



VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE *PINUS* SPP.: EFEITO DO ULTRASSOM NO PERFIL DE SÓLIDOS VOLÁTEIS E NA GERAÇÃO ESTIMADA DE ENERGIA

¹Alexandre Santuchi da Cunha, ²Laura Soares da Silva Souza, ³Shuruk Sufian Yousef Qatani, ⁴Raíssa Vilela Peres, ⁵Ana Karolina Marinho Viana, ⁶Míriam Tvrzská de Gouvêa

¹Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie, e-mail: alexandre.santuchi@mackenzie.br; ²Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie, e-mail: laurasoares1003@gmail.com; ³Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie, e-mail: shurukqatani@gmail.com; ⁴Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie, e-mail: raissavilelap@gmail.com; ⁵Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie, e-mail: ana.viana003@outlook.com; ⁶Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie, e-mail: miriam.gouvea@mackenzie.br

*Gestão Ambiental e Políticas Ambientais
Inovação tecnológica para sustentabilidade*

Resumo

Este trabalho apresenta uma rota de valorização para resíduos de *Pinus* spp. obtidos em campus universitário, avaliando o impacto da extração assistida por ultrassom (EAU) no potencial energético da biomassa. A metodologia compreendeu a caracterização imediata do resíduo de *Pinus in natura* (RP) e do resíduo da extração do *Pinus* (REP) pós-EAU (água deionizada, 40 kHz, 270 W), seguida pela estimativa da composição elementar e da Produção Teórica de Metano (PTM) via modelos matemáticos. A EAU alterou o perfil de sólidos da matriz lignocelulósica, elevando os Sólidos Voláteis de 89% (RP) para 95,9% (REP). Embora a PTM específica tenha reduzido de 453 mL gSV⁻¹ (RP) para 439 mL gSV⁻¹ (REP) devido à remoção de extrativos, o aumento relativo do teor de sólidos voláteis compensou a redução da PTM específica. Isso resultou em uma inversão no potencial de geração de energia elétrica, que aumentou em 5%, saltando de 151 MWh mês⁻¹ (RP) para 158 MWh mês⁻¹ (REP). Conclui-se que a EAU atua como um pré-tratamento eficiente para a bioeconomia circular, mitigando resíduos locais e favorecendo a recuperação energética alinhada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.

Palavras-chave: Análise imediata; Bioenergia; Digestão anaeróbia; Resíduos florestais; Pré-tratamento.

Introdução

Originário do Hemisfério Norte e consolidado no Brasil desde a década de 1960, o gênero *Pinus* destaca-se pela rusticidade, rápido crescimento e produção de fibra longa, essencial para a indústria de papel e celulose. A área plantada é estimada em 1,93 milhão de hectares, com produção anual de celulose de *Pinus* de 2,5 milhões de toneladas (Embrapa, 2026; Ibá, 2026; Resende *et al.*, 2019). Considerando que são geradas 48 t de resíduos para cada 100 t de celulose produzida (Bellote *et al.*, 1998), a silvicultura de *Pinus* spp. acarreta na



geração de mais de 0,1 milhão de toneladas mensais de resíduos (constituídos de serragem, cascas, cavacos, galhos e acículas). O descarte inadequado desses materiais causa impactos ambientais severos, como a emissão de gases de efeito estufa e a contaminação do solo.

A biomassa de *Pinus* apresenta composição lignocelulósica complexa, sendo formada principalmente por celulose, hemicelulose e lignina. Essa constituição confere aos resíduos um elevado teor energético, os quais são frequentemente queimados de maneira direta ou convertidos termicamente para a geração de energia calórica e cogeração industrial (Takahashi *et al.*, 2021). Contudo, além dos constituintes estruturais, resíduos de *Pinus* apresentam compostos extrativos (como fenóis, flavonoides, taninos e terpenos) com elevado potencial biotecnológico e industrial, constituindo importantes fontes naturais de antioxidantes aplicáveis nas indústrias alimentícia, farmacêutica e cosmética (Duarte *et al.*, 2022). Alternativamente à queima direta, a digestão anaeróbia (DA) surge como uma alternativa promissora para a valorização de resíduos sólidos orgânicos, gerando concomitantemente energia e biofertilizante (Ampese *et al.*, 2022). Há, no entanto, desafios no emprego da DA devido à acentuada presença de compostos lignocelulósicos nos resíduos de *Pinus*, os quais dificultam a degradação biológica. Para contornar essa limitação, recomenda-se a aplicação de processos de pré-tratamento, como a extração assistida por ultrassom (EAU) utilizando solventes verdes como água e etanol (Penido *et al.*, 2022). A EAU consolida-se, portanto, como uma técnica viável para a obtenção concomitante de compostos bioativos e frações solubilizadas a partir de resíduos vegetais.

