

PRODUÇÃO SUSTENTÁVEL DE CARVÃO VEGETAL PULVERIZADO A PARTIR DE LODOS DA INDÚSTRIA DE POLPA CELULÓSICA KRAFT

Caio Moreira Miquelino Eleto Torres¹, Angélica de Cássia Oliveira Carneiro¹,
Bruna Virgínia Cunha Rodrigues¹, Claudio Mudadu Silva¹

¹ Universidade Federal de Viçosa (UFV). Brasil

RESUMO

A indústria de celulose enfrenta desafios ambientais e econômicos significativos devido ao aumento da produção e à geração de resíduos sólidos, particularmente lodos primários e secundários oriundos das Estações de Tratamento de Efluentes (ETEs) em fábricas de polpa celulósica kraft. Tradicionalmente, esses resíduos são destinados a aterros industriais, representando um problema crescente de gestão. Como alternativa sustentável, este estudo investigou a viabilidade técnica da conversão energética desses lodos em carvão pulverizado por meio da pirólise, um processo termoquímico que transforma biomassa em produtos com maior valor energético. Foram testadas diferentes condições operacionais, incluindo temperaturas (290 °C e 320 °C) e tempos de residência (40 e 60 minutos), para avaliar seus efeitos nas propriedades físico-químicas dos lodos. Os resultados demonstraram que condições mais severas (320 °C por 60 minutos) proporcionaram melhorias significativas, com aumentos de aproximadamente 75% e 27% no rendimento energético para lodos primários e secundários, respectivamente, em comparação com condições menos intensas. Esses achados indicam que a pirólise pode ser uma estratégia eficaz para valorizar esses resíduos, transformando-os em uma fonte de energia sustentável. Além dos benefícios técnicos, esta abordagem está alinhada com os princípios da economia circular e contribui diretamente para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), particularmente o ODS 7 (Energia Limpa e Acessível) e o ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis). Do ponto de vista ambiental, social e de governança (ESG), a proposta reduz a dependência de aterros, diminui as emissões de gases de efeito estufa e promove o uso de fontes renováveis de energia. Adicionalmente, a otimização do processo assegura eficiência operacional e conformidade com regulamentações ambientais. A conversão de lodos de ETE em carvão pulverizado por pirólise apresenta-se como uma solução técnica e ambientalmente viável para a indústria de celulose. Essa estratégia não apenas aborda os desafios atuais de gestão de resíduos, mas também contribui para uma transição energética mais limpa e sustentável, reforçando o compromisso do setor com as práticas ESG e os ODS.

Palavras-chave: Energia, lodo, gerenciamento de resíduos, bioeconomia

INTRODUÇÃO

A crescente demanda por energia e a diminuição de recursos não renováveis têm impulsionado a busca por alternativas sustentáveis (Faubert *et al.*, 2019; Valdés *et al.*, 2020). Neste cenário, os resíduos industriais, particularmente os lodos gerados em Estações de Tratamento de Efluentes (ETEs) de fábricas de celulose, surgem como matérias-primas potenciais para geração de energia renovável (Mandeep *et al.*, 2020). Tais subprodutos, tradicionalmente destinados a aterros, apresentam características físico-químicas que os tornam passíveis de valorização energética através de diversos processos, incluindo produção de carvão, biogás e biocombustíveis.

Os lodos de ETE são classificados como resíduos Classe II A pela norma brasileira ABNT NBR 10004/2004, caracterizando-se como materiais não perigosos e não inertes (ABNT, 2004). Dois tipos principais são gerados no processo: o lodo primário, resultante do tratamento físico-químico e rico em fibras celulósicas, e o lodo secundário, proveniente do tratamento biológico e composto principalmente por biomassa microbiana (Torres *et al.*, 2023). Apesar de suas diferenças composicionais, ambos compartilham desafios comuns quanto ao seu manejo e disposição final.

