitalmente
JOAO PAULO BENDER
Data: 30/08/2022 14:39:40-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Dr. João Paulo Bender - UFFS



Documento assinado digitalmente
JORGE LUIS MATTIAS
Data: 30/08/2022 15:48:14-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Dr. Jorge Luis Mattias - UFFS

ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA E PROJEÇÃO ECONÔMICA DA BIOMASSA CAMA DE AVIÁRIO E SEUS PRODUTOS ATRAVÉS DA CONVERSÃO ENERGÉTICA PELA PIRÓLISE

Marcos Vinicius Farfus Cavalli¹, Guilherme Martinez Mibielli²

RESUMO

O setor avícola no Brasil possui grande importância econômica, sendo destaque mundial nesta categoria, toda essa produção acaba gerando grandes volumes da biomassa cama de aviário, a qual necessita de uma destinação correta. As destinações convencionais utilizadas acabam gerando pouca valorização da biomassa, a qual é rica em macronutrientes, o emprego de novas tecnologias pode gerar mudanças significativas nesse cenário, criando subprodutos de maior valor agregado. Desse modo, o presente trabalho buscou analisar o emprego da pirólise como alternativa de tratamento para a biomassa, testando sua eficiência, identificando suas características e projetando sua produção visando a maximização do bio-óleo. A biomassa utilizada foi caracterizada física e quimicamente, por meio de análise imediata e digestão ácida, também foram caracterizados os produtos da pirólise com exceção dos gases não condensáveis. A produção de bio-óleo, biochar e gases não condensáveis por meio do tratamento com pirólise chegou às porcentagens (m/m) de $18,48 \pm 0,55$; $45,68 \pm 1,55$ e $35,84 \pm 1,12$ respectivamente. A caracterização do biochar mostrou que não existem perdas significativas nos macronutrientes em relação à concentração da biomassa natural. A caracterização do bio-óleo mostrou que existem componentes que, caso isolados, podem gerar uma valorização altíssima da biomassa. A viabilidade técnica foi confirmada por meio da otimização realizada em laboratório e a projeção econômica final concluiu que se pode chegar a um lucro bruto 38 vezes maior que o valor atual.

Palavras-chave: Bio-óleo, Pirólise, Valoração de resíduo, Cama de aviário, Caracterização.

ABSTRACT

The poultry sector in Brazil has great economic importance, being a world highlight in this category, all this production ends up generating large volumes of poultry litter biomass, which needs a correct destination. The conventional destinations used end up generating a low

¹ Discente do curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), *Campus* Chapecó, SC, Brasil. E-mail: marcos.farfus@gmail.com

² Docente orientador do curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), *Campus* Chapecó, SC, Brasil. E-mail: guilherme.mibielli@uffs.edu.br

valuation of biomass, which is rich in macronutrients, the use of new technologies can generate significant changes in this scenario, creating by-products with greater added value. Therefore, the present work sought to analyze the use of pyrolysis as an alternative treatment for biomass, testing its efficiency, identifying its characteristics and designing its production in order to maximize bio-oil. The biomass used was characterized physically and chemically, through immediate analysis and acid digestion, the pyrolysis products were also characterized with the exception of non-condensable gases. The production of bio-oil, biochar and non-condensable gases through the pyrolysis treatment reached, the percentages (m/m) of 18.48 ± 0.55 ; 45.68 ± 1.55 and 35.84 ± 1.12 respectively. The characterization of the biochar showed that there are no significant losses in macronutrients in relation to the concentration of natural biomass. The characterization of the bio-oil showed that there are components that, if isolated, can generate a very high value for the biomass. The technical feasibility was confirmed through the optimization carried out in the laboratory and the final projection concluded that a gross profit can be reached 38 times greater than the current value.

Keywords: Bio-oil, Pyrolysis, Waste valuation, Poultry litter, Characterization.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente o Brasil possui destaque internacional relacionado à produção agropecuária, conforme estudo feito pela EMBRAPA intitulado “*O agro no Brasil e no Mundo: uma síntese do período de 2000 a 2020*”, mostra o país, em 2020, ocupando a quarta colocação mundial na produção de grãos (arroz, cevada, soja, milho e trigo), sendo responsável por cerca de 7,8% da produção mundial. No setor de carnes (bovinos, suínos e aves), o Brasil ocupa a terceira posição, com uma produção de cerca de 9,2% do mercado mundial (ARAGÃO; CONTINI, 2021).

No setor de aves, em 2020 foram produzidos 13,84 milhões de toneladas de frango, a terceira maior produção mundial, o estado de Santa Catarina é o segundo maior produtor no Brasil, sendo responsável por 14,88% desse total, demonstrando a importância avícola para a economia do estado. Já na produção de carne de peru o estado de Santa Catarina é o segundo maior exportador brasileiro, segundo o relatório anual da Associação Brasileira de Proteína Animal (ABPA), sendo o estado responsável por cerca de 43% da exportação nacional de perus. O estado apresentou seu auge na produção de Perus no ano de 2012, atingindo cerca de 442 mil toneladas/ano, e mesmo com a produção sofrendo uma queda drástica nos últimos anos, ainda produziu em torno de 159 mil toneladas no ano de 2020. Deste montante, 26% são destinados

à exportação (48,91% com destino a África) e 74% para consumo no mercado interno brasileiro (ABPA, 2021).