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar uma rota de valorização para resíduos de *Pinus*. A proposta consiste na aplicação da EAU para a obtenção de bioativos e na estimativa do potencial energético do REP por modelos matemáticos. Com isso, busca-se preencher uma lacuna científica sobre o reaproveitamento energético de biomassas florestais pré-tratadas por métodos verdes, alinhando-se dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 7, 9 e 12 (ONU, 2015).

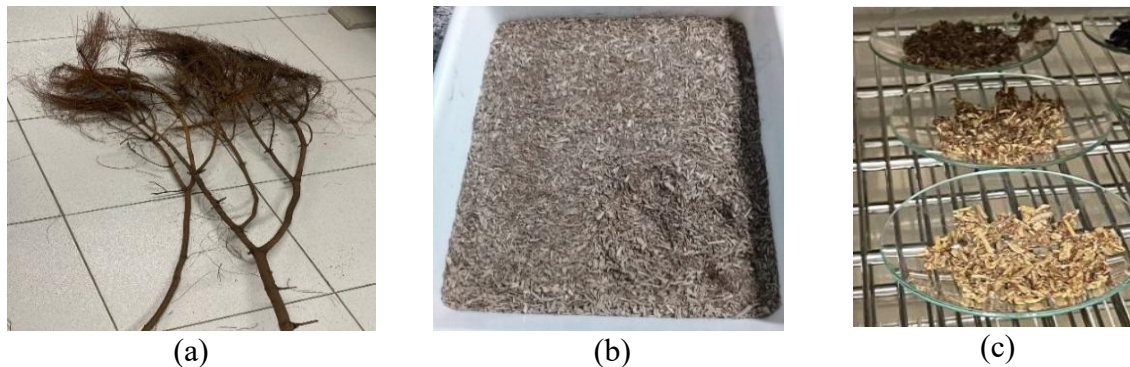
Metodologia

Amostras de *Pinus* do campus de Higienópolis da UPM foram secas, moídas e homogeneizadas, conforme ilustrado na Figura 1, sendo posteriormente destinadas à análise imediata e à EAU. A análise imediata foi realizada para a determinação dos teores em base seca de sólidos voláteis (SV), cinzas (CZ) e carbono fixo (CF). Amostras de 1 g, previamente secas em estufa a 105 °C até atingirem massa constante, de *Pinus* foram submetidas



inicialmente à mufla a 900 °C durante 7 minutos para volatilização da matéria volátil e, posteriormente, a 700 °C durante 1 hora para determinação do teor de cinzas. Os percentuais SV e CZ foram calculados a partir das diferenças de massa obtidas antes e após cada tratamento térmico e CF obtido subtraindo-se de 100% os teores SV e CZ (APHA, 2017).

Figura 1: Resíduos de *Pinus* (a) *in natura* (b) após processo de moagem (c) após EAU.



A extração de compostos bioativos foi realizada por EAU. Inicialmente, foram pesados 10,0 g de biomassa seca em béquer apropriado, aos quais foram adicionados 100 mL de água deionizada, estabelecendo-se uma razão sólido:líquido de 1:10 (g mL⁻¹). A suspensão foi homogeneizada manualmente com bastão de vidro e submetida durante 20 minutos ao tratamento em banho ultrassônico termostatizado mantido a 40 °C operando com uma frequência ultrassônica de 40 kHz e potência de 270 W. O processo promoveu a ruptura parcial da matriz lignocelulósica por cavitação, favorecendo a liberação de compostos de interesse para o solvente extrator, o que foi constatado pela mudança da coloração da solução. Após o tratamento ultrassônico, a suspensão foi centrifugada a 4000 rpm durante 10 minutos para separação do sobrenadante e do resíduo sólido. O sobrenadante foi coletado e submetido à filtração a vácuo para remoção de partículas suspensas, enquanto o resíduo sólido foi seco em estufa a 50 °C para posterior caracterização por análise imediata.

