

Campus São Mateus
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

AVALIAÇÃO DA EFETIVIDADE DA CALCINAÇÃO DA BIOMASSA DE PINUS POR MEIO DE COMBUSTÃO EM CALDEIRA

EVALUATION OF PINE BIOMASS CALCINATION EFFECTIVENESS THROUGH A BOILER

EVALUACIÓN DE LA EFECTIVIDAD DE LA CALCINACIÓN DE BIOMASA DE PINO A TRAVÉS DE UNA CALDERA

Felipe César Faedo Thives¹ & Abrahão Bernardo Rohden²

¹² Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Regional de Blumenau

¹ felipethives08@gmail.com ² arohden@furb.br

ARTIGO INFO.

Recebido: 18.02.2025

Aprovado: 11.03.2025

Disponibilizado: 27.04.2025

PALAVRAS-CHAVE: Biomassa; Cinza de madeira; eficiência energética.

KEYWORDS: Biomass; Wood ash; Energy efficiency.

PALABRAS CLAVE: Biomasa; Ceniza de madera; rendimiento energético.

*Autor Correspondente: Thives, F. C. F.

RESUMO

A busca por alternativas que viabilizem o uso de energias renováveis, têm se tornado um grande desafio no que tange ao aproveitamento efetivo de toda matéria-prima. A biomassa florestal surge como opção economicamente viável pela sua abundância. Diversas empresas utilizam esse material para geração de energia térmica, ainda assim, verifica-se um subaproveitamento da biomassa lenhosa. Portanto, o objetivo do presente trabalho foi avaliar a efetividade da calcinação da biomassa de pinus por meio de sua combustão em caldeira. A metodologia consistiu em um estudo de caso em uma empresa de ramo madeireiro, que utiliza uma caldeira para geração de energia térmica e essa transformação gera a cinza de madeira. A cinza foi calcinada variando os tempos e temperaturas, investigando a homogeneidade e a eficiência da perda de massa de cada tratamento. Os resultados indicaram que com maiores tempos e temperaturas se que obtiveram resultados melhores, atingindo completa homogeneização da amostra de cinza com 5 horas e 700° C, bem como o mesmo tratamento sendo o mais efetivo na perda de massa com 44,34%. A conclusão demonstrou que o tempo foi mais efetivo que a temperatura, e que a cinza estudada foi subaproveitada, tendo potencial para maximizar o proveito térmico.

ABSTRACT

The search for alternatives that enable the use of renewable energy has become a major challenge regarding the effective use of all raw materials. Forest biomass has emerged as an economically viable option due to its abundance. Several companies use this material to generate thermal energy, yet there is an underuse of woody

biomass. Therefore, the objective of this study was to evaluate the effectiveness of calcining pine biomass through its combustion in a boiler. The methodology consisted of a case study in a timber company that uses a boiler to generate thermal energy, and this transformation generates wood ash. The ash was calcined at varying times and temperatures, investigating the homogeneity and efficiency of mass loss in each treatment. The results indicated that with longer times and temperatures better results were obtained, reaching complete homogenization of the ash sample with 5 hours and 700° C, as well as the same treatment being the most effective in mass loss with 44.34%. The conclusion showed that time was more effective than temperature, and that the ash studied was underused, having the potential to maximize thermal benefit.

RESUMEN

La búsqueda de alternativas que hagan viable el uso de energías renovables se ha convertido en un gran reto a la hora de aprovechar eficazmente todas las materias primas. La biomasa forestal surge como una opción económicamente viable debido a su abundancia. Varias empresas utilizan este material para generar energía térmica, sin embargo, existe una infrutilización de la biomasa leñosa. Por tanto, el objetivo del presente trabajo fue evaluar la efectividad de la calcinación de biomasa de pino mediante su combustión en una caldera. La metodología consistió en un estudio de caso en una empresa maderera, que utiliza una caldera para generar energía térmica y esta transformación genera cenizas de madera. La ceniza se calcinó a diferentes tiempos y temperaturas, investigando la homogeneidad y eficiencia de pérdida de masa en cada tratamiento. Los resultados indicaron que con mayores tiempos y temperaturas se obtuvieron mejores resultados, lográndose la homogeneización completa de la muestra de ceniza en 5 horas y 700°C, además siendo el mismo tratamiento el más efectivo en pérdida de masa con 44.34%. La conclusión mostró que el tiempo era más efectivo que la temperatura y que la ceniza estudiada estaba subutilizada y tenía el potencial de maximizar el beneficio térmico.

