

REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

PRODUÇÃO DE MATERIAIS RENOVÁVEIS UTILIZANDO BIOMASSA AGROINDUSTRIAL (SOJA) POR MEIO DE REATOR TERMOQUÍMICO

Fabício Machado Silva¹
Luciana Rezende Alves de Oliveira¹
* Marcelo Mendes Pedroza²
Aymara Gracielly Nogueira Colen²
Pedro Henrique Borges do Amaral²
Marcel Sousa Marques²

PRODUCTION OF RENEWABLE MATERIALS USING AGROINDUSTRIAL BIOMASS (SOYBEAN) BY MEANS OF THERMO-CHEMICAL REACTOR

Recibido el 5 de junio de 2019; Aceptado el 18 de septiembre de 2020

Abstract

Among the most abundant lignocellulosic residues in the Brazilian agribusiness, soybean hull stands out. In Brazil, the cultivation of soy represents 57.2% of the total area cultivated with grains, being the second largest world producer in grains, which reached a production of 95.4 million tons in the 2015/2016 harvest. It is estimated that the soybean crop produces about 2,700 t of waste for every 1,000 t of processed grains. The present work aims to effect the thermal degradation of soybean husk and bran for the production of bioproducts (bio-oil and activated carbon), the latter being used in the manufacture of filters for the removal of chlorine from the water supply. Pyrolysis was carried out in a fixed bed reactor with temperatures ranging between 500 and 700 °C. The following process variables were studied: temperature, heating rate, inert gas flow and reaction time. The moisture content of the husk was 3.71% and 9.89% for the bran. The content of volatile material in the husk (90.02 %) was quite expressive, as well as the bran (84.21%). The products generated during the pyrolysis tests were: solid fraction (husk-30.0%; bran-28.33%) and liquid (husk-47.19%; bran-43.70%), with potential for commercial / industrial use. The activated carbon obtained from the two residues (husk and bran) was efficient in the process of removing chlorine from the water supply. The efficiency in the removal of chlorine in a filtration system with coal in this research was 100% over the monitored period.

Keywords: reuse, technological routes, waste.

¹ Departamento de Química, Laboratório de Resíduos Químicos, Universidade de Ribeirão Preto (UNAERP), Brasil.

² Departamento de Meio Ambiente, Laboratório de Inovação em Aproveitamento de Resíduos e Sustentabilidade Energética (LARSEN), Instituto Federal de Ciência, Educação e Tecnologia do Tocantins (IFTO), Palmas, Tocantins, Brasil.

* *Autor correspondente:* Departamento de Meio Ambiente, Laboratório de Inovação em Aproveitamento de Resíduos e Sustentabilidade Energética (LARSEN) do Instituto Federal de Ciência, Educação e Tecnologia do Tocantins (IFTO), Palmas – Tocantins, CEP: 77021-090, Brasil. Email: mendes@ifto.edu.br

Resumo

Dentre os resíduos lignocelulósicos mais abundantes da agroindústria brasileira, destaca-se a casca de soja. No Brasil, o cultivo da soja representa 57.2% da área total cultivada com grãos, sendo o segundo maior produtor mundial em grãos, que atingiu a produção de 95,4 milhões de toneladas na safra 2015/2016. Estima-se que a cultura da soja produza cerca de 2.700 t de resíduos para cada 1 000 t de grãos processados. O presente trabalho tem como objetivo efetuar a degradação térmica da casca e farelo da soja para a produção de bioprodutos (bio-óleo e carvão ativado), sendo este último empregado na confecção de filtros para a remoção de cloro de água de abastecimento. A pirólise foi realizada em reator de leito fixo com temperaturas variando entre 500 e 700 °C. Foram estudadas as seguintes variáveis de processo: temperatura, taxa de aquecimento, vazão de gás inerte e tempo de reação. O teor de umidade da casca foi de 3.71% e 9.89% para o farelo. O teor de material volátil da casca (90.02%) foi bem expressivo assim como o do farelo (84.21%). Os produtos gerados durante os ensaios de pirólise foram: fração sólida (casca-30.0 %; farelo-28.33 %) e líquida (casca-47.19%; farelo-43.70%), possuindo potencial para utilização comercial/industrial. O carvão ativado obtido a partir dos dois resíduos (casca e farelo da soja) foi eficiente no processo de remoção de cloro da água de abastecimento. A eficiência na remoção de cloro em sistema de filtração com o carvão dessa pesquisa foi de 100 % ao longo do período monitorado.

Palavras chave: aproveitamento, rotas tecnológicas, resíduos.

Introdução

Atualmente, a produção de biocombustíveis vem gerando uma grande importância para o cenário global. A geração de energia através da queima de combustíveis fósseis, tais como o petróleo e o carvão mineral, produzem uma grande emissão de gases de efeito estufa, além de produzir resíduos que são descartados indevidamente e que poluem o meio ambiente (Bridgwater, 2012; Pedroza *et al.* 2017).

Além disso, a própria extração desses combustíveis fósseis é um processo que agride o ambiente, contaminando lençóis freáticos, rios, solos e oceanos, fazendo com que o processo de recuperação das áreas afetadas seja trabalhoso e os custos de investimentos dessa extração sejam ainda maiores (Freitas e Silva, 2008). Outro ponto desfavorável em relação aos combustíveis fósseis é o fato de serem recursos esgotáveis, e o consumo crescente nos últimos anos de petróleo e carvão faz com que se tornem cada vez mais escassos na natureza (International Energy Agency, 2017).