No contexto brasileiro, a prática predominante de destinação desses resíduos envolve sua disposição em aterros industriais (Fioreze *et al.*, 2022). Essa abordagem apresenta limitações significativas, incluindo: (i) elevados custos operacionais, que podem alcançar US\$ 30 por tonelada de lodo tratado; (ii) potencial risco ambiental devido à possível lixiviação de contaminantes; e (iii) oneração financeira para as indústrias, representando cerca de 60% dos custos totais de tratamento de efluentes (Simão *et al.*, 2018). Adicionalmente, a atual legislação ambiental tem se tornado progressivamente mais restritiva quanto aos métodos convencionais de disposição de resíduos.

Tecnologias alternativas para aproveitamento energético desses materiais têm sido investigadas, sendo a incineração direta o método mais amplamente utilizado (Lopes *et al.*, 2018a). Contudo, tal abordagem apresenta eficiência limitada, aproveitando apenas 35% do potencial energético contido nos lodos, devido principalmente às suas características intrínsecas: alta

Autor correspondente: Caio Moreira Miquelino Eleto Torres. Viçosa-MG. CEP: 36570-900. Brasil.
Fone: +55-31-998030024. e-mail: caiomiquelino@yahoo.com.br

umidade, heterogeneidade composicional e variabilidade granulométrica (Coimbra *et al.*, 2015).

Dentre as tecnologias emergentes, a pirólise – processo termoquímico que ocorre na ausência de oxigênio – destaca-se como alternativa promissora (Guedes *et al.*, 2020). Este processo permite a conversão dos lodos em carvão pulverizado, com potencial aplicação como combustível em caldeiras industriais. A pirólise pode ser classificada conforme as condições operacionais em lenta, intermediária ou rápida, sendo que cada modalidade produz resultados distintos em termos de rendimento e qualidade do produto final.

Apesar do considerável volume de pesquisas sobre conversão termoquímica de biomassa, observa-se uma lacuna significativa quanto a estudos específicos sobre a pirólise de lodos primário e secundário de ETES de fábricas de celulose kraft. Esta carência é particularmente relevante considerando as peculiaridades composicionais desses materiais em comparação com outras biomassas convencionalmente utilizadas em processos termoquímicos.

Este trabalho avalia a viabilidade técnica da pirólise de lodos primário e secundário, analisando os efeitos da temperatura (290 °C e 320 °C) e tempo de residência (40 e 60 minutos) nas propriedades do carvão gerado. Os resultados visam otimizar seu aproveitamento energético, alinhando-se aos princípios ESG e aos ODS, em especial o ODS 7 (Energia Limpa) e ODS 12 (Produção Responsável), fomentando uma economia circular no setor.

MATERIAL E MÉTODOS

1. Material

Os lodos primário (LP) e secundário (LS) foram coletados na Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) de uma fábrica brasileira de celulose kraft branqueada. As amostras foram acondicionadas em sacos de polietileno e transportadas para os Laboratórios de Celulose e Papel (LCP) e de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM) da Universidade Federal de Viçosa (UFV), Minas Gerais, Brasil.

As amostras apresentavam teores de umidade inicial de $61 \pm 1\%$ (LP) e $86 \pm 1\%$ (LS) em base úmida. Para preservação das características físico-químicas, foram armazenadas em câmara fria a 6 ± 2 °C até o momento dos experimentos.

2. Caracterização

O carvão pulverizado do lodo foi submetido a testes de caracterização físico-química, para avaliar a pureza das amostras. O teor de umidade foi obtido conforme a norma NBR 7993 (ABNT, 1983), densidade a granel seguindo a norma EN 15103 (DIN, 2010b). A análise química imediata (cinzas, carbono fixo e materiais voláteis) foi realizada com base na EN 14774-1 (DIN, 2009) e NBR 8112 (ABNT, 1986). A análise elementar foi obtida de acordo com a EN 14774-1 (DIN, 2009) e o Teste TAPPI T 266 om-18 (TAPPI, 2006). A determinação do valor calorífico superior e útil foi realizada

segundo as normas ASTM D2015 (ASTM, 1982) e EN 14918 (DIN, 2010a), respectivamente.

A densidade energética (GJ.m^{-3}) foi obtida multiplicando o valor calorífico útil pela densidade a granel.