INTRODUÇÃO

A biomassa é definida como uma fonte de energia renovável derivada de materiais orgânicos, podendo ser considerada de origem vegetal e animal Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2008). Ela surge como uma alternativa sustentável para a matriz energética global, pois sua utilização contribui para a redução da dependência de combustíveis fósseis e para a mitigação dos impactos ambientais associados à geração de energia (Poizot & Dolhem, 2011). Devido a sua ampla disponibilidade pela versatilidade de espécies e potencial de reaproveitamento, a biomassa tem sido cada vez mais estudada e aplicada em diferentes setores industriais.

Existem diversas categorias de biomassa, classificadas com base em sua origem e composição. Entre as principais fontes estão a biomassa residual agrícola, a biomassa de rejeito urbano ou industrial e reflorestamentos (ANEEL, 2008). Sendo esta última, obtida a partir da madeira em diversos formatos como lenha, cavaco, serragem, cascas e folhas, apresentam grande potencial energético, sendo amplamente utilizadas na geração de calor e eletricidade por meio da combustão direta, gaseificação e pirólise (Marafon et al., 2016).

No Brasil, a biomassa ocupa um papel de destaque na matriz energética. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2023), em 2022, 47,4% da energia consumida no país teve origem em fontes renováveis, enquanto a média mundial foi de apenas 14,1%. Dentre as energias renováveis e não renováveis, a biomassa representou 31,4% da matriz energética, enquanto ao comparar somente com as energias renováveis, a biomassa contribui com 66,2%. Já a biomassa florestal, entre as diversas fontes de energia sustentáveis e não sustentáveis, ocupou 14% de produção de energia, que corresponde a aproximadamente um terço das energias renováveis com 33, 8% (EPE, 2022).

Enquanto a influência do setor madeireiro impacta com grandes contribuições a economia do país, movimentando cerca de R\$ 244,6 bilhões em 2021, que correspondeu a 1,2% do Produto Interno Bruto (PIB) nacional. No mesmo ano, o Brasil contava com 9,93 milhões de hectares plantados para fins industriais, sendo 7,53 milhões destinados ao cultivo de eucalipto, 1,93 milhões ao pinus e 0,47 milhões a outras espécies (Indústria Brasileira de Árvores, 2022).

Além do fornecimento energético, a biomassa florestal auxilia na redução da emissão de carbono, pois toda vez que o carbono da biomassa é liberado para atmosfera por meio de utilização energética como na combustão, ao replantá-lo, ele é novamente capturado tendo impacto nulo. Outro aspecto relevante seria quanto à substituição de combustíveis fósseis por biomassas, que também contribuem para a diminuição dos gases de efeito estufa, tornando essa fonte uma alternativa ambientalmente viável (Ramos, Berzosa, Espí, Claes, & Roubo, 2020). Entretanto, a geração de energia a partir da biomassa não está isenta de desafios, principalmente no que diz respeito à gestão dos resíduos resultantes desse processo, como a combustão direta em caldeiras.

A grande quantidade de resíduos gerados pela combustão da biomassa florestal levanta questionamentos sobre a real eficiência do seu aproveitamento, gerando um possível subaproveitamento de toda matéria-prima. Além disso, ainda existem lacunas de informações sobre a logística de transporte e os custos operacionais associados ao descarte em aterros sanitários que comprometem a viabilidade econômica da biomassa (Ramos, et al., 2020).