Tendo em vista essa grande produção, se sabe que existem alguns produtos que sobram para descarte após cada lote produzido, sendo um desses produtos a cama de aviário. Este material tem por objetivo impedir o contato direto dos animais com o piso, absorver a água e a ração desperdiçadas durante a alimentação, além de incorporar excrementos e penas. A cama também auxilia na redução das oscilações de temperatura do aviário, contribuindo para o conforto das aves e permitindo uma maior eficiência de produção (AVILA; FIGUEIREDO; MAZZUCO, 1992). Devido a isso, existe uma grande produção final dessa biomassa, e mesmo utilizando os protocolos de reuso, os quais reduzem drasticamente a quantidade de trocas, ainda devemos lidar com sua destinação final, tendo em vista que caso seja descartado incorretamente, poderá gerar impacto ambiental. Podemos considerar o impacto ambiental conforme a resolução do CONAMA 01/86, Art.1º (CONAMA, 1986, p. 1):

“(...)considera-se impacto ambiental qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente, afetam:

I - A saúde, a segurança e o bem-estar da população;

II - As atividades sociais e econômicas;

III - A biota;

IV - As condições estéticas e sanitárias do meio ambiente;

V - A qualidade dos recursos ambientais.”

Devido às grandes concentrações de nutrientes e material orgânico, a biomassa cama de aviário tende a sofrer uma rápida decomposição, causando problemas como a volatilização de amônia, sulfeto de hidrogênio entre outros compostos orgânicos voláteis (OVIDO-RONDÓN, 2008). Seu potencial poluidor se estende por todos os meios físicos, podendo alcançar corpos hídricos e lençóis freáticos através da infiltração e escoamento superficial, ocasionando aumento das concentrações de nutrientes, demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e contaminação por patógenos (SEIFFERT, 2000).

Conforme exposto anteriormente, é de grande interesse a destinação correta desse material. Para tal, um folheto informativo da EMBRAPA (2017), sugere três métodos para a disposição final, sendo eles: uso direto como adubo, compostagem e biodigestão anaeróbia. Todos estes métodos geram produtos com valor econômico, e mesmo que seja de baixo valor, é de interesse social que quando possível o manejo correto traga benefícios financeiros e não somente ambientais.

Convém sintetizar que os métodos citados acima já possuem um bom espectro de estudos realizados, tanto no tratamento da biomassa cama de aviário, quanto para outros

resíduos. Cada um deles possui uma particularidade na valoração da biomassa, gerando produtos dotados de valor econômico, como biofertilizantes e biogás. Um método ainda pouco difundido nesse meio é a pirólise, também conhecida como craqueamento térmico.

O processo de pirólise, conforme descrito por Basu (2013), é uma decomposição termoquímica da biomassa em uma variedade de coprodutos. Ela acontece na ausência completa de agentes oxidantes ou em quantias limitadas, que não permitam a ocorrência de gaseificação.

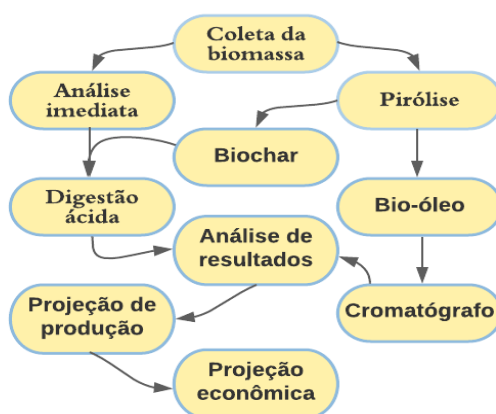
Durante a pirólise, hidrocarbonetos grandes e complexos sofrem a degradação para dar origem a moléculas mais simples e menores de gases, líquidos e sólidos (carvões-biochar). Este processo é similar ou até se sobrepõe a alguns processos, como carbonização, torrefação e destilação a seco (BASU, 2013). Suas temperaturas costumam variar entre 400 °C e 1000 °C, essa variação na temperatura é fator importante dependendo do produto que se objetiva gerar, além disso, a composição química da biomassa e sua granulometria tem influência direta na eficiência da produção (DINIZ, 2005).

A partir disso, o presente trabalho propõe a análise do potencial da biomassa cama de aviário e seus produtos através do tratamento por pirólise, visando a maior produção de bio-óleo possível, como uma alternativa aos métodos tradicionais utilizados. Para isso serão realizadas caracterizações da biomassa, ajustes no sistema de pirólise para maximização do produto, caracterização dos produtos da pirólise e projeções de produção e de lucro bruto.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Os procedimentos realizados neste trabalho são mostrados no fluxograma representado na Figura 1.

Figura 1. Fluxograma das atividades desenvolvidas no trabalho.



2.1 Coleta da biomassa

A coleta da biomassa foi realizada em propriedade rural localizada na Linha Schneider, no interior do município de Guatambu. A retirada da cama de aviário foi realizada em uma área delimitada com dimensões de 30 cm por 30 cm, escavando até o piso, sua profundidade variou de 12 cm na primeira coleta até 8 cm na última coleta. Foram efetuadas coletas em períodos de 30 dias, considerando o aumento do tempo de uso da cama, desse modo, quatro coletas foram realizadas, a primeira durante o processo de alocação da maravalha (zero dias), a segunda partindo do mês de maio/2022 (trinta dias), a terceira em junho/2022 (sessenta dias) e a quarta em julho/2022 (noventa dias). Essas coletas foram realizadas com o objetivo de verificar a ocorrência de alterações na geração dos produtos da pirólise conforme o tempo de uso da cama e se os parâmetros físicos e químicos variam significativamente. Cabe destacar que as coletas foram realizadas no dia anterior ao processo de revirada da cama, o qual ocorre a cada 30 dias nos aviários, este processo tem por objetivo homogeneizar a umidade, espessura e concentração de dejetos na cama.

2.2 Análise imediata (Caracterização da biomassa)

A potencialidade de uma biomassa ou combustível pode ser estimada através de alguns parâmetros, os quais podem ser identificados através da análise química imediata.

A análise da composição química imediata é realizada através do percentual de massa da amostra, em relação aos parâmetros: carbono fixo (CF), materiais voláteis (MV), cinzas (CZ) e umidade (W). Vale ressaltar que todas as caracterizações foram realizadas em triplicata, tanto da biomassa, quanto dos produtos da pirólise, a fim de se obter resultados mais confiáveis e homogêneos.