3. Tratamento térmico do lodo

O tratamento térmico foi realizado em forno mufla elétrico modelo SSFMr 16 L, equipado com sistema de controle digital de temperatura (Figura 1). Para cada ensaio, foram pesados $132 \pm 2\text{g}$ de amostra úmida, que foram acondicionados em recipiente metálico específico. O forno foi pré-aquecido até as temperaturas selecionadas (290 ou 320 °C), quando então o recipiente com a amostra foi inserido. Após 5 minutos de estabilização térmica, iniciou-se o tempo de residência (40 ou 60 minutos), durante o qual a amostra foi homogeneizada manualmente a cada 10 minutos para garantir tratamento uniforme.

O tempo de residência foi controlado com cronômetro digital de precisão, enquanto a temperatura foi monitorada continuamente por termopar calibrado conectado a um datalogger. Esse controle permitiu registrar com exatidão as condições experimentais em cada ensaio.

Ao término do tratamento térmico, o recipiente foi selado para interromper as reações e deixado resfriar naturalmente até atingir 25 ± 2 °C. O material resultante foi pesado para determinação do balanço de massa do processo e imediatamente acondicionado. As mesmas análises físico-químicas realizadas nas amostras originais foram repetidas no material pirolizado, permitindo comparação direta das propriedades antes e após o tratamento térmico.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A densidade aparente do carvão pulverizado derivado do lodo diminuiu devido à perda de umidade e massa durante a degradação térmica, em função do aumento da temperatura e do tempo de pirólise.

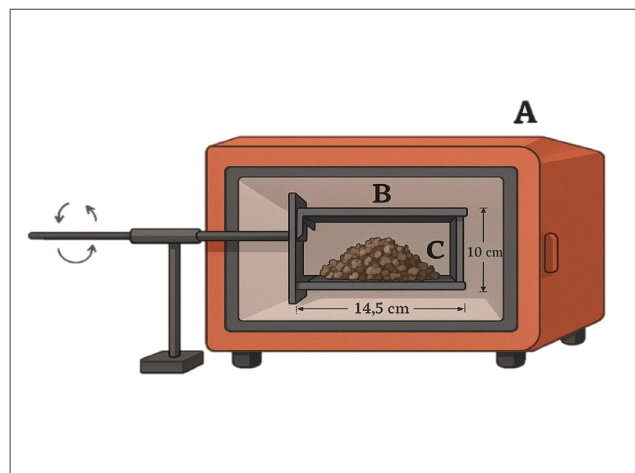


Figura 1. Layout do tratamento térmico de lodo. Forno mufla (A); recipiente (B) e lodo (C)

Tabela 1. Caracterização química do carvão pulverizado do lodo (valores médios)

Lodo		Primário				Secundário				
Temperatura (°C)	-	290		320		-	290		320	
Tempo (minutos)	-	40	60	40	60	-	40	60	40	60
Carbono (%)	44,1	46,1	53,3	50,4	67,6	40,5	41,0	41,8	42,7	43,5
Hidrogênio (%)	6,3	6,2	5,9	5,62	5,1	5,5	5,1	5,1	5,1	4,6
Nitrogênio (%)	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	5,5	4,8	5,0	4,9	4,6
Enxofre (%)	0,2	0,2	0,19	0,21	0,35	1,5	1,2	1,2	1,3	1,0
Oxigênio (%)	47,7	45,3	38,0	41,5	22,4	22,8	20,1	17,4	18,3	14,3
Teor de cinzas (%)	1,6	2,2	2,6	2,3	4,6	24,2	27,7	29,6	27,6	32,1
Carbono fixo (%)	10,7	13,0	22,1	19,8	46,8	9,6	12,3	14,8	12,3	16,2
Materiais voláteis (%)	87,7	84,8	75,3	77,9	48,6	66,2	60,0	55,6	60,1	51,7

A Tabela 1 apresenta a caracterização elementar (C, H, N, S, O) e a análise química imediata (teor de cinzas, carbono fixo e materiais voláteis) do carvão de lodo *in natura* e após tratamento térmico. Observou-se um aumento nos teores de carbono, nitrogênio, cinzas e carbono fixo, enquanto os teores de hidrogênio, oxigênio e materiais voláteis diminuíram com o incremento da temperatura ou tempo de pirólise. Esses resultados estão em conformidade com estudos anteriores (Martinez *et al.*, 2021).

