



PROJETO DE UMA UNIDADE INDUSTRIAL PARA PRODUÇÃO DE CARVÃO ATIVADO A PARTIR DE LODO DE ETE DA INDÚSTRIA DE PAPEL E CELULOSE

Vilma S. Sousa¹; Camila F. Bento¹; Wilson Pereira¹; Anderson Civiero¹; Evandro Balestrin¹

¹ Universidade do Oeste de Santa Catarina (UNOESC).
vilmasousa559@gmail.com

Palavras-Chave: Resíduo industrial, adsorção, economia circular.

Introdução

A indústria brasileira de papel e celulose apresenta elevada capacidade produtiva e grande relevância econômica, posicionando o Brasil entre os principais produtores mundiais do setor. Em 2025, a produção nacional atingiu aproximadamente 11,3 milhões de toneladas de papel, conforme dados da Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ), refletindo a crescente demanda por embalagens, impulsionada pelo comércio eletrônico e pela busca por alternativas renováveis aos plásticos de uso único, além dos investimentos em inovação para o desenvolvimento de papéis e embalagens com maior desempenho técnico (IBÁ, 2025). Esse volume evidencia a grande escala do setor no país e seu significativo potencial de geração de resíduos industriais, como o lodo proveniente do tratamento de efluentes.

Nesse contexto, torna-se essencial o desenvolvimento de métodos alternativos para o gerenciamento de resíduos sólidos, especialmente aqueles capazes de processar matérias primas heterogêneas e com elevado teor de umidade, transformando-as em recursos úteis para o enfrentamento de problemas energéticos e ambientais (ABDULSALAM et al., 2023).

Khalili et al. (2002) afirmam que a geração de lodo na indústria de papel e celulose representa um desafio ambiental devido ao seu elevado volume, sendo a conversão desse resíduo em carvão ativado uma alternativa promissora para reduzir impactos ambientais e preservar recursos naturais. Além disso, o carvão produzido apresentou potencial para aplicação no tratamento de efluentes, com desempenho semelhante ao de materiais comerciais na remoção de compostos orgânicos.

A valorização de biorresíduos por meio da produção de materiais de maior valor agregado, como os materiais carbonáceos, configura-se como uma estratégia promissora, contribuindo para a redução do desperdício, diversificação de fontes de renda e fortalecimento da economia circular (ABDULSALAM et al., 2023; STEYER et al., 2021). Esses resíduos podem ser reutilizados de maneira segura e ambientalmente adequada, o que tem levado a uma redução significativa do envio para aterros sanitários como destino final (MONTE et al., 2009).

Nesse sentido, a utilização do lodo da indústria de papel como precursor de adsorventes apresenta vantagens econômicas, destacando-se a redução dos custos associados à disposição em aterros. Além disso, por se tratar de um material rico em carbono, esse resíduo pode ser



convertido em adsorventes de baixo custo, amplamente utilizados na purificação de efluentes líquidos (ORLANDI et al., 2014).

O carvão ativado produzido a partir desses resíduos apresenta elevada área superficial e alta porosidade, sendo amplamente empregado na remoção de poluentes, como corantes, compostos fenólicos, fármacos e metais pesados em efluentes industriais (RABBANI; AHMED; IQBAL, 2024). Ademais, a demanda global por materiais carbonáceos, como o carvão ativado, vem crescendo de forma acelerada, com taxas anuais em torno de 10%, impulsionada por aplicações como tratamento de água, separação de gases e armazenamento de energia (DEHKHODA; GYENGE; ELLIS, 2016).

O presente trabalho tem como objetivo geral desenvolver o projeto de uma unidade industrial para a produção de carvão ativado utilizando o lodo gerado nas estações de tratamento de efluentes (ETE) da indústria de papel e celulose como matéria-prima. A justificativa para este projeto fundamenta-se no elevado volume de efluentes e lodo gerados pelo setor papelero, cujo manejo e disposição final em aterros implicam altos custos e significativos impactos ambientais (KUMAR et al., 2024). Nesse contexto, a valorização termoquímica do lodo não apenas reduz os custos operacionais e de aquisição de precursores carbonáceos (ORLANDI et al., 2014), mas também promove a sustentabilidade ao alinhar-se aos princípios da economia circular, reinserindo resíduos na cadeia produtiva como insumos de alto valor agregado (KUMAR et al., 2024).