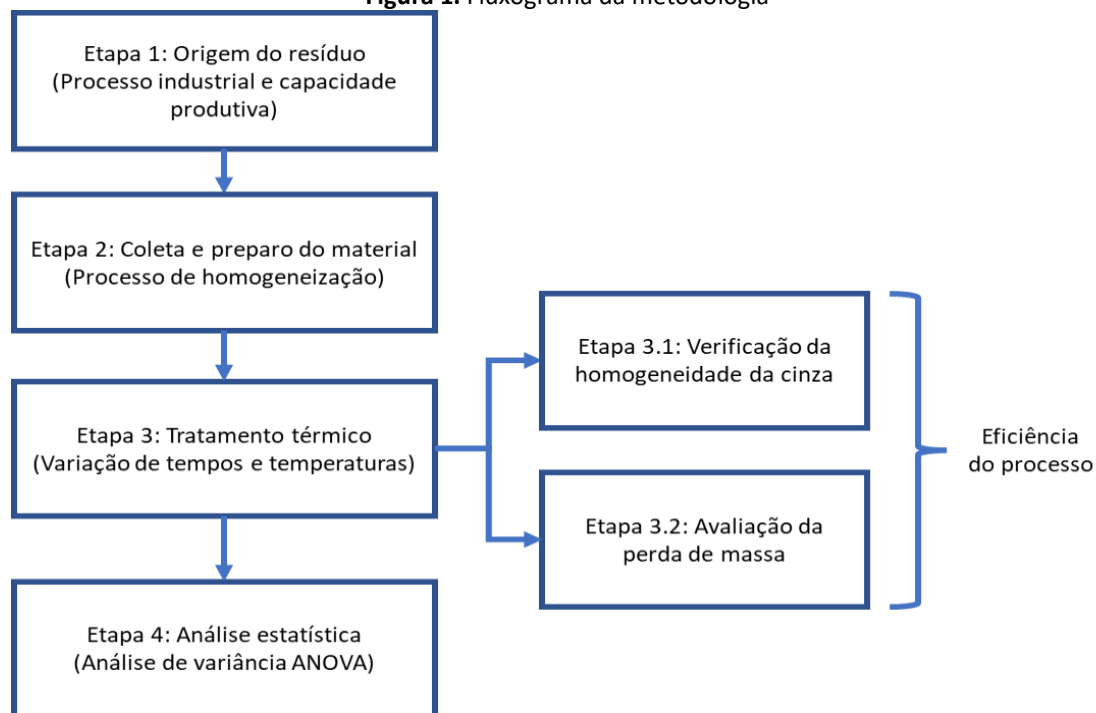
Nesse contexto, torna-se essencial investigar alternativas que otimizem o uso desses resíduos e tornem a biomassa uma fonte ainda mais eficiente.

Desse modo, este estudo objetiva avaliar a efetividade da calcinação da biomassa de pinus por meio de sua combustão em caldeira. Além de identificar estratégias que maximizem seu aproveitamento e reduzam os impactos ambientais associados à geração de resíduos por meio de variações de tempo e temperatura.

METODOLOGIA

O desenvolvimento deste trabalho consistiu na obtenção de dados por meio exploratório, de origem quantitativa com estudo de caso aplicado em ensaios laboratoriais e classificados com análise estatística. A metodologia foi dividida em quatro etapas, a primeira apresenta os dados da origem do resíduo e capacidade produtiva. A segunda trata a respeito da coleta e preparo do material. A terceira estuda a respeito da calcinação do material (tratamento térmico). E, por fim, na última etapa é feita uma avaliação estatística (Figura 1).

Figura 1. Fluxograma da metodologia

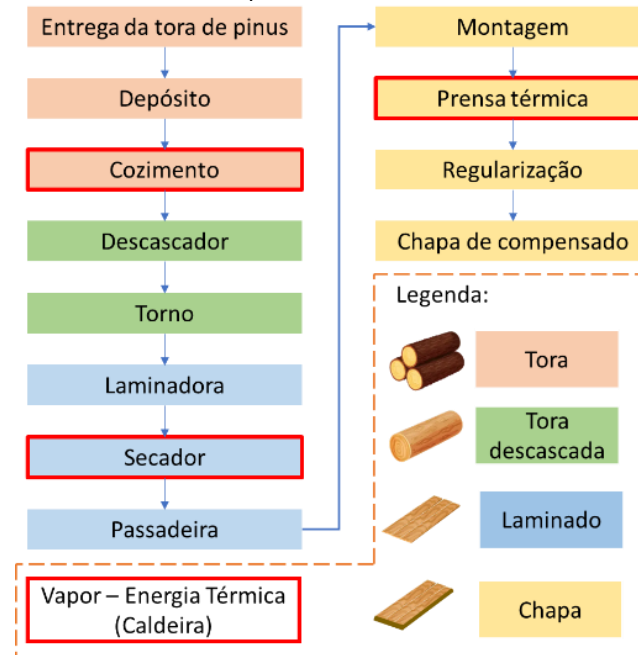


Fonte: Autores (2025).