Esses parâmetros foram determinados através da metodologia encontrada na norma ABNT NBR 8112 de 1986 (Carvão Vegetal – Análise Imediata) e da ASTM D3175-18 (Analysis Sample of Coal and Coke), com uso de adaptações.

2.2.1 Determinação do Teor de Umidade

A biomassa referente de cada período foi pesada em triplicatas em uma placa de petri, e em seguida, foram colocadas em estufa a 105 °C por 24 horas. Posteriormente, a biomassa foi retirada e resfriada em dessecador para pesagem, sendo o procedimento repetido de hora em hora até a obtenção de uma biomassa com peso constante. O teor de umidade foi calculado de acordo com a Equação 1.

$$W = \frac{[(m_0 - m_1)]}{m_0} \times 100 \quad (1)$$

Onde: W = teor de umidade (%); m₀ = massa inicial da amostra (g); m₁ = massa final da amostra (g).

2.2.2 Determinação do Teor de Material Volátil

Utilizando a biomassa livre de umidade, pesou-se cerca de 1,5 g de material em cadinhos de cerâmica com tampa previamente secos. Essas amostras foram deixadas sobre a porta da mufla durante 3 minutos, estando a mesma previamente aquecida a 900 °C, em seguida, os mesmos foram colocados dentro da mufla com a porta fechada por mais 7 minutos, sendo retirados e resfriados em dessecador para pesagem. O teor de material volátil foi calculado de acordo com a Equação 2.

$$MV = \frac{[(m_2 - m_3)]}{m} \times 100 \quad (2)$$

Onde: MV = teor de materiais voláteis (%); m₂ = massa inicial da cápsula com amostra (g); m₁ = massa final da cápsula com amostra (g); m = massa da amostra (g).

2.2.3 Determinação do Teor de Cinzas

Utilizando as amostras produzidas no item 2.2.2, foram retiradas as tampas dos cadinhos e colocado os mesmos novamente dentro da mufla em temperatura de 850 °C até a queima completa do material. Por fim, os cadinhos foram retirados e resfriados em dessecador até a pesagem do material remanescente. O teor de cinzas foi calculado de acordo com a Equação 3.

$$CZ = \frac{[(m_1 - m_0)]}{m} \times 100 \quad (3)$$

Onde: CZ = teor de cinza (%); m₀ = massa da cápsula (g); m₁ = massa da cápsula com material (g); m = massa do material (g).

2.2.4 Determinação do Teor de Carbono Fixo

O teor de carbono fixo em base seca não foi determinado por ensaios experimentais diretos, mas sim através da correlação com os parâmetros de teor de cinzas e materiais voláteis. O teor de carbono fixo foi calculado de acordo com a Equação 4.

$$CF^s = 100 - (MV + CZ) \quad (4)$$

Onde: CZ = teor de cinzas (%); MV = teor de materiais voláteis (%); CF^s = teor de carbono fixo em base seca (%).

2.3 Pirólise

2.3.1 Reator

O reator foi construído em aço, na forma cilíndrica com as dimensões Ø 2.1/2"x 50 mm, conforme Figura 2. O cilindro possui uma de suas extremidades completamente fechada, conforme Figura 2 (c), sendo que a outra extremidade é fechada com tampão roscado. Esse tampão contém uma saída para conexão 1/4" de cobre, conforme Figura 2 (b). Os componentes foram fabricados com materiais que suportam temperaturas que variam de 250 °C a 1000 °C. A canalização de saída do gás é de cobre nas dimensões Ø 1/4" ligada ao reator pela parte frontal, utilizando uma conexão de engate rápido (Porto, 2019).

Figura 2. Componentes do reator.



Fonte: Porto, 2019, p.14.

2.3.2 Melhoria do sistema de pirólise

Ao serem realizados ensaios preliminares, notou-se a geração de algumas obstruções no tubo durante o processo, também foi possível notar o resfriamento na extensão final do tubo. Essa situação pode ser causada principalmente por dois fatores, sendo eles o comprimento do tubo e a temperatura do líquido que refrigera o condensador.

Levando em conta essas situações foram realizadas melhorias no sistema, de modo a reduzir a interferência desses fatores nos ensaios.

2.3.3 Otimização da temperatura

Buscando a otimização da produção de bio-óleo, foram realizados ensaios a procura da temperatura ideal, utilizando uma variação de 400 °C a 650 °C. Essas variações foram realizadas

com intervalos de 50 °C, de modo que fosse encontrada a temperatura que maximizasse a produção de bio-óleo com a mesma quantia de biomassa. Ressaltando que todos os ensaios citados neste item foram realizados com uso da biomassa com zero dias.

2.3.4 Maximização da produção de bio-óleo

Buscando a maximização da produção de bio-óleo em relação ao estado da biomassa, foram realizados ensaios com a biomassa natural, biomassa seca, biomassa seca triturada em moinho de facas tipo Willye (AmericanLab modelo AL – 032S - Mesh 10) e biomassa seca aplicando vácuo ao sistema através do uso de um kitasato acoplado a uma bomba de vácuo na saída do condensador. Os parâmetros para os ensaios finais foram baseados no melhor cenário observado, levando em conta a melhor produção de bio-óleo. Ressaltando que todos os ensaios citados neste item foram realizados com uso da biomassa com zero dias.

2.3.5 Produtos da pirólise com variação no tempo de uso da cama

Após as determinações das situações ideais para a produção de bio-óleo, foram realizados ensaios em triplicata com as biomassas de 30, 60 e 90 dias de uso, buscando analisar quais as diferenças que ocorrem nos padrões de geração dos produtos da pirólise.