Material e Métodos

O trabalho foi desenvolvido por meio de pesquisa bibliográfica e pesquisa documental. A pesquisa bibliográfica baseou-se em artigos científicos, livros, dissertações, teses e normas técnicas relacionadas à produção de carvão ativado, tratamento de efluentes, processos termoquímicos, operações unitárias e projeto de processos. A pesquisa documental utilizou dados referentes à composição e disponibilidade do lodo de ETE proveniente da indústria de papel e celulose, enquanto os parâmetros operacionais do processo de produção de carvão ativado foram estabelecidos com base em dados reportados na literatura científica e técnica.

O desenvolvimento do projeto compreendeu as seguintes etapas: levantamento bibliográfico sobre a produção de carvão ativado a partir de resíduos industriais; caracterização da matéria-prima com base em dados da literatura; definição do fluxograma do processo produtivo; elaboração do balanço de massa; seleção e dimensionamento dos principais equipamentos.

Os cálculos de engenharia foram realizados com base em princípios de balanço de massa, operações unitárias, fenômenos de transporte e critérios de projeto de equipamentos descritos na literatura técnica.

Resultados e Discussão

A produção de carvão ativado a partir de lodo proveniente de estações de tratamento de efluentes (ETE) da indústria de papel e celulose constitui uma alternativa sustentável para a valorização de resíduos industriais. O lodo papelero apresenta potencial como precursor carbonáceo devido à presença de fibras residuais de celulose, lignina e biomassa microbiana estabilizada, componentes ricos em carbono capazes de originar materiais carbonosos após

O descarregamento do lodo ocorre em um tanque de equalização (TK-101), equipamento responsável por amortecer variações de vazão e composição do resíduo, proporcionando maior estabilidade operacional às etapas posteriores do tratamento. Posteriormente, o material passa por gradeamento para retenção de sólidos grosseiros e permanece sob agitação contínua por agitadores submersíveis, garantindo a homogeneização do lodo antes do processamento térmico (METCALF & EDDY, 2016; VON SPERLING, 2014).

3



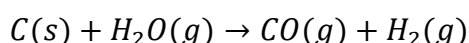
ocorre a redução significativa da umidade do lodo, com remoção aproximada de 70% da água, resultando em um material semissólido contendo aproximadamente 30% de umidade.

O material pré-seco é conduzido, por meio de uma moega pulmão com fundo móvel (MP-101), ao secador rotativo contínuo (D-101). Esse equipamento apresenta elevada aplicação industrial devido à sua robustez operacional, permitindo o contato eficiente entre o sólido e os gases quentes utilizados na remoção da umidade residual (MUJUMDAR, 2014; GREEN; SOUTHARD, 2019). Nesta etapa, a umidade do lodo é reduzida para aproximadamente 15%, promovendo a formação de um material granular e friável adequado para a etapa subsequente de carbonização.

A carbonização ocorre em um forno rotativo (K-101) operando sob atmosfera com baixa disponibilidade de oxigênio, a aproximadamente 320 °C durante 60 minutos. A pirólise lenta promove a decomposição parcial da matéria orgânica, liberando compostos voláteis e concentrando a fração carbonosa sólida, denominada char (DEVI; SAROHA, 2013; BRIDGWATER, 2012). Durante esse processo, ocorrem etapas sucessivas de desidratação, decomposição da matéria orgânica e reorganização estrutural dos compostos aromáticos, resultando no desenvolvimento inicial da matriz carbonosa (MARSH; RODRÍGUEZ-REINOSO, 2006).

O char obtido na carbonização é encaminhado ao forno rotativo de ativação (K-102), operando a aproximadamente 850 °C, utilizando vapor d'água como agente ativante. A ativação física com vapor promove a formação da estrutura porosa do carvão ativado por meio da gaseificação parcial e controlada do carbono presente na matriz sólida (RODRÍGUEZ-REINOSO; MOLINA-SABIO, 1992; MARSH; RODRÍGUEZ-REINOSO, 2006).