Em conformidade com o procedimento proposto por Mota *et al.* (2025), a fórmula molecular mínima do resíduo RP e do REP na forma CH_xO_y foi estimada a partir dos valores de SV e CF, pelas correlações (Equações 1 a 3) propostas por Parikh *et al.* (2007). A Produção Teórica de Metano (PTM) e o potencial mensal de geração de energia elétrica (Eel) em kWh foram estimados conforme realizado por Mota *et al.* (2025), empregando-se a modelagem estequiométrica de Buswell (Equação 4) e a Equação (5), em que foi considerado para o poder calorífico inferior de metano (PCI) o valor de 35,59 MJ m⁻³, a efetividade na conversão da biomassa em metano (η_{DA}) de 70% e rendimento na conversão em energia elétrica (η_{el}) de 40%. A partir de E_{el} avaliou-se, a previsão de redução na emissão de gases de



efeito estufa (EGE) pela Equação (6), em que o fator F_{em} de $0,1264 \text{ tCO}_2\text{eq MWh}^{-1}$ corresponde ao fator médio do Sistema Interligado Nacional (SIN) publicado pelo MCTI (MCTI, 2019 apud Ampese *et al.*, 2024). Adotou-se para a massa de biomassa o valor de 0,1 milhão de toneladas por mês equivalente à quantidade de resíduos estimada. Cumpre ressaltar que a estimativa do potencial energético proposta neste estudo baseia-se em correlações matemáticas fundamentadas em parâmetros da análise imediata. Por se tratarem de modelos preditivos e genéricos, os valores obtidos constituem uma aproximação teórica preliminar, necessitando de futura validação por meio de ensaios experimentais de digestão anaeróbia.

$$C (\%) = 0,637 (CF) + 0,455 (SV) \quad (1)$$

$$H (\%) = 0,052 (CF) + 0,062 (SV) \quad (2)$$

$$O (\%) = 0,304 (CF) + 0,476 (SV) \quad (3)$$

$$PTM = \frac{22400(\frac{1}{2} + \frac{x}{8} - \frac{y}{4})}{12 + x + 16y} \quad (4)$$

$$E_{el} = \frac{PTM \cdot m_{biomassa} \cdot SV \cdot PCI \cdot \eta_{el} \cdot \eta_{DA}}{360000} \quad (5)$$

$$EGE = F_{em} \cdot E_{el} \quad (6)$$

Resultados e Discussão

A Tabela 1 apresenta os resultados dos ensaios e das estimativas realizadas. A análise imediata indicou alteração no perfil composicional da biomassa após a EAU, com aumento da fração de SV de $89 \pm 3\%$ no RP para $95,9 \pm 0,7\%$ no REP. Esse aumento, associado à redução do desvio padrão, sugere que a cavitação ultrassônica contribuiu para alterações na matriz lignocelulósica e para a maior concentração relativa de compostos orgânicos no resíduo sólido, corroborando evidências da literatura (Ampese *et al.*, 2022). Observou-se, por outro lado, uma ligeira redução da PTM de 453 para 439 mL gSV⁻¹ (da ordem de 3%) atribuída a mudanças estequiométricas na fórmula empírica da biomassa após a EAU (Tabela 1). No entanto, o potencial global de geração de energia elétrica (E_{el}) apresentou um incremento da ordem de 5%, passando de 151 para 158 MWh mês⁻¹, acompanhado pelo aumento nos índices de mitigação de gases de efeito estufa (EGE). Esse ganho energético líquido, apesar da menor PTM específica, é justificado pelo expressivo aumento na concentração de sólidos voláteis (SV) no REP (95,9%) em comparação ao RP (89%). A presença majoritária de SV no REP que reduz a recalcitrância típica das acículas e cascas de *Pinus in natura* e a remoção de frações inertes solubilizadas compensaram a variação estequiométrica, resultando em maior densidade energética global por massa de biomassa tratada. Cumpre reiterar que os valores estimados refletem uma estimativa de potencial teórico por correlações matemáticas não



fenomenológicas, estabelecendo um limite superior preditivo que desconsidera restrições cinéticas, de transferência de massa e energia, ou perdas operacionais reais de um sistema biológico em escala contínua.

Tabela 1: Caracterização imediata e predição do potencial energético dos resíduos de *Pinus*.

Amostra	SV(%)	CF(%)	CZ(%)	CHxOy	PTM (*) (mL gSV ⁻¹)	E _{el} (*) (MWh mês ⁻¹)	EGE(*) (tCO _{2eq} mês ⁻¹)
RP	89±3	9,6	1,9±0,3	CH _{1,54} O _{0,729}	453	151	19
REP	95,9±0,7	2,9	1,2±0,1	CH _{1,60} O _{0,768}	439	158	20

(*) Valores estimados por modelos matemáticos.