2.4 Determinação de macronutrientes N, P e K

Tendo em vista a importância desses parâmetros para a agricultura e sendo um dos métodos mais comuns adotados para a destinação final da biomassa, seu uso como fertilizante, foi feito uso da metodologia descrita por Tedesco et al. (1995) para análise de macronutrientes em plantas e resíduos orgânicos. Esta metodologia consiste em uma digestão de 0,2 g da biomassa utilizando peróxido de hidrogênio (H_2O_2 - 30%) e ácido sulfúrico (H_2SO_4) concentrado, juntamente com uma mistura de digestão em um bloco digestor com temperatura final de 375 °C. A digestão produz um extrato com o qual foi possível determinar os macronutrientes nitrogênio, fósforo e potássio. Desse modo, foi possível acompanhar a evolução na acumulação desses nutrientes, bem como fazer uma comparação entre a concentração encontrada na biomassa coletada e no biochar produzido após a pirólise.

2.4.1 Nitrogênio

A determinação do nitrogênio foi realizada através da destilação do extrato em microdestilador Kjeldahl (Modelo MA036, Marconi), com adição de soda cáustica (NaOH - 10M). Fez-se a coleta deste destilado com o indicador ácido bórico e posteriormente titulou-se com ácido sulfúrico (H_2SO_4 - 0,025M) diluído.

2.4.2 Fósforo

A determinação do fósforo foi realizada através de espectrofotômetro (Modelo UV-1800, NOVA Instruments), utilizando o extrato produzido juntamente com molibdato de amônio (solução P-B) e ácido ascórbico, utilizando uma curva padrão de referência com leituras na faixa de 660 nm para determinar a absorbância.

2.4.3 Potássio

A determinação do potássio foi realizada através da leitura da emissão de luz do extrato diluído utilizando uma curva padrão de referência em fotômetro de chama (Modelo DM-64-4E, Digimed).

2.5 Cromatografia (Caracterização do bio-óleo)

Para a caracterização do bio-óleo foi necessária à sua mistura com diclorometano, realizando a separação de sua fase, para assim ser possível sua injeção no aparelho de cromatografia em fase gasosa acoplada ao espectrômetro de massas (GCMS - Gas chromatography-mass spectrometry), equipamento GCMS-QP2010Ultra (Shimadzu).

Foi utilizado hélio como gás de arraste, com fluxo total de 14 mL/min; temperatura do injetor: 150 °C, split 1:10; coluna capilar NST05ms (30 m x 0.25 mm x 0.25 µm) e programação de temperatura do forno de 100 °C por 6 minutos, 100 °C a 150 °C com taxa de 4 °C/min, 150 °C a 220 °C com taxa de 8°/min e 220 °C até 40 minutos. No espectrômetro de massas a temperatura da fonte de ionização foi 200 °C e da interface foi 220 °C, sendo o modo de escaneamento (m/z) 35 - 500. A biblioteca utilizada para a análise foi a NIST08s.

2.6 Projeção de produção e projeção econômica

A projeção de produção foi realizada através das informações fornecidas pelos proprietários do aviário em relação a massa média total da cama quando é retirada para venda. Desse modo, somando as informações produzidas em laboratório com a otimização de produção, foi possível determinar uma quantidade final de produtos quando utilizada a pirólise para processamento da cama retirada ao realizar a troca, estabelecendo uma relação direta de massa.

Utilizando a projeção de produção, foi realizada uma pesquisa de produtos semelhantes disponíveis no mercado e seu valor comercial, desse modo, se pode estabelecer um valor médio de venda e assim estipular uma projeção de lucro bruto. A projeção de lucro foi comparada com

o lucro obtido ao vender a cama de forma não processada para uma indústria de fertilizantes, conforme informações dos valores coletados com os proprietários.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Caracterização da biomassa

A análise imediata da biomassa está apresentada na Tabela 1, sendo todos os ensaios realizados em triplicata.

Tabela 1 - Análise imediata.

Tempo de uso (dias)	Umidade (%)	Voláteis (%)	Cinzas (%)	Carbono fixo (%)
0	10,43 ± 0,22	82,25 ± 0,33	3,39 ± 0,49	14,37 ± 0,48
30	35,07 ± 0,79	69,84 ± 0,70	9,10 ± 0,41	21,05 ± 0,32
60	39,77 ± 0,15	67,37 ± 0,14	12,41 ± 0,28	20,23 ± 0,43
90	42,57 ± 0,38	66,50 ± 0,22	14,77 ± 0,10	18,73 ± 0,28

Os resultados obtidos para a biomassa (maravalha) com zero dias de uso são semelhantes aos resultados encontrados na literatura e outros estudos da área, como Pereira et al. (2019), que obteve os valores de umidade, voláteis, cinzas e carbono fixo respectivamente 9,06%, 81,83%, 1,97% e 16,19%. Porém, não foram encontrados estudos específicos para a biomassa cama de aviário de peru que mencionasse os parâmetros em questão com 30, 60 e 90 dias de uso, sendo o mais próximo relacionado a caracterização de cama de frangos. Levando em conta que um lote de frangos tem duração média de 42 a 49 dias, conforme o manual de manejo de frangos da COBB (2019). Os estudos de Pereira et al. (2019) consideraram a permanência de 2 lotes de frango em seus ensaios, tendo o tempo de uso semelhante a biomassa utilizada na caracterização de 90 dias, obtendo os valores dos teores de umidade, voláteis, cinzas e carbono fixo, respectivamente de 22,11%, 64,35%, 16,74% e 18,91%. Esses valores são bem próximos aos encontrados nos ensaios utilizando a biomassa com 90 dias de uso, com exceção da umidade que possui bastante discrepância nos valores. Vale ressaltar que os valores de voláteis, carbono fixo e cinzas estão em base seca em ambos os trabalhos.