Tendo em vista esses fatores, investigar alternativas para a produção de uma energia sustentável é essencial para reduzir esses impactos na natureza. Os biocombustíveis surgem como uma alternativa viável para substituir esses combustíveis fósseis (Freitas e Silva, 2008), e por isso as pesquisas nessa área vem crescendo nos últimos anos, e um dos processos que tem demonstrando eficiência na produção de biocombustíveis é o aproveitamento de resíduos através da pirólise de biomassa.

O uso dos resíduos de produção agrícola tem tomado grande parte do estudo do uso de biomassas, visto que a agricultura é uma das principais bases na economia do país tornando-se viável e vantajoso esses estudos direcionando a resíduos agrícolas. De acordo com a EMBRAPA SOJA (2017), o Brasil é o segundo maior produtor de soja do mundo, tendo base que na colheita de 2015/2016 colheu-se cerca de 95.63 toneladas de soja no Brasil, destacando os estados de Mato Grosso (maior produtor), Paraná (segundo maior produtor), Rio Grande do Sul, Bahia, Pernambuco, Maranhão e Tocantins (EMBRAPA Soja, 2017).

Os processos de produção de derivados da soja, processos esses como a moagem secagem e peletização produzem além de um grão limpo para a comercialização, uma série de resíduos como a casca e o farelo, muito usado na ração para gado, que por sua vez pode ser bem aproveitado no estudo do uso com biomassa (Pukasiewicz, 2004). Os resíduos agrícolas da cultura da soja apresentam em suas constituições ótimas fibras que podem ser aproveitadas em processos térmicos como a pirólise, produzindo biocombustíveis de alta qualidade.

No Brasil, a agricultura voltada para o plantio de soja representa cerca de 57.2% da área total cultivada com grãos, mostrando-se como o segundo maior produtor mundial, que atingiu a produção de 95.4 milhões de toneladas na safra 2015/2016, contribuindo com aproximadamente US\$ 3.8 bilhões em exportações sob a forma de soja triturada, casca e farelo de soja, óleo de soja bruto e óleo refinado (Silva, 2019). A produção de grãos no Estado do Tocantins representa uma quantia aproximada de 3,5 milhões de toneladas de grãos, destacando-se assim a soja como o principal grão cultivado, apresentando uma produção estimada de 2.22 milhões de toneladas produzidas em 2013/2014 (CONAB, 2014). O resíduo da produção de soja (casca) possui uma fração de massa substancial de 7 a 8% da massa total contida no grão, demonstrando-se como o maior subproduto gerado na indústria de processos de soja (Ferrer *et. al.*, 2016).

A pirólise é definida como o processo de conversão termoquímica de uma cadeia de carbono, no qual a decomposição da matéria ocorre por um aumento da temperatura do sistema. É capaz de converter materiais em produtos altamente sustentáveis como o biocarvão, bio-óleo e o biogás. Durante o processo, a biomassa sofre um conjunto muito complexo de reações químicas como: craqueamento, eliminação, adição, substituição e polimerização das substâncias. Tal processo tem sido amplamente utilizado na obtenção de combustíveis por meio de resíduos de biomassa de produções agrícolas, ou até mesmo em resíduos industriais ou urbanos. O que faz com que a pirólise seja uma alternativa sustentável para o tratamento desses resíduos e, além disso, para a obtenção de energia limpa, tendo em vista pela disponibilidade destes recursos. Por conta de sua eficiência e sua sustentabilidade, o processo da pirólise vem sendo cada vez mais estudado, e novas tecnologias que por sua vez surgem para melhorar sua eficiência energética na produção dos combustíveis gerados (Pedroza *et al.*, 2014).

A utilização de subprodutos residuais como fonte de matéria-prima na obtenção de biocombustíveis através da aplicação do processo térmico, mostra-se como uma alternativa ecoeficiente, tendo como principal ganho ambiental a diminuição do lançamento inadequado de resíduos no meio ambiente local, assim como, na obtenção de produtos dotados de valor econômico, como o bio-óleo e gases combustíveis, reintegrando os resíduos que seriam descartados sem nenhum aproveitamento energético em fonte de energia de processos (Pedroza *et al.*, 2010).

A utilização de subprodutos residuais como fonte de matéria-prima na obtenção de biocombustíveis através da aplicação do processo térmico, mostra-se como uma alternativa ecoeficiente, tendo como principal ganho ambiental a diminuição do lançamento inadequado de resíduos no meio ambiente local, assim como, na obtenção de produtos dotados de valor econômico, como o bio-óleo e gases combustíveis, reintegrando os resíduos que seriam descartados sem nenhum aproveitamento energético em fonte de energia de processos (Pedroza *et al.*, 2010).

A utilização de subprodutos gerados a partir de toda cadeia produtiva da agricultura mostra-se como uma excelente alternativa para diminuir a utilização de recursos naturais intensamente explorados, uma vez que, a utilização de resíduos lignocelulósicos contidos na biomassa vegetal para fins energéticos ou bioprodutos demonstram uma real fonte de produção de novos materiais de alto desempenho, com uma aplicação comercial/industrial promissora (Nascimento *et al.*, 2017).

A investigação dos diferentes equipamentos e sistemas para o processo de pirólise é de grande importância para desenvolver e modelar uma tecnologia que seja capaz de superar os diferentes equipamentos e técnicas disponíveis no mercado atual. Os reatores químicos são muito empregados como rotas da conversão termoquímica da biomassa. Eles são projetados para conter reações químicas de interesse em uma escala industrial. São capazes de processar reações químicas com maior eficiência gerando um alto rendimento do produto (Brossard *et al.*, 2003).

Esse trabalho tem como objetivo avaliar o funcionamento de um reator de leito fixo durante o processo de degradação térmica de resíduos da indústria da soja da região do MATOPIBA (Brasil), visando à produção de bio-óleo e carvão ativado, sendo este último empregado na adsorção de cloro residual de água de abastecimento.