Durante essa etapa ocorre a reação endotérmica entre carbono e vapor de água, conforme representado pela Equação abaixo:



Essa reação remove parte do carbono da estrutura, criando novos microporos e aumentando a área superficial específica e a capacidade de adsorção do material (MARSH; RODRÍGUEZ-REINOSO, 2006). O grau de ativação, geralmente representado pelo percentual de *burn-off*, é um dos principais parâmetros de controle do processo, pois influencia diretamente as propriedades finais do carvão ativado (AZARGOHAR; DALAI, 2005).

Após a ativação, o carvão deixa o forno e é submetido ao resfriamento indireto em um resfriador (E-102), reduzindo sua temperatura para aproximadamente 95 °C e evitando riscos de oxidação e combustão espontânea devido à elevada reatividade do material aquecido (MARSH; RODRÍGUEZ-REINOSO, 2006). Posteriormente, o produto é encaminhado para moagem (G-101), e classificação granulométrica por peneiras vibratórias (SR-101) (WILLS; FINCH, 2015). Por fim, o carvão ativado classificado é armazenado em silos e destinado à comercialização.

O balanço de massa global do processo de produção de carvão ativado a partir do lodo de ETE foi elaborado considerando as principais etapas do processo, incluindo secagem, carbonização, ativação e separação do produto final. Os valores das vazões mássicas das correntes de entrada e saída estão apresentados na Tabela 1.



Tabela 1 – Balanço de massa do processo produtivo de carvão ativado

Etapa	Entrada (kg/h)	Saída (kg/h)	Principais condições operacionais
Mistura do lodo (TK-101)	Lodo primário + secundário: 8.828,80	Lodo misturado: 8.828,80	Mistura de 40% lodo primário e 60% lodo secundário
Pré-secagem (OV-101)	Lodo misturado: 8.828,80	Lodo com 30% umidade: 3.153,14	Remoção de 5.675,66 kg/h de água
Secagem térmica (D-101)	Lodo pré-seco: 3.153,14	Lodo seco: 2.596,70	Redução da umidade para 15%
Carbonização (K-101)	Lodo seco: 2.596,70	Char: 746,03	Pirólise a 320 °C por 60 min
Ativação física (K-102)	Char: 746,03 + vapor: 708,73	Carvão ativado: 447,62	Ativação com vapor a 850 °C; <i>burn-off</i> de 40%
Resfriamento e classificação	Carvão ativado: 447,62	Produto final: 422,76 Finos: 24,86	Resfriamento até 95 °C e classificação granulométrica
Armazenamento (SI-101)	Produto final: 422,76	Produto expedido: 422,76	Armazenamento em silo

Fonte: Autores (2026).

O balanço de massa do processo evidencia a transformação física e térmica do lodo ao longo das etapas produtivas, com um rendimento global (da alimentação úmida ao carvão ativado final) de 4,31%.

Conclusões

O projeto da unidade industrial para produção de carvão ativado a partir de lodo de ETE da indústria de papel e celulose demonstrou a viabilidade técnica da valorização desse resíduo por meio de sua conversão em um material de elevado valor agregado. O fluxograma proposto, aliado ao balanço de massa, permitiu estabelecer um processo contínuo e coerente com os princípios da engenharia química, contemplando as etapas de pré-secagem, secagem, carbonização, ativação física e classificação do produto final.

O rendimento global obtido de 4,31% está de acordo com a significativa perda de massa esperada durante as etapas de remoção de umidade e compostos voláteis, resultando na obtenção de um carvão ativado com potencial para aplicações em processos de adsorção. Além dos aspectos técnicos, o projeto evidencia uma alternativa alinhada aos princípios da economia circular, reduzindo a destinação de resíduos a aterros e promovendo seu aproveitamento como matéria-prima para a produção de adsorventes. Dessa forma, os objetivos do trabalho foram atingidos, fornecendo uma base para futuros estudos envolvendo avaliação econômica, otimização operacional e validação experimental do desempenho do carvão ativado produzido.