O teor de cinzas no lodo primário sugere a presença de compostos inorgânicos provenientes do efluente industrial, particularmente do setor de caustificação (Cabrera, 2017; Kamali *et al.*, 2016; Virkutyte, 2017). No lodo secundário, o teor de cinzas (24,2%) foi superior aos valores reportados na literatura (12,5%) (Lopes *et al.*, 2018b), possivelmente devido ao maior tempo de residência celular (idade do lodo) no processo de lodo ativado (Miki *et al.*, 2022; Von Sperling, 2016).

A combustão do carvão de lodo pulverizado apresentou maior liberação de energia com o aumento do teor de car-

bono. A Tabela 2 exibe a caracterização energética, incluindo Poder Calorífico Superior (PCS), Poder Calorífico Útil (PCU), incremento e densidade energética. O PCS aumentou devido à degradação de componentes menos estáveis termicamente e menos energéticos em comparação à lignina. O PCU também aumentou, influenciado pelo maior PCS e pela redução da umidade. Tais incrementos são relevantes para o potencial energético do material (Carneiro *et al.*, 2014; Faria *et al.*, 2021; Martinez *et al.*, 2021).

O carvão obtido a 320 °C por 60 minutos apresentou aumentos de 75% e 27% no PCS em relação ao lodo *in natura*, para lodos primários e secundários, respectivamente. A pirólise elevou significativamente a densidade energética, demonstrando ser uma técnica eficaz para melhorar a combustão do lodo. Além disso, o processo trouxe benefícios econômicos, reduzindo os custos de transporte e armazenamento devido à maior densidade energética (Faria *et al.*, 2021; Nhuchhen *et al.*, 2014).

Tabela 2. Caracterização energética do carvão de lodo pulverizado (valores médios)

Lodo		Primário				Secundário					
Temperatura (°C)	-	290		320		-	290		320		
Tempo (minutos)	-	40	60	40	60	-	40	60	40	60	
Poder Calorífico Superior (MJ kg ⁻¹)	17,2	18,1	19,7	19,5	25,5	17,2	17,7	18,0	17,8	18,6	
Poder Calorífico Útil (MJ kg ⁻¹)	13,7	16,4	18,1	17,8	24,0	13,8	16,4	16,8	16,4	17,5	
Incremento (%)	Poder Calorífico Superior	-	5	15	13	48	-	3	5	3	8
	Poder Calorífico Útil	-	20	32	30	75	-	19	22	19	27
Densidade Energética (GJ m ⁻³)	2,6	2,4	2,6	2,6	2,5	8,2	9,6	9,9	9,6	10,3	

CONCLUSÕES

Os resultados deste estudo demonstram a viabilidade técnica da conversão termoquímica de lodos primários e secundários provenientes de estações de tratamento de efluentes de fábricas de celulose kraft em carvão pulverizado para aplicação energética. A condição ótima de tratamento térmico foi estabelecida em 320 °C por 60 minutos, parâmetros que proporcionaram a máxima eficiência energética ao material resultante, cujas características físico-químicas se mostraram adequadas para utilização em sistemas de geração de energia interna nas próprias unidades industriais. Essa solução tecnológica se alinha perfeitamente com os princípios da economia circular e atende simultaneamente aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e aos critérios de Governança Ambiental, Social e Corporativa (ESG).

A análise dos parâmetros de pirólise revelou que o incremento tanto na temperatura quanto no tempo de residência promoveu melhorias significativas nas propriedades do material. Observou-se um aumento progressivo no poder calorífico, decorrente principalmente da eliminação de compostos orgânicos voláteis e da consequente concentração de carbono fixo, acompanhado por uma redução expressiva no teor de umidade que contribuiu para a elevação do valor calorífico útil. O lodo primário destacou-se como matéria-prima particularmente promissora, apresentando os melhores índices de desempenho energético após o tratamento térmico.