Metodologia

Coleta de biomassa

A coleta da amostra de casca e farelo da soja foi realizada no mês de Abril de 2017 no setor agroindustrial de Porto Nacional - TO. Para a coleta dos resíduos proveniente da indústria da soja

foi utilizado um balde de 10 litros que serviu de recipiente temporário para o armazenamento do material. Cerca de 6 kg de material foi coletado e transportado até o Laboratório de Inovação e Aproveitamento de Resíduos e Sustentabilidade Energética (LARSEN) do Instituto Federal do Tocantins (IFTO) - Campus Palmas, conforme Figura 1.

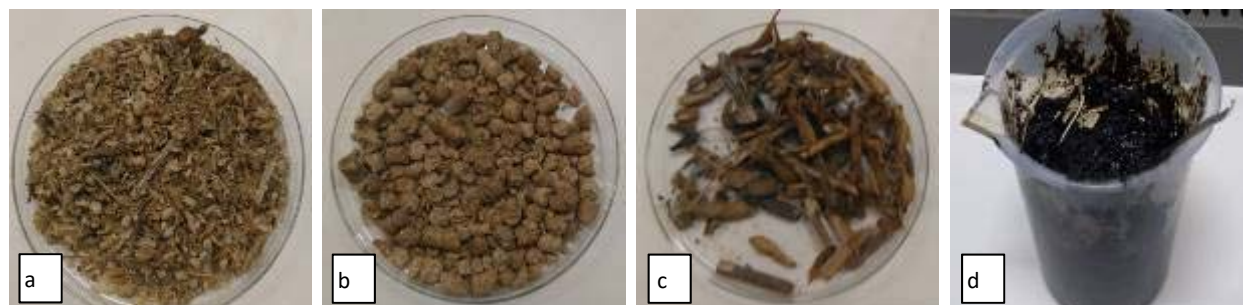


Figura 1. Resíduos da Indústria da Soja: a) Casca; b) Farelo; c) Vagem; d) Lodo industrial.

Plano de Amostragem – Codificação

O plano de amostragem-codificação foi definido conforme a Tabela 1, que estabelece uma identificação para os resíduos da soja de acordo com granulometria da amostra. Para obter a granulometria desejada, as amostras foram trituradas através de um liquidificador industrial de baixa rotação.

Tabela 1. Codificação das amostras dos resíduos da indústria da soja.

CS	Casca de Soja	CS 1	Normal (<i>In Natura</i>)	CS 1.1	Mesh 09
				CS 1.2	Mesh 14
		CS 2	Seco	CS 2.2	Mesh 09
				CS 2.1	Mesh 14
FS	Farelo de Soja	FS 1	Normal (<i>In Natura</i>)	FS 1.1	Mesh 09
				FS 1.2	Mesh 14
		FS 2	Seco	FS 2.2	Mesh 09
				FS 2.1	Mesh 14

Logo após, as amostras foram peneiradas em peneiras com abertura de 2,00 mm em TYLER/MESH 9 e também em TYLER/MESH 14 com abertura de 1,18 mm, obtendo-se assim, possibilidades distintas para a análise do resíduo. O processo de peneiramento garante uma melhor homogeneidade do material, além de favorecer as análises procedimentais e garantir melhores resultados.

Análises Imediatas

A umidade dos resíduos foi determinada de acordo com a norma ASTM 3173, os teores de material volátil e cinzas segundo a norma ASTM 2415 e o carbono fixo foi obtido por diferença.

Fabricação de Briquetes para o processo de pirólise

A fim de atingir resultados mais eficientes no processo pirolítico e concentrar a energia disponível da biomassa, foi feita a secagem e briquetagem da amostra do farelo e casca de soja. Os briquetes foram produzidos artesanalmente (Figura 2 – a; b), de forma a garantir um maior controle e autonomia no processo da produção. Utilizando um béquer de 600 mL, foram mensurados 500 mL da amostra FS 2.2 e CS 2.2, em seguida foram pesadas as biomassas com o auxílio de um béquer em uma balança digital de forma a obter o peso equivalente em gramas da biomassa.

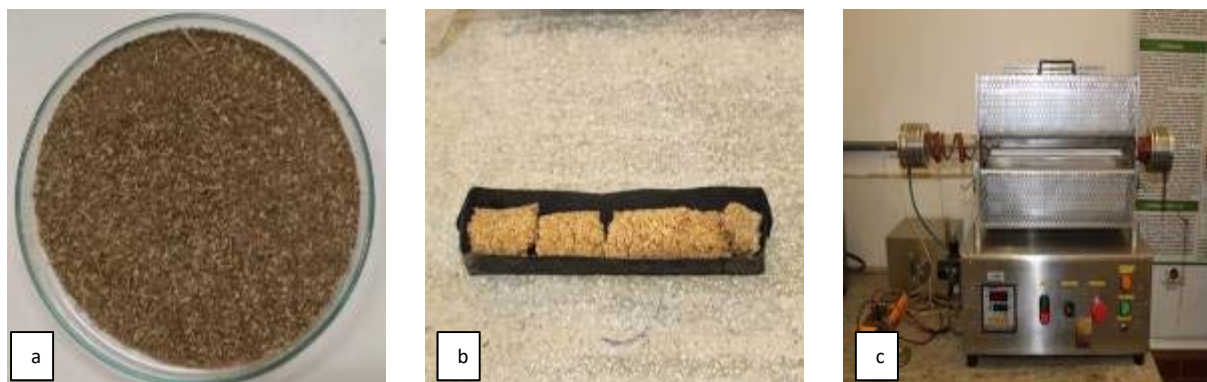


Figura 2. Obtenção de Briquetes artesanamente: a) preparação da amostra homogeneizada; b) produção de briquetes artesanais para o reator; c) reator de leito fixo.