3.2 Pirólise

3.2.1 Melhoria do sistema de pirólise

As melhorias realizadas estão relacionadas a temperatura do tubo próximo à conexão com o condensador, sendo elas o encurtamento do tubo de coleta em cerca de 20 cm, o que resultou em uma temperatura mais homogênea por toda extensão do tubo evitando a condensação dos gases dentro do tubo e possíveis obstruções.

O aumento da temperatura de refrigeração do condensador de 12 °C para 20 °C, resultou no aumento da temperatura na conexão do tubo com o condensador e uma maior fluidez no escoamento do bio-óleo dentro do condensador. Desse modo tornando mais homogênea a obtenção do bio-óleo.

Além disso, foi realizada a limpeza interna do tubo de coleta após cada ensaio, através da inserção de um pincel longo utilizado para limpeza de vidrarias, desse modo prevenindo a obstrução do tubo por acúmulo de material.

3.2.2 Otimização da temperatura de processo

Com o sistema ajustado, foram realizados os ensaios para a biomassa natural com zero dias de uso e obtiveram os resultados descritos na Tabela 2. O aumento da temperatura inicialmente gerou um aumento na produção dos gases condensáveis, porém, ao ultrapassar a temperatura de 550 °C, sua produção decaiu, aumentando a produção de gases não condensáveis.

Tabela 2 - Otimização de temperatura.

Temperatura (°C)	Bio-óleo (%)	Biochar (%)	Gases (%)
400	2,15	44,50	53,36
450	5,01	34,08	60,91
500	7,30	27,72	64,98
550	13,30	24,72	61,98
600	8,94	25,25	65,81
650	5,76	19,98	74,27

Esse fato corrobora com os argumentos de Kabir e Hameed (2017), que mostram que temperaturas mais baixas propiciam um maior tempo de permanência do vapor, produzindo mais carvão, e que temperaturas mais altas propiciam a produção de bio-óleo.

Ao comparar os dados com a literatura, vemos que a pirólise rápida pode garantir uma produção alta de bio-óleo, permanecendo em torno de 500 °C para maximizar sua produção (BRIDGWATER; MEIER; RADLEIN, 1999; IMAM; CAPAREDA, 2012; BASU, 2013), devido a isso, todos os ensaios posteriores foram realizados a 550 °C.

3.2.3 Maximização da produção de bio-óleo

Para maximizar a produção de bio-óleo foram realizados ensaios com a biomassa natural, biomassa seca, biomassa seca triturada e biomassa seca com vácuo no sistema, os dados de produção obtidos estão descritos na Tabela 3. Os ensaios com a biomassa natural resultaram na produção de um material bastante aquoso e em baixa quantidade (7,85%), desse modo já sendo descartado. Já os ensaios com a biomassa seca e triturada resultaram na produção de um bio-óleo bastante viscoso, porém, a produção de biochar aumentou para 43,82%, desse modo também sendo descartado. Ensaios utilizando vácuo no condensador, tiveram as produções de bio-óleo muito abaixo do desejado (7,80%), desse modo também sendo descartado seu uso. Sobrando assim a biomassa seca em sua granulometria original, a qual obteve as melhores porcentagens de produção.

Tabela 3 – Produção de bio-óleo à partir da variação do estado da biomassa a temperatura de 550 °C

Estado da biomassa	Bio-óleo (%)	Biochar (%)	Gases (%)
Biomassa natural	7,85 ± 0,17	23,71 ± 0,52	68,44 ± 0,69
Biomassa seca	13,30 ± 0,21	24,57 ± 0,20	62,13 ± 0,41
Biomassa seca moída	11,22 ± 0,13	43,82 ± 0,36	44,97 ± 0,23
Biomassa seca e vácuo	7,80 ± 0,14	33,06 ± 0,16	59,15 ± 0,02

Os ensaios demonstraram que o estado ideal da biomassa para pirólise visando a produção de bio-óleo é a biomassa seca sem moagem, visto que sua produção de bio-óleo foi a de maior porcentagem em relação a quantia de biomassa tratada.

3.2.4 Produtos da pirólise com variação no tempo de uso da cama

Os ensaios realizados em triplicata com as biomassas de 30, 60 e 90 dias de uso tem seus dados de produção descritos na Tabela 4.

Tabela 4 - Produtos da pirólise.

Tempo de uso (dias)	Bio-óleo (%)	Biochar (%)	Gases (%)
30	15,55 ± 0,51	37,77 ± 0,91	43,35 ± 0,96
60	17,96 ± 0,29	43,09 ± 0,35	38,12 ± 1,07
90	18,48 ± 0,55	45,68 ± 1,55	35,84 ± 1,12

Pode-se observar a partir dos resultados da Tabela 4 que conforme o tempo de uso da biomassa aumenta, a geração de bio-óleo e biochar também aumenta, tendo uma relação inversamente proporcional com a geração de gases não condensáveis, isso pode estar sendo causado pela acumulação de material orgânico na biomassa, a qual acaba agregando mais materiais inertes e voláteis condensáveis com ao longo do tempo.

3.3 Macronutrientes (N, P e K)

Para a determinação dos macronutrientes realizada através da digestão ácida, utilizou-se as amostras de biomassa com 0, 30, 60 e 90 dias, bem como o biochar produzido com essas biomassas. Esses valores estão descritos na Tabela 5.

Tabela 5 – Macronutrientes.

Tempo de uso (dias)	Nitrogênio (m/m %)		Fósforo (m/m %)		Potássio (m/m %)	
	Biomassa	Biochar	Biomassa	Biochar	Biomassa	Biochar
0	0,10	0,10 ± 0,03	0,60 ± 0,05	1,71 ± 0,08	0,55 ± 0,03	0,69 ± 0,05
30	2,31 ± 0,09	2,13 ± 0,14	2,95 ± 0,14	6,88 ± 0,16	2,81 ± 0,02	5,69 ± 0,1
60	2,57 ± 0,14	2,40 ± 0,14	3,81 ± 0,22	7,85 ± 0,22	3,55 ± 0,04	6,05 ± 0,1
90	2,75 ± 0,09	2,57 ± 0,09	4,67 ± 0,3	8,34 ± 0,11	4,21 ± 0,12	8,75 ± 0,18

Os valores encontrados nos ensaios são próximos às médias descritas no Manual de calagem e adubação (2016), tendo somente o valor de nitrogênio abaixo dos valores médios estipulados para a cama de aviário de peru (2 lotes). Na Tabela 6 é possível fazer uma comparação desses teores com outros adubos orgânicos comumente utilizados.