Referências

ABDULSALAM, Jibril; OTUN, Kabir; GARDEE, Nasreen; PATEL, Bilal; LESWIFI, Taile; MATHE, Mahlanyane Kenneth. Activated biocarbon from paper mill sludge as electrode material for supercapacitors: comparative performance evaluation in two aqueous electrolytes. *ACS Omega*, v. 8, n. 6, p. 5285–5299, 31 jan. 2023.



AZARGOHAR, R.; DALAI, A. K. Production of activated carbon from Luscar char: experimental and modeling studies. *Microporous and Mesoporous Materials*, v. 85, n. 3, p. 219–225, 2005.

BRIDGWATER, A. V. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*, v. 38, p. 68-94, 2012.

DEHKHODA, A. M.; GYENGÉ, E.; ELLIS, N. A novel method to tailor the porous structure of KOH activated biochar and its application in capacitive deionisation and energy storage. *Biomass Bioenergy* 2016, 87, 107–121.

DEVI, P.; SAROHA, A. K. Effect of temperature on biochar properties during paper mill sludge pyrolysis. *International Journal of ChemTech Research*, v. 5, n. 2, p. 682-687, 2013.

GREEN, D. W.; SOUTHARD, M. Z. Perry's Chemical Engineers' Handbook. 9. ed. **New York: McGraw-Hill Education**, 2019.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (IBÁ). **Dados Papel** – dezembro de 2025. São Paulo: IBÁ, 2025.

KHALILI, N. R.; VYAS, J. D.; WEANGKAEW, W.; WESTFALL, S. J.; PARULEKAR, S. J.; SHERWOOD, R. Synthesis and characterization of activated carbon and bioactive adsorbent produced from paper mill sludge. *Separation and Purification Technology*, v. 26, p. 295–304, 2002.

KUMAR, V. et al. Pulp-paper industry sludge waste biorefinery for sustainable energy and value-added products development: A systematic valorization towards waste management. *Journal of Environmental Management*, v. 352, 120052, 2024.

MARSH, H.; RODRÍGUEZ-REINOSO, F. Activated Carbon. **Oxford: Elsevier Science**, 2006.

MONTE, M. C.; FUENTE, E.; BLANCO, A.; NEGRO, C. Waste management from pulp and paper production in the European Union. *Waste Management*, v. 29, n. 1, p. 293-308, 2009.

MUJUMDAR, A. S. Handbook of Industrial Drying. 4. ed. **CRC Press**, 2014.

ORLANDI, G.; GUBERT, L.; CAVASOTTO, W. R.; COLPANI, G. L.; DALCANTON, F.; MELLO, J. M. M. de. Obtenção de adsorvente alternativo utilizando lodo ativado da indústria de papel e celulose para a adsorção de corantes. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA (COBEQ)**, 2014. Anais [...]. São Paulo: Blucher, 2015. p. 7402–7409. DOI: 10.5151/chemeng-cobeq2014-0625-24683-171887.

RABBANI, J.; AHMED, S. R.; IQBAL, M. K. Development of ecofriendly, economical and integrated mechanism to treat pulp and paper industrial effluent by optimizing activated sludge treatment process. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, v. 61, n. 3, p. 901–913, 2024. DOI: 10.21162/PAKJAS/24.256.

RODRÍGUEZ-REINOSO, F.; MOLINA-SABIO, M. Activated carbons from lignocellulosic materials by chemical and/or physical activation: an overview. *Carbon*, v. 30, n. 7, p. 1111–1118, 1992.

SMITH, K. M.; FOWLER, G. D.; PULLKET, S.; GRAHAM, N. J. D. Sewage sludge-based adsorbents: a review of their production, properties and use in water treatment applications. *Water Research*, v. 43, n. 10, p. 2569–2594, 2009.

STEYER, J.-P. et al. Circular Economy Applied to Organic Residues and Wastewater: Research Challenges. *Waste and Biomass Valorization*, v. 13, p. 1155–1171, 2022. DOI: 10.1007/s12649-021-01549-0.

WILLS, B. A.; FINCH, J. A. Wills' Mineral Processing Technology. 8. ed. **Butterworth-Heinemann**, 2015.