Em seguida, transferiu-se a biomassa a um recipiente de plástico de capacidade igual a 9 litros, e acrescentou-se junto à amostra, 500 mL de água destilada que serviu para formar a liga do material. Para atingir o ponto ideal de homogeneidade do composto, a massa foi misturada utilizando as mãos protegidas de luvas, fazendo movimentos circulares e verificando sua liga. Foram acrescentados em seguida 100 mL de água destilada para atingir o ponto ideal para montagem dos briquetes. Posteriormente, o material ficou em repouso por um período de 30 minutos e por fim foi introduzido no reator (Figura 2 – c).

Sistema e Ensaios de Pirólise

O sistema de pirólise consistiu em duas partes fundamentais: o reator químico de leito fixo e o sistema de condensação. O reator foi projetado e desenvolvido no Laboratório de Aproveitamento de Resíduos e Sustentabilidade e Energia (LARSEN), ele é composto por uma câmara de aquecimento na qual abriga o tubo de quartzo que contém dois flanges em suas extremidades, cuja finalidade é de fazer a vedação do interior do tubo. Além disso, os flanges possuem saídas que permitem a passagem do gás de arraste. O tubo comporta a amostra e garante a atmosfera inerte necessária para o processo de pirólise. Nos ensaios de pirólise foi empregado o gás nitrogênio como gás de arraste de vapores do sistema. A câmara de aquecimento está situada sobre uma partição que comporta o sistema elétrico e o sistema de automação do reator. O reator é alimentado com voltagem de 220V e possui uma temperatura máxima (pico) de 1200 °C. A representação do reator e suas especificações são descritas a seguir.

Foram observadas perdas de temperatura significativas nas extremidades do tubo de quartzo durante o processo de montagem do sistema de pirólise. Adotou-se então, uma medida para compensar essa diminuição na temperatura do tubo durante os ensaios de pirólise. Foi instalado um sistema de resistências elétricas na forma de serpentina de modo que circundam o tubo de quartzo nas suas extremidades. As resistências são alimentadas juntamente ao sistema elétrico do reator através da fonte de alimentação. Para monitorar a temperatura no tubo utilizou-se um multímetro digital ligado em um dos flanges.

O sistema de condensação é composto por um Condensador Friederich, que condensa o gás que é liberado durante a pirólise da biomassa no tubo de quartzo, e um Kitassato de 1000 mL, que armazena o bio-óleo que escoar pela serpentina do condensador e expelir o gás de arraste através de uma saída lateral. O resfriamento do condensador era feito através de uma Moto-Bomba de Aquário cuja função era realizar a circulação da água de resfriamento na câmara maior do condensador, sendo submersa em um recipiente com capacidade de 1 litro. O condensador e o kitassato são sustentados por garras acopladas em um suporte de ferro.

Planejamento Experimental para casca e farelo de soja

Os ensaios de pirólise realizados com casca de soja foram realizados com e sem ativação conforme foram estabelecidos 3 parâmetros (Temperatura; Taxa de aquecimento e Tempo de Processo) de modo a avaliar diferentes condições nas análises experimentais (com e sem ativação) da biomassa em estudo no reator como pode ser observado na Tabela 2.

Os ensaios para a conversão termoquímica com o farelo de soja foram realizados de forma a avaliar simultaneamente diversos parâmetros de controle no processo, e também otimizar os experimentos quali-quantitativamente. Estabeleceu-se o Planejamento Fatorial 2^{4-1} como ferramenta estatística. Foram estabelecidos 4 parâmetros de modo a avaliar diferentes condições

nas análises experimentais: Temperatura; Taxa de aquecimento; Vazão Inerte; Tempo de Pirólise. Foram realizados 8 ensaios experimentais como pode ser observado na Tabela 3.

Tabela 2. Parâmetros para Ativação Termoquímica (no Reator) para Casca de Soja em ensaios sem/com ativação.

Ensaio sem ativação	Temperatura (°C)	Taxa de Aquecimento (°C/min)	Tempo (min)
1	500	30	30
2	500	30	30
3	500	30	30
Ensaio com ativação	Temperatura (°C)	Taxa de Aquecimento (°C/min)	Tempo (min)
1	700	20	30
2	700	20	30
3	700	20	30

Tabela 3. Parâmetros para Planejamento Experimental 2⁴⁻¹ (no Reator) para farelo de soja.

Ensaio	Temperatura (°C)	Taxa de Aquecimento (°C/min)	Vazão do Gás (mL/min)	Tempo (min)
1	500	10	1	30
2	550	10	1	60
3	500	20	1	60
4	550	20	1	30
5	500	10	4	60
6	550	10	4	30
7	500	20	4	30
8	550	20	4	60

Fabricação de Filtro Sustentável

Com o intuito de investigar a aplicação industrial dos produtos obtidos, foram realizados testes de adsorção dos carvões obtidos nessa pesquisa. Os testes foram feitos em filtros descendentes fabricados artesanalmente no LARSEN/IFTO, sendo desenvolvidos dois ensaios distintos, de forma a avaliar a eficiência do meio filtrante utilizando o carvão produzido na pirólise de casca (teste de azul de metileno) e farelo de soja (remoção de cloro residual de água de abastecimento).