Tabela 6 - Comparação dos teores NPK entre adubos orgânicos

Adubos orgânicos	Nitrogênio (m/m %)	Fósforo (m/m %)	Potássio (m/m %)
Cama de peru (90 dias)	2,75	4,67	4,21
Biochar cama de peru (90 dias)	2,57	8,34	8,75

Cama de peru (2 lotes)	5,00	4,00	4,00
Composto de dejetos de suínos	1,50	2,50	2,30
Esterco sólido de bovinos	1,50	1,40	1,50
Dejeto líquido de suínos (kg/m ³)	2,80	2,40	1,50
Dejeto líquido de bovinos (kg/m ³)	1,40	0,80	1,40

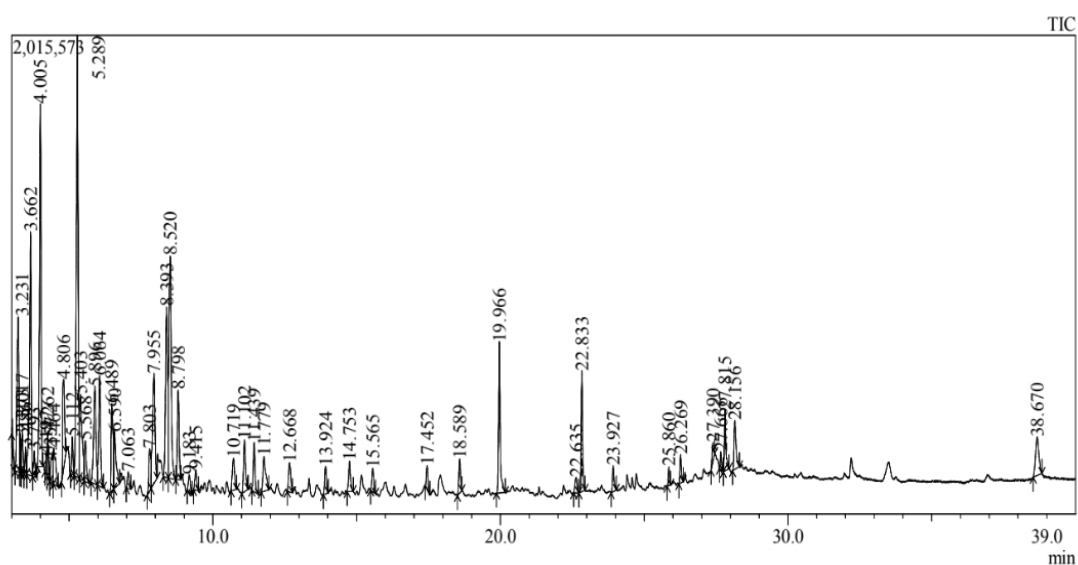
Fonte: Adaptado de Manual de calagem e adubação (2016)

Os macronutrientes encontrados na biomassa cama de aviário de peru, possuem concentrações que superam todos os outros fertilizantes orgânicos comumente usados. Outro fator interessante de se notar é que os valores de concentração de fósforo e potássio aumentaram significativamente enquanto o valor de nitrogênio sofreu uma redução de somente 0,17%, o que significa que o tratamento com pirólise não gera perdas significativas nos macronutrientes acumulados pela biomassa, tornando a mesma ainda mais superior em questão de concentração de macronutrientes em relação às demais citadas na Tabela 6.

3.4 Caracterização do bio-óleo

A amostra injetada no cromatógrafo gerou 4 picos de maior relevância, os quais representam juntos 33,71% da área do gráfico. Ainda, foram detectados mais 46 componentes, porém em menores quantidades, os picos estão representados na Figura 3.

Figura 3 - Picos gerados no GCMS.



Esses 4 picos representam os componentes 2-Methoxyphenol (12,18%), 3-Methyl-1,2-cyclopentanedione (8,08%), 1,2-Benzenediol (7,31%) e Tetrahydro-2-Furanmethanol (6,14%).

3.4.1 Guaiacol (2-Methoxyphenol)

Esse composto tem como uso principal a sintetização de vanilina e algumas aplicações farmacêuticas, conhecido como aromatizante e saborizante de baunilha. Conforme descrito por Pacheco e Damásio (2010), apenas 1% da vanilina é extraída da planta, sendo o restante sintetizado, e isso se deve aos altos custos para extração da planta em relação aos custos da sintetização. Pode-se encontrar 10 gramas desse composto à venda na Sigma-Aldrich por cerca de R\$ 5,26.

3.4.2 3-Methyl-1,2-cyclopentanedione

Esse composto é utilizado como saborizante e possui efeitos anti-inflamatórios (O'NEIL e CHEMISTRY, 2013). Podemos encontrar 10 gramas desse composto à venda na Sigma-Aldrich por cerca de R\$ 327,00.

3.4.3 Catecol (1,2-Benzenediol)

Esse composto pode ser encontrado naturalmente em frutas e verduras, sendo um anti-microbiano natural das plantas, podendo ser usado como reagente laboratorial para ensaios (SUN e PIGNATELLO, 1993). Pode-se encontrar 10 gramas desse composto à venda na Sigma-Aldrich por cerca de R\$ 190.100,00.