Além dos aspectos técnicos, esta pesquisa traz importantes contribuições para o desenvolvimento sustentável, particularmente no que se refere ao ODS 7 (Energia Limpa e Acessível) e

ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis), ao propor uma alternativa energética renovável e uma solução ambientalmente adequada para a gestão de resíduos industriais. Sob a perspectiva ESG, a tecnologia desenvolvida apresenta múltiplos benefícios, incluindo a redução de emissões de gases de efeito estufa, a otimização da gestão de resíduos e a valorização energética de subprodutos industriais.

A transformação de lodos em biocombustível pulverizado configura-se como uma solução inovadora e sustentável para o setor brasileiro de celulose kraft branqueada, com potencial para promover ganhos ambientais, econômicos e sociais. Entretanto, para sua plena implementação em escala industrial, faz-se necessário superar desafios operacionais e econômicos, o que demanda pesquisas adicionais focadas na otimização do processo. Os achados deste trabalho fornecem subsídios valiosos para a transição do setor em direção a práticas energéticas mais sustentáveis, contribuindo para a superação de gargalos tecnológicos e operacionais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a dedicação de todos os funcionários e alunos do Laboratório de Celulose e Papel e do Laboratório de Painéis de Madeira e Energia da Universidade Federal de Viçosa. Agradecemos também ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq – 830235/1999-0), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES – 1840925) e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG – 503) pelo apoio fornecido para esta investigação. ■

REFERÊNCIAS

- ABNT. (1983). *ABNT NBR 7993 – Madeira – Determinação da umidade por secagem em estufa reduzida a serragem: Método de ensaio* (p. 2). ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT. (1986). *ABNT NBR 8112 – Carvão vegetal – Análise imediata – Método de ensaio* (p. 5). ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Disponível em: <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=7339>. Acesso em: 10 jun. 2025.
- ABNT. (2004). *ABNT NBR 10004 – Resíduos sólidos – Classificação* (p. 71). ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Disponível em: <http://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=936>. Acesso em: 10 jun. 2025.
- ASTM. (1982). *ASTM D2015 – Standard test method for Gross Calorific Value of Coal and Coke by the adiabatic bomb calorimeter*. ASTM International – American Society for Testing and Materials.
- Cabrera, M. N. (2017). Pulp Mill Wastewater: Characteristics and Treatment. *Biological Wastewater Treatment and Resource Recovery*. Disponível em: <https://doi.org/10.5772/67537>
- Carneiro, A. de C. O.; Castro, A. F. N. M.; Castro, R. V. O.; Santos, R. C. dos; Ferreira, L. P.; Damásio, R. A. P. & Vital, B. R. Potencial energético da madeira de Eucalyptus sp. Em função da idade e de diferentes materiais genéticos. *Revista Árvore*, 38(2), Artigo 2, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622014000200019>.
- Coimbra, R. N.; Paniagua, S.; Escapa, C.; Calvo, L. F. & Otero, M. (2015). Combustion of primary and secondary pulp mill sludge and their respective blends with coal: A thermogravimetric assessment. *Renewable Energy*, 83, p. 1050-1058. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.05.046>.
- DIN. (2009). *DIN EN 14774-1 – Solid biofuels – Determination of moisture content – Oven dry method – Part 2: Total moisture – Simplified method* (p. 9). DIN-DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG.

DIN. (2010a). *DIN EN 14918 – Determination of calorific value* (p. 63). DIN-DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG.

DIN. (2010b). *DIN EN 15103 – Solid biofuels – Determination of bulk density* (p. 14). DIN-DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG.

Faria, B. de F. H. de; Charline, L.; Jeremy, V.; Patrick, R.; Oliveira C. A. D. C.; Armando, C.-P. & Kévin, C. Emulation of field storage conditions for assessment of energy properties of torrefied sugarcane bagasses. *Biomass and Bioenergy*, 145, 2021, 105938. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105938>.

Faubert, P.; Bélisle, C. L.; Bertrand, N.; Bouchard, S.; Chantigny, M. H.; Paré, M. C.; Rochette, P.; Ziadi, N. & Villeneuve, C. Land application of pulp and paper mill sludge may reduce greenhouse gas emissions compared to landfilling. *Resources, Conservation and Recycling*, 150, 2019, 104415. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104415>.