O primeiro ensaio realizado foi utilizado como meio filtrante o carvão da casca de soja, a fim de tratar efluentes de indústrias de corantes e pigmentos. Uma solução precursora para as análises futuras foi empregada, sendo composta a partir de água destilada e uma concentração de 1.75 mg/L de azul de metileno. O meio filtrante foi armazenado no interior do tubo PVC, e foi isolado com uma tela de tecido para garantir que o conteúdo do filtro não fosse carregado com o efluente. O conteúdo filtrante foi constituído de algodão hidropônico, areia e carvão; o algodão

foi distribuído nas extremidades do tubo PVC, entre o algodão foi depositado areia em granulometria obtida em MESH 14, criando uma camada de areia de 7.25 g, 4.85 g de carvão foram depositadas sob a camada de areia formando uma camada de carvão, uma segunda camada de areia (com a mesma da primeira camada) foi adicionada de forma a preencher o espaço do tubo de PVC fechando o conteúdo filtrante com o algodão hidropônico.

No teste de remoção de cloro de água de abastecimento empregando o carvão obtido a partir do farelo da soja foi empregado um sistema constituído dos seguintes componentes: (a) reservatório do efluente, (b) bomba peristáltica, (c) motor-agitador do efluente e (d) filtro de carvão. O transporte de líquidos foi realizado por tubulação de silicone (Figura 3).

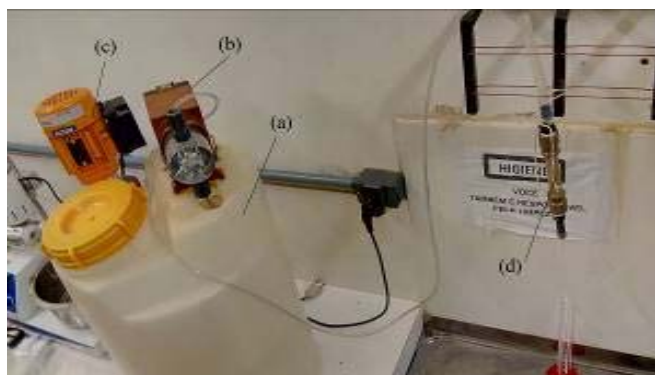


Figura 3. Sistema de Filtração de Efluentes.

O reservatório do efluente foi montado a partir de um galão com capacidade de 100 litros. O motor-agitador e a bomba peristáltica foram acoplados na parte superior do galão a fim de permitir acesso do efluente para o sistema. A alimentação do filtro foi controlada pela vazão programável da bomba que permitiu avaliar a eficiência do filtro mediante a vazão do efluente.

Os filtros foram fabricados a partir de um tubo de PVC com 20 mm de diâmetro e 12cm comprimento, com conexões 'luva' nas extremidades do tubo e conexões 'bico de torneira' de plástico para melhor vedação dos tubos de silicone. Além disso, fita veda rosca foi aplicada em torno das conexões para garantir que os líquidos não vazassem do sistema.

Esse segundo ensaio, realizado com o farelo da soja, foi analisado a eficiência de filtração de cloro em uma solução com água destilada com uma concentração de 1.8 mg/L de cloro. A constituição do meio filtrante foi fabricada conforme a metodologia do primeiro ensaio, sendo realizado o monitoramento do sistema ao longo do tempo. As vazões empregadas nesse teste variaram entre 4 e 10 mL/min, sendo operado durante aproximadamente 250 horas em regime contínuo.

Resultados

Análises Imediatas

Os dados de umidade, cinzas, materiais voláteis e carbono fixo dos dois resíduos da indústria da soja, empregados nessa pesquisa, estão apresentados na Tabela 4. Vale aqui destacar que tais resíduos foram usados separadamente no processo de pirólise para a produção de carvão e óleos combustíveis.

Tabela 4. Análises físicas dos resíduos da indústria da soja.

Resíduo	Umidade (%)	Cinzas (%)	Material Volátil (%)	Carbono Fixo*
Casca de Soja	3.71	6.25	90.02	0.2
Farelo de Soja	9.89	5.80	84.21	0.1

*Cálculo por diferença

As análises imediatas são extremamente importantes para se conhecer as composições características dos resíduos em estudo. Pode-se perceber que a casca possui considerável quantidade de material volátil que corresponde a matéria orgânica da biomassa, sendo interessante para aplicação como biocombustíveis líquidos e/ou sólidos. A determinação do teor de umidade auxilia na avaliação do consumo energético durante o processo de pirólise. Isso implicará aumento no custo total de processamento, conduzindo, assim, à necessidade de secagem prévia da biomassa (ALEXANDRE, 2013; COLEN, 2011). O teor de material volátil da casca da soja (90.02 %) foi bem superior aos encontrados para outras biomassas tais como casca de arroz (82 %) (RODRIGUES, 2019) e sabugo de milho (88 %) (MACHADO, 2019), indicando que a casca da soja é um excelente precursor para a produção de carvão ativado e bio-óleo através do processo de pirólise.

Rendimento dos Materiais Renováveis

Os resultados dos ensaios de pirólise estão apresentados nas Tabelas 5 e 6. Os rendimentos de sólidos dos produtos gerados no reator de leito fixo foram analisados de acordo com a massa que não foi arrastada pelo gás nitrogênio e permaneceu no interior do tubo de quartzo, os rendimentos líquidos foram contabilizados a partir da massa condensada que permaneceu no Kitassato. Os gases não condensáveis não foram analisados para fins de rendimento, no entanto eles foram contabilizados a partir da diferença dos produtos sólidos e líquidos.

Nos testes com a casca de soja, os rendimentos de sólidos compõem-se do teor de cinzas e matéria orgânica não degradada (carvão), os resultados apontam uma média de 30.03% com variação de 1.7%, ou seja, independentemente das condições nos ensaios de pirólise os rendimentos sólidos são praticamente constantes. Para os rendimentos líquidos (bio-óleo e extrato-ácido) obteve-se uma média de 47.19 %. O rendimento médio de gases foi de 22.78 %.

Tabela 5. Rendimento dos Materiais Renováveis (Casca de Soja).