3.4.4 Tetrahydro-2-Furanmethanol

É um composto orgânico, tendo seu principal uso como solvente (HOEYDONCK, 2007). Pode-se encontrar 10 gramas desse composto à venda na Sigma-Aldrich por cerca de R\$ 362,00.

3.5 Projeção de produção

A projeção de produção levou em conta as eficiências encontradas nos ensaios de pirólise e os volumes informados pelos proprietários do aviário.

Conforme informações coletadas, a venda da cama de aviário é feita para indústrias de fertilizante, sendo pago o valor de R\$ 100,00 a R\$ 200,00 por tonelada, e esse valor depende de quanto tempo o material foi utilizado para alojamento, quanto mais tempo, maior o valor oferecido. A última venda realizada foi de 230 toneladas de cama, removidas de 4 aviários que totalizam uma área de 4.800 m².

Os ensaios mostraram que para cada 8 g de biomassa que eram tratadas, eram produzidos cerca de $1,23 \pm 0,03$ ml de bio-óleo e $3,66 \pm 0,12$ g de biochar. Considerando as 230 toneladas da última venda como valor inicial de massa, foram removidos 43% desse valor considerado como a umidade obtida durante a caracterização da cama, chegando a um valor de

131.100 kg de biomassa seca. Fazendo uma proporção direta de conversão, esse valor de massa seria capaz de produzir cerca de 19.665 litros de bio-óleo e 59.978 kg de biochar.

Com essa projeção de produção, foram pesquisados o valor de 3 produtos de marcas diferentes com características semelhantes em lojas online, chegando à média de R\$ 28,00 por litro de bio-óleo e R\$ 20,00 por kg de biochar. Utilizando como base esses valores e as produções calculadas anteriormente, é projetado um lucro bruto de cerca de R\$ 550.620,00 para o bio-óleo e R\$ 1.199.560,00 para o biochar, totalizando R\$ 1.750.180,00. Esses valores mostram uma valoração bem alta da biomassa, tendo em conta que o lucro máximo estipulado para a venda direta seria de R\$ 46.000,00, e, ao se realizar o tratamento com a pirólise, temos um aumento projetado de cerca de 38 vezes o valor atual. Vale salientar que os gases de síntese não condensáveis não participaram dessa projeção, ou seja, ainda se tem uma boa fração (35%) para agregar mais valor à projeção.

Devido a biomassa ser utilizada em média por pelo menos um ano antes de sua troca, pode haver falta de matéria-prima para a planta de pirólise, sendo o ideal a criação dessa planta por parte da indústria que atualmente faz a compra da biomassa, pois a mesma já possui inúmeros fornecedores da matéria prima.

4. CONCLUSÃO

A biomassa de cama de aviário de peru é um resíduo agrícola rico em macronutrientes. Além da aplicação direta como fertilizante, ela possui potencial para ser convertida em diversos produtos através do tratamento com pirólise, e esses produtos podem ser refinados, gerando materiais como bio-fertilizantes, combustíveis, reagentes de síntese, entre outros. Por consequência, a produção desses produtos a partir da pirólise envolve a otimização dos processos do sistema e do manuseio da biomassa. Para obtenção da maior eficiência possível, a caracterização físico-química é de extrema importância para que se consiga avaliar as alterações de ganhos e perdas de cada parâmetro, para que desse modo se possa ter uma projeção de produção mais coesa.

O processo de otimização da pirólise objetivando a produção de bio-óleo, conseguiu chegar ao valor de 18,48% de conversão massa/massa. Além disso, o processo de pirólise mostrou agregação no valor de macronutrientes contidos na fração sólida (biochar), uma vez que aumentou a concentração de fósforo e potássio, não causando reduções significativas no nitrogênio.

A análise realizada no GCMS mostrou que o bio-óleo obtido possui alguns componentes predominantes (33,71%), sendo alguns com valor comercial relevante em caso de extração e purificação do mesmo para uso laboratorial, podendo gerar uma valoração alta do resíduo. As projeções realizadas mostraram que ao utilizar o tratamento de pirólise na biomassa cama de aviário de peru, pode-se gerar produtos de alto valor agregado, ultrapassando em 38 vezes o valor obtido pela venda direta para a indústria de fertilizantes.

Portanto, o presente estudo mostrou que existe viabilidade técnica para o tratamento da biomassa cama de aviário de peru, uma vez que foi possível sua aplicação e otimização em laboratório. Quanto à projeção econômica, foi identificada uma alta valoração do produto ao realizar o tratamento da biomassa com pirólise, porém, quanto aos custos da implantação e manutenção de uma planta de pirólise, não foi possível identificar se existe ou não viabilidade econômica.

REFERÊNCIAS

ABPA. Associação Brasileira de Proteína Animal. **Relatório Anual 2021**. São Paulo, SP: [s.n.], 2021. Disponível em: <http://abpa-br.org/relatorios/>. Acesso em: 17 dez. 2021.

AVILA, Valdir Silveira de; FIGUEIREDO, Elcio Antônio Pereira de; MAZZUCO, Helenice. **Cama de aviário**: materiais, reutilização, uso como alimento e fertilizante. Concórdia, SC: EMBRAPA-CNPSA, 1992.

AVILA, Valdir Silveira de; OLIVEIRA, Ubirajara de; FIGUEIREDO, Elcio Antônio Pereira de; COSTA, Carlos Alberto Fagundes; ABREU, Valéria Maria Nascimento; Rosa, Paulo Sérgio. Avaliação de materiais alternativos em substituição à maravalha como cama de aviário. **Revista Brasileira de Zootecnia**, [s.l.], v.37, n.2, p.273-277, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1516-35982008000200013>. Acesso em: 04 mar. 2022.

ARAGÃO, Adalberto; CONTINI, Elisio. **O agro no Brasil e no mundo**: uma síntese do período de 2000 a 2020. [s.l.]: [s.n.], EMBRAPA-SIRE, 2021.