Conclusão

O estudo indicou o potencial da EAU como pré-tratamento para valorização energética de resíduos de *Pinus* spp. A EAU promoveu a desestruturação da matriz lignocelulósica, elevando o teor de SV de 89% (RP) para 95,9% (REP). Embora a remoção de extrativos solúveis tenha acarretado uma redução discreta na PTM específica por grama de SV (de 453 para 439 mL gSV⁻¹), o ganho mássico na concentração de voláteis totais compensou essa variação. Esse fenômeno promoveu um ganho estimado de 5% no potencial de geração de energia elétrica estimado, saltando de 151 MWh mês⁻¹ (RP) para 158 MWh mês⁻¹ (REP). Conclui-se que o modelo matemático empregado evidencia o potencial de aplicação do REP para a bioeconomia circular e o desenvolvimento sustentável local. Contudo, por se tratar de uma ferramenta preditiva preliminar, os resultados sugerem a viabilidade do sistema, cuja implementação prática deve ser validada por ensaios experimentais de digestão anaeróbia (DA) para a adequada especificação de uma unidade de geração de energia.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Coordenação de Sustentabilidade da Gerência de Responsabilidade Social e Filantropia (GERSF) do Instituto Presbiteriano Mackenzie (IPM) pelo apoio institucional, técnico e pela infraestrutura laboratorial concedida.

Referências

AMPESE, L. C.; SGANZERLA, W. G.; ZIERO, H. D. D.; MUDHOO, A.; MARTINS, G.; FORSTER-CARNEIRO, T. Research progress, trends, and updates on anaerobic digestion technology: A bibliometric analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 331, p. 130004, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130004>.

AMPESE, L. C.; TVRZSKÁ DE GOUVÊA, M.; BULLER, L. S.; SGANZERLA, W. G.; ROSA, M. T. M. G.; FORSTER-CARNEIRO, T. Using thermodynamic models for bioenergy



recovery and generation assessment: a case study with açai and macaúba by-products.

Biomass Conversion and Biorefinery, v. 14, p. 17177-17192, 2024. DOI:

<https://doi.org/10.1007/s13399-023-03880-z>.

APHA. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 23. ed.

Washington: American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environmental Federation, 2017.

BELLOTE, A. F. J.; SILVA, H. D. da; FERREIRA, C. A.; ANDRADE, G. de C. Resíduos da indústria de celulose em plantios florestais. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n. 37, p. 99-106, jul./dez. 1998.

DUARTE, H.; GOMES, V.; ALIAÑO-GONZÁLEZ, M. J.; FALEIRO, L.; ROMANO, A.; MEDRONHO, B. Ultrasound-assisted extraction of polyphenols from maritime pine residues with deep eutectic solvents. **Foods**, v. 11, n. 23, p. 3754, 2022. DOI:

<https://doi.org/10.3390/foods11233754>.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (Embrapa). **Perguntas e respostas**. Org. Joel Penteado. Ed. Katia Pichelli. Colombo: Embrapa Florestas, 2026.

Disponível em: <https://www.embrapa.br/web/florestas/pinus/perguntas-e-respostas>. Acesso em: 22 jun. 2026.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (Ibá). Brasil bate recorde de produção e exportação de celulose em 2025. In: **Blog Ibá em Movimento**, 15 abr. 2026. Disponível em: <https://iba.org/blog/iba-em-movimento/brasil-bate-recorde-de-producao-e-exportacao-de-celulose-em-2025-2/>. Acesso em: 22 jun. 2026.

MOTA, G. C. C.; ALVES, N. C.; VILLEGAS, B.; GUIDA, M. M.; TIRELLI, M. A.; TVRZSKÁ DE GOUVÊA, M. Valorização de resíduos de jardinagem da Universidade Presbiteriana Mackenzie: desafios e perspectivas para o campus de Higienópolis. In: ANAIS DO XXV CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA (COBEQ). Belo Horizonte: Galoá, 2025.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. Nova York: ONU, 2015.

PARIKH, J.; CHANNIWALA, S. A.; GHOSAL, G. K. A correlation for calculating elemental composition from proximate analysis of biomass materials. **Fuel**, v. 86, p. 1710-1719, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.12.029>.

PENIDO, R. G.; NUNES, R. C.; SANTOS, E. N. Solventes sustentáveis para processos químicos. **Revista Virtual de Química**, v. 14, n. 3, p. 537-551, 2022. DOI: <https://dx.doi.org/10.21577/1984-6835.20220085>.

RESENDE, M. D. V. de; SILVA, H. D. da; AGUIAR, A. V. de. **Desafios e perspectivas do melhoramento genético de Pinus no Brasil**. Colombo: Embrapa Florestas, 2019.

TAKAHASHI, V. M.; FERREIRA, V. R. da S.; CADEMARTORI, P. H. G. de; CARNEIRO, M. E.; SILVA, D. A. da. Qualidade energética de resíduos madeireiros paricá e pinus. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 36, n. 2, p. 230-238, abr./jun. 2021. DOI: <https://dx.doi.org/10.17224/EnergAgric.2021v36n2p230-238>.