Ensaio/ Produto	Rendimentos (%)		
	Bio-óleo + Extrato (%)	Carvão (%)	Gases (%)
1	46.74	29.86	23.40
2	40.94	32.00	27.06
3	53.89	28.22	17.89
Média	47.19	30.03	22.78

Tabela 6. Rendimento dos Materiais Renováveis (Farelo de Soja).

Ensaio/ Produto	Rendimentos (%)		
	Bio-óleo + Extrato (%)	Carvão (%)	Gases (%)
1	43.48	28.22	28.30
2	46.33	28,86	24.81
3	57.09	28.62	14.05
4	53.71	27.19	19.01
5	66.58	28.40	5.02
6	42.19	28.13	29.68
7	32.92	28.76	38.32
8	41.13	28.48	30.39

Durante a pirólise do farelo da soja, foi percebido que o potencial de produção de produtos líquidos e gasosos pode variar significativamente a depender das condições empregadas durante os ensaios de pirólise. O maior rendimento líquido foi observado no ensaio 5 (66.58%), sendo esse operado nas condições: temperatura do reator 500 °C; vazão de inerte 4 mL/min; tempo de reação de 60 min; taxa de aquecimento de 10 °C/min. O menor rendimento líquido (32.92 %) foi observado no ensaio 7, obtido com as condições experimentais: temperatura do reator de 500 °C; vazão de gás de 4 mL/min; tempo de reação de 30 min; taxa de aquecimento de 20 ° C/min.

O diagrama de Pareto gerado (Figura 4) a partir dos dados do planejamento fatorial 2^{4-1} durante a pirólise do farelo da soja indica que os fatores aqui estudados (temperatura, taxa de aquecimento, vazão de inerte e tempo de reação) não apresentaram efeito significativo durante a produção de líquidos no processo aqui adotado, observando os limites adotados para variável de processo estudada.

A Figura 5 apresenta a formação dos principais produtos da pirólise de resíduos da indústria da soja: (a) carvão, (b) bio-óleo e extrato ácido e (c) fração gasosa. Quando feita a comparação entre as quantidades de bio-óleo obtidos nessa pesquisa com os dois resíduos empregados, é possível informar um maior valor do combustível a partir do farelo da soja (valor máximo de 67 %) em

relação ao valor obtido na pirólise da casca (47 %). Isso indica que o farelo da soja é constituído de uma maior quantidade de compostos químicos que podem entrar em decomposição térmica, gerando em seguida uma maior quantidade de condensáveis.

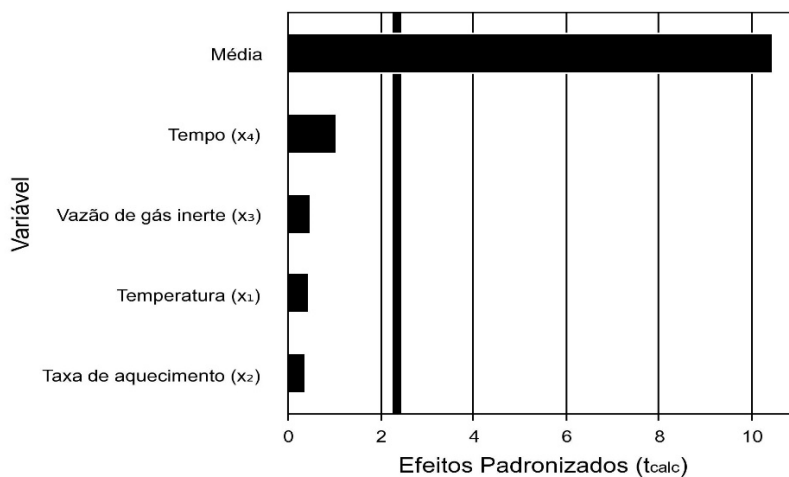


Figura 4. Representação do Diagrama de Pareto obtido do planejamento fatorial 2^{4-1} para a obtenção de líquidos a partir da pirólise de farelo da soja.

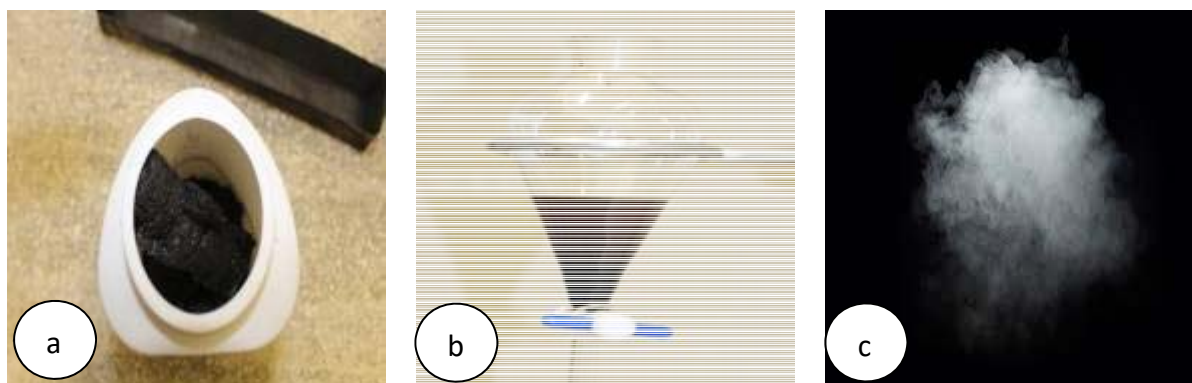


Figura 5. Produtos do Processo Termoquímico: a) fração sólida (carvão); b) fração líquida (oleosa + aquosa); c) fração gasosa.