BASU, Prabir. **Biomass Gasification and Pyrolysis**: practical design and theory. 2ª. ed. Burlington: Academic Press, 2013.

BRIDGWATER, Anthony V.; MEIER, Dietrich; RADLEIN, Desmond. An overview of fast pyrolysis of biomass, **Organic Geochemistry**, v. 30, p. 1479-1493, 1999. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(99\)00120-5](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(99)00120-5). Acesso em: 04 mar. 2022.

VANTRESS, Coob. **Manual de Manejo de Frangos de Corte**. [s.l.]: [s.n.], 2019. Disponível em: <https://www.cobb-vantress.com/assets/Cobb-Files/df5655a7e9/Broiler-Guide-2019-POR-WEB.pdf> . Acesso em: 04 mar. 2022.

DINIZ, Juraci. **Conversão térmica de casca arroz a baixa temperatura: produção de bio-óleo e resíduo sílico-carbonoso adsorvente**. Tese (Doutorado em Química) – Setor de ciências exatas e da Terra, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/4152/Tese%20Juraci1.pdf>. Acesso em: 04 mar. 2022.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária; BASSI, Levino José; ALBINO, Jacir José; ÁVILA, Valdir Silveira de; SCHMIDT, Gilberto Silber; JAENISCH, Fátima Regina Ferreira. **Recomendações Básicas para Manejo de Frangos de Corte Colonial**. Concórdia, SC: Concórdia: Embrapa Suínos e Aves, 2006. Disponível em: https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/recomend_basicas_manejo_fringo_corte_colonial_000fzo3uv2402wx5ok0cpoo6aa9o60gh.pdf. Acesso em: 17 dez. 2021.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária; PALHARES, Júlio César Pascale. **Manejo ambiental da cama de aviário**. São Carlos, SP: Embrapa Pecuária Sudeste, 2017. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/1074604>. Acesso em: 17 dez. 2021.

HOYDONCKX, H. E.; Van Rhijn, W. M.; Van Rhijn, W.; De Vos, D. E.; Jacobs, P. A. **Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry**, Furfural and Derivatives. Weinheim: Wiley-VCH, P. 285-309, 2007. Disponível em: https://doi.org/10.1002/14356007.a12_119. Acesso em: 04 mar. 2022.

IMAM, Tahmina; CAPAREDA, Sergio. Characterization of bio-oil, syn-gas and bio-char from switchgrass pyrolysis at various temperatures. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 93, p. 170-177, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2011.11.010>. Acesso em: 04 mar. 2022.

KABIR, G.; HAMEED, Bassim Hammadi. Recent progress on catalytic pyrolysis of lignocellulosic biomass to high-grade bio-oil and bio-chemicals. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 70, p. 945-967, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.001>. Acesso em: 04 mar. 2022.

O'NEIL, M.J.; CHEMISTRY, R.S. **The Merck Index: An Encyclopedia of Chemicals, Drugs, and Biologicals**, Royal Society of Chemistry: Cambridge, UK, 2013.

OVIEDO-RONDÓN, Edgar O. Tecnologias para mitigar o impacto ambiental da produção de frangos de corte. **Revista Brasileira de Zootecnia**, [s.l], v.37, suplemento especial p.239-252, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1516-35982008001300028>. Acesso em: 04 mar. 2022.

PACHECO, Sabrina Moro Villela; DAMASIO, Felipe. Vanilina: Origem, Propriedades e Produção. **QUÍMICA NOVA NA ESCOLA**, [s.l], v.32, n.4, p.215-219, 2010. Disponível em: http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc32_4/02-QS3909.pdf. Acesso em: 04 mar. 2022.

PEREIRA, M. E.; Varanda, L. D.; Nakashima, G. T.; Hansted, A. L. S.; Silva, D. A.; Tomeleri, J. O. P.; Belini, G. B.; Yamaji, F. M. Caracterização da Biomassa de Cama de Frango para Fabricação de Biochar. **Revista Virtual de Química**, v.11, n.4, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.21577/1984-6835.20190092>. Acesso em: 04 mar. 2022.

PORTO, Jorge Arenilson Ferreira. **Pirólise: uma alternativa para tratamento de resíduos sólidos nas comunidades rurais**. Orientador: Guilherme Martinez Mibielli. 2019. 24 f. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal da Fronteira Sul, Chapecó, 2019.

SEIFFERT, Nelson Frederico. Planejamento da atividade avícola visando qualidade ambiental. In: Proceedings do **Simpósio sobre resíduos da Produção Avícola**. Concórdia, SC: Concórdia: Embrapa Suínos e Aves, 2000. Disponível em: http://docsagencia.cnptia.embrapa.br/suino/anais/anais65_seiffert.pdf. Acesso em: 04 mar. 2022.

Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. **Manual de calagem e adubação para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo - Núcleo Regional Sul. – [s. l.] : Comissão de Química e Fertilidade do Solo - RS/SC, 2016. 376 p. : il. ISBN: 978-85-66301-80-9

SUN Yunfu; PIGNATELLO, Joseph J. Activation of hydrogen peroxide by iron(III) chelates for abiotic degradation of herbicides and insecticides in water. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 41, n.2, p. 308-312, 1993. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/jf00026a034>. Acesso em: 04 mar. 2022.

TEDESCO, Marino José; GIANELLO, Clesio; BISSANI, Carlos Alberto; BOHNEN, Humberto; VOLKWEISS, Sérgio Jorge. **Análises de solo, plantas e outros materiais**. 2.ed. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p. (Boletim Técnico, 5)

UBA. Associação Brasileira de Avicultura. **Protocolo de Bem-Estar para Frangos e Perus**. São Paulo, SP: [s.n.], 2008. Disponível em: https://www.avisite.com.br/legislacao/anexos/protocolo_de_bem_estar_para_frangos_e_perus.pdf. Acesso em: 04 mar. 2022.