Fioze, M.; Labotić, L.; Torres, C. M. M. E. & Silva, C. M. Effects of Pretreatments on the Solubilization and Theoretical Methane Production of Waste Activated Sludge from a Brazilian Eucalyptus Kraft Pulp Mill. *BioResources*, 17(3), Artigo 3, 2022.

Guedes, B. J.; Massi, K. G.; Evers, C. & Nielsen-Pincus, M. Vulnerability of small forest patches to fire in the Paraíba do Sul River Valley, southeast Brazil: Implications for restoration of the Atlantic Forest biome. *Forest Ecology and Management*, 465, 2020, 118095. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118095>.

Kamali, M.; Gameiro, T.; Costa, M. E. V. & Capela, I. Anaerobic digestion of pulp and paper mill wastes – An overview of the developments and improvement opportunities. *Chemical Engineering Journal*, 298, p. 162-182, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.03.119>.

Lopes, A. do C. P.; Silva, C. M.; Rosa, A. P. & Rodrigues, F. de Á. Biogas production from thermophilic anaerobic digestion of kraft pulp mill sludge. *Renewable Energy*, 124, p. 40-49, (2018a). Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.08.044>.

Lopes, A. do C. P.; Silva, C. M.; Rosa, A. P. & Rodrigues, F. de Á. Biogas production from thermophilic anaerobic digestion of kraft pulp mill sludge. *Renewable Energy*, 124, p. 40-49, (2018b). Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.08.044>.

Mandeep, Kumar Gupta, G. & Shukla, P. Insights into the resources generation from pulp and paper industry wastes: Challenges, perspectives and innovations. *Bioresource Technology*, 297, 122496, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122496>.

Martinez, C. L. M.; Saari, J.; Melo, Y.; Cardoso, M.; De Almeida, G. M. & Vakkilainen, E. Evaluation of thermochemical routes for the valorization of solid coffee residues to produce biofuels: A Brazilian case. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 137, 2021, 110585. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110585>.

Miki, M. K.; Chen, G.; Ekama, G. A.; Van Loosdrecht, M. C. M. & Brdjanovic, D. (orgs.). *Tratamento Biológico de Esgoto: Princípios, Modelagem e Projeto*. IWA Publishing, 2. ed., 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.2166/9781789063233>.

Nhuchhen, D.; Basu, P. & Acharya, B. A Comprehensive Review on Biomass Torrefaction. *International Journal of Renewable Energy & Biofuels*. 2014, Disponível em: <https://doi.org/10.5171/2014.506376>.

Simão, L.; Hotza, D.; Raupp-Pereira, F.; Labrincha, J. A. & Montedo, O. R. K. Wastes from pulp and paper mills – A review of generation and recycling alternatives. *Cerâmica*, 64, p. 443-453, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0366-69132018643712414>.

TAPPI. (2006). *TAPPI T 266 – 18 – Determination of Sodium, Calcium, Copper, Iron, and Manganese in Pulp and Paper by Atomic Absorption Spectroscopy*. TAPPI – Technical association of the pulp and paper industry.

Torres, C. M. M. E.; Carneiro, A. de C. O.; Rodrigues, B. V. C.; Bravo, M. F. S. & Silva, C. M. Torrefaction of kraft pulp mills sludges. *Scientific Reports*, 13(1), Artigo 1, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-46158-0>.

Valdés, C. F.; Marrugo, G. P.; Chejne, F.; Marin-Jaramillo, A.; Franco-Ocampo, J. & Norena-Marin, L. Co-gasification and co-combustion of industrial solid waste mixtures and their implications on environmental emissions, as an alternative management. *Waste Management*, 101, p. 54-65, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.09.037>.

Virkutyte, J. 4 – Aerobic Treatment of Effluents From Pulp and Paper Industries. Em D.-J. Lee, V. Jegatheesan, H. H. Ngo, P. C. Hallenbeck, & A. Pandey (orgs.), *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering*, p. 103-130, 2017, Elsevier. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63665-2.00004-7>.

Von Sperling, M. *Lodos Ativados: Princípios do tratamento biológico de águas residuárias*. v. 4, p. 461, Editora da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), 2016. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444636652000047>. Acesso em: 10 jun. 2025.