Filtro Sustentável de Carvão Ativado

A grande geração de resíduos, em decorrência do aumento das mais variadas tipologias industriais, tornou-se um grave problema ambiental e de logística das empresas devido a sua grande produção, levando o setor industrial a desenvolver novas técnicas relacionadas ao manejo e destinação final de seus resíduos, atendendo assim as suas diretrizes e normativas ambientais vigentes (Correia, 2013).

A Figura 6 apresenta as etapas de construção de filtro sustentável feito com a fração sólida produzida no processo termoquímico. A Figura 7 mostra os resultados do teste de remoção de azul de metileno em coluna de filtração empregando o carvão obtido a partir da casca da soja.



Figura 6. Processo de Construção de Filtro Sustentável com Carvão Ativado da Casca e do Farelo da Soja.

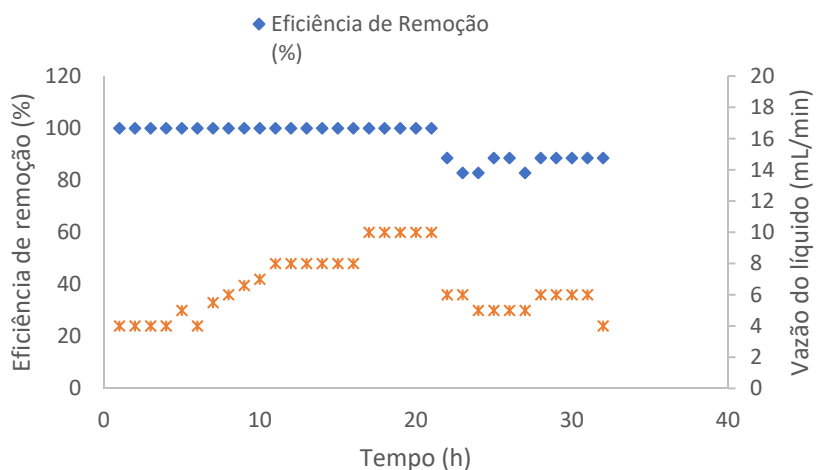


Figura 7. Monitoramento de Eficiência de Remoção de azul de metileno de Filtro Sustentável (Casca de Soja).

A determinação do índice de azul de metileno é uma avaliação de extrema importância neste processo de caracterização, visto que avalia a eficiência de adsorção do carvão produzido a partir do sabugo de milho e informa a respeito da mesoporosidade do material adsorvente (PEDROSA *et al.*, 2019). O filtro apresentou uma remoção máxima nas primeiras 18 horas de operação do sistema operando à uma vazão média de 6.4 mL/min. Observa-se também um decaimento da

eficiência de remoção devido a saturação do carvão. A menor eficiência observada foi de 82 % com o tempo de operação de 25 h.

Rahman *et al.* (2012) estudaram a remoção do corante azul de metileno em um filtro descendente constituído por carvão ativado produzido a partir da pirólise de casca de arroz, verificando o efeito da vazão avaliada na remoção do corante, sendo empregados três níveis para os fluxos: 1.0, 1.4 e 1.8 mL/min. De acordo com os dados da pesquisa, a eficiência da remoção observada diminui com o aumento da vazão. E esse fenômeno pode dever-se ao fato de que, quando a velocidade de fluxo do corante era menor, maior o tempo de contato do azul de metileno com a superfície ativa do adsorvente.

A água fornecida pela concessionária é rica em aditivos, dentre eles o cloro, que interfere na produção alimentícia e se faz, portanto, necessária a utilização de métodos de purificação eficazes para eliminação deste interferente. Para isso, uma parte do processo é a passagem da água por um filtro contendo carvão ativado para retirada do cloro e outros interferentes. O custo de produção dos carvões ativados é considerado relativamente alto. A sua utilização no processo de descloração da água representa um importante gasto na indústria de alimentos. Apesar de ser bastante utilizado nos sistemas de tratamento de água em todo país, o cloro é um desinfetante que pode ser danoso a alguns processos industriais, ou mesmo indesejável para o consumo humano em níveis superiores a 2.0 mg/L (MACHADO, 2019). A Figura 8 mostra a eficiência de remoção de cloro em água de abastecimento empregando coluna de filtração constituída de carvão obtida da pirólise de farelo de soja.

A partir desta análise foi demonstrado a eficiência do carvão ativado obtido da biomassa farelo de soja, comprovando a eficiência na adsorção do cloro residual presente no líquido, tratando um volume considerável de água de abastecimento clorada em torno do limite máximo permissível (2 mg/L) estabelecido pelo Ministério da Saúde para água de abastecimento público, tornando-a isenta de aditivo clorado.

Os resultados do processo de remoção de cloro de água de abastecimento adotado nessa pesquisa apontam para um novo mercado de produção de carvão ativado proveniente de biomassa residual.

Segundo Machado (2019), o mercado global de carvão ativado foi avaliado em estações de tratamento de água devido a subsídios governamentais, sendo gasto mais de US \$ 3.0 bilhões em 2015 com o produto. O insumo é empregado em várias atividades industriais, destacando, purificação de ar, remediação de águas subterrâneas, limpeza de derramamentos, tratamento de água e efluentes, etc.

Conclusão

O maior rendimento de carvão ativado a partir da pirólise do farelo da soja foi de 29 %. Os fatores empregados durante a pirólise do material não apresentaram efeitos significativos para a produção de carvão, indicando que a planta de pirólise pode ser operada nas condições de menor custo energético.

O carvão ativado obtido da pirólise do farelo de soja foi muito eficiente no processo de descloração da água de abastecimento. A eficiência na remoção de cloro em sistema de filtração com o carvão dessa pesquisa foi de 100 % ao longo do período monitorado (210 horas ininterruptas de operação). Esses resultados obtidos corroboram de forma positiva, indicando o potencial da utilização do carvão ativado do material precursor, para produção de filtros de carvão ativado em indústrias de bebidas e alimentos, destacando a viabilidade técnica do uso do mesmo, substituindo assim as matérias primas tradicionais empregadas na produção de material adsorbente.

Quando são comparadas as quantidades de bio-óleos obtidos com a utilização dos dois resíduos aqui estudados, percebe-se que o farelo produziu um maior rendimento do biocombustível, indicando que esse resíduo em questão é constituído de uma maior quantidade de compostos orgânicos que são degradados termicamente para a geração de substâncias condensáveis e não condensáveis.

Referências bibliográficas

- Alexandre, G. P. (2013) *Avaliação da produção de bio-óleo por termocatálise com óxido de cálcio de lodo de esgoto doméstico*. Dissertação (Mestrado em Agroenergia), Programa de Pós-Graduação em Agroenergia, Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 124 pp.
- Bridgwater, A. (2012) Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*, **38**(1), 68-94. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048>
- Colen, A. G. N. (2011) *Caracterização físico-química e química do lodo de esgoto para aplicação como fonte de energia em processo de pirólise*. Dissertação (Mestrado em Agroenergia), Programa de Pós-Graduação em Agroenergia, Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 159 pp.
- CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. (2014) Acompanhamento da safra brasileira de grãos. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/>
- Correia, L. A. R. (2013) *Estudo do processo de pirólise para aproveitamento sustentável do lodo digerido doméstico*. Dissertação (Mestrado em Agroenergia), Programa de Pós-Graduação em Agroenergia, Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 159 pp.
- EMBRAPA SOJA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. (2017) *Soja e Números (safra 2016/2017)*. Disponível em: <https://www.embrapa.br/soja/cultivos/soja1/dados-economicos>>
- Ferrer, A., Salas, C., Rojas, O. J. (2016) Physical, thermal, chemical and rheological characterization of cellulosic microfibrils and microparticles produced from soybean hulls. *Industrial Crops and Products*, **84**(1), 337-343. doi: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.02.014>
- Freitas, T. F. S., Silva, P. R. F. (2008) Biodiesel: o ônus e o bônus de produzir combustível. *Ciência Rural*, Santa Maria, **38**(1), 843-851. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782008000300044>

- International Energy Agency (2017) *Oil Market Report: World Oil Demand*. Disponível em: <https://www.iea.org/oilmarketreport/omrpublic/#search=%22%22world%20oil%20supply%20and%20demand%22%22>
- Machado, P. R. S. (2019) *Prospecção de bioprodutos a partir da degradação termoquímica do sabugo de milho visando aplicação industrial*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 112 pp.
- Mesa, J. M., Rocha, J. D., Olivares, E., Barboza, L. A., Brossard, L. E., Junior; L. E. B. (2003) Pirólise Rápida Em Leito Fluidizado: Uma Opção Para Transformar Biomassa Em Energia Limpa. *Analytica*, **1**(4), 32-36.
- Nascimento, P. F. P., Sousa, J. F., Oliveira, J. A., Possa, R. D., Santos, L. S., Carvalho, F.C., Ruiz, J. A. C., Pedroza, M. M., Bezerra, M. B. D. (2017) Wood sawdust and sewage sludge pyrolysis chars for CO₂ adsorption using a magnetic suspension balance. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, **95**(1), 2148-2155. doi: <https://doi.org/10.1002/cjce.22861>
- Pedrosa, A. L., Pedroza, M. M., Cavallini, G. S. (2019) Post-treatment of paint industry effluents by filtration using *Andropogon* biochar (*Andropogon gayanus* Kunth cv. Planaltina). *Environmental Science and Pollution Research*, **17**(1), 1-10. doi: <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06463-6>
- Pedroza, M. M. (2010) Balanço energético da pirólise de lodo de esgoto: uma abordagem das propriedades termodinâmicas do processo, *Congresso Brasileiro De Engenharia Química*, Foz do Iguaçu Brasil.
- Pedroza, M. M., Sousa, J. F., Vieira, G. E. G., Bezerra, M. B. D. (2014) Characterization of the products from the pyrolysis of sewage sludge in 1 kg/h rotating cylinder reactor. *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, **105**(1), 108-115. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2013.10.009>
- Pedroza, M. M., Sousa, J. F., Vieira, G. E. G., Bezerra, M. B. D. (2017) Bio-oil and biogas from the pyrolysis of sewage sludge, and non-isothermal degradation on usy zeolite. *Brazilian Journal of Petroleum and gas*, **11**(1), 149-163. doi: <http://dx.doi.org/10.5419/bjpg2017-0013>
- Pukasiewicz, S. R. M. Estudo de caso: gerenciamento de resíduos sólidos industriais em uma indústria processadora de soja. *Anais do XI Simpep*, Bauru, SP, **XI**(XI), 1-7.
- Rahman, M. A., Ruhul Amin, S. M., Shafiqul, A. M. (2012) Removal of Methylene Blue from Waste Water Using Activated Carbon Prepared from Rice Husk. *Dhaka Univ. J. Sci.*, **60**(1), 185-189. doi: <https://doi.org/10.3329/dujs.v60i2.11491>
- Rodrigues, C. R. (2019) *Degradação térmica da casca de arroz e utilização do carvão obtido no processo para polimento de águas cinzas*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 199 pp.
- Silva, F. M., Pedroza, M. M., Oliveira, L. R. A., Colen, A. G. N., Amaral, P. H. B. (2019) Rotas tecnológicas empregadas no aproveitamento de resíduos da indústria da soja. *Revista Brasileira de Energias Renováveis*. **8**(1), 326- 363. doi: <http://dx.doi.org/10.5380/rber.v8i1.57694>