ORIGEM DO RESÍDUO E CAPACIDADE PRODUTIVA

O resíduo surge diante de uma empresa da região serrana de Santa Catarina, que utiliza madeiras de pinus para fabricação de chapas de compensado. Para a elaboração do produto o estágio se inicia na entrega de toras, onde são armazenadas em um depósito. Em seguida, são conduzidas para realização do cozimento que serve para dar maior flexibilidade ao material. Posteriormente, vão para o descascador e torno para dar uniformidade às toras. Após esse processo, inicia-se a etapa de aplicação das toras na laminadora e secador. Mais adiante, as lâminas devidamente secas, vão para a passadeira, etapa esta que serve para aplicação de cola, cujas lâminas são montadas e aplicadas em prensa térmica. Por fim, é realizado uma regularização por meio de esquadrejamento e lixa para melhor acabamento, chegando no produto: a chapa de compensado (Figura 2).

Figura 2. Esquema simplificado do processo de fábrica para produção das chapas de compensado e a origem do resíduo proveniente de caldeira



Fonte: Autores (2025).

Como demonstrado na Figura 1, a origem do resíduo se dá pela combustão do cavaco do pinus em caldeira, gerando a cinza. O uso da caldeira é aplicado para uma geração de energia térmica por meio de vapor, operando em cerca de 750° C a 850° C, produzindo 37 toneladas por hora de vapor.

A cinza do presente estudo é considerada mista, pois apresenta componentes da cinza retida no filtro e retida na fornalha (cinza volante e pesada). No período de 2024 a geração de cinza foi de aproximadamente 2.884,77 toneladas, contendo uma média 240,40 toneladas ao mês (Tabela 1).

Tabela 1. Produção mensal de cinza por meio de combustão em caldeira

Mês (2024)	Cinza (t)	Mês (2024)	Cinza (t)	Mês (2024)	Cinza (t)
Janeiro	200,40	Maio	306,20	Setembro	223,46
Fevereiro	228,00	Junho	144,10	Outubro	273,72
Março	261,34	Julho	328,34	Novembro	244,71
Abril	243,20	Agosto	278,26	Dezembro	153,04
Total de cinza em 2024 (t)		2.884,77	Média mensal (t/mês)	240,40	

Fonte: Autores (2025).

COLETA E PREPARO DO MATERIAL

A cinza foi coletada em quatro períodos, sendo em fevereiro, abril, junho e agosto de 2024. As amostras foram levadas à estufa de secagem do fabricante SolidSteel em temperatura de 105 ± 5° C, onde constatou-se umidade média de 57,83%. A ocorrência da alta umidade está associada ao procedimento da empresa de molhar a cinza durante o carregamento dos caminhões, para que a cinza não seja carregada pelo vento.

Em seguida, as cinzas foram peneiradas removendo as partículas maiores que a peneira 4,8 mm, pois eram impurezas contidas nas amostras como materiais britados, partículas de argila aglomeradas, entre outros. Posteriormente, as amostras foram devidamente misturadas de modo a homogeneizar todas as cinzas de diferentes períodos de coleta e armazenadas em tambores de polietileno de 50 litros, sendo hermeticamente fechados.

TRATAMENTO TÉRMICO

O ensaio de calcinação foi realizado por meio de mufla do fabricante EDG, modelo 3P-5, cujas amostras foram submetidas a uma rampa de 10° C por minuto em tempos de 1, 3 e 5 horas, e temperaturas de 500, 600 e 700° C, formando uma matriz com nove tratamentos (Tabela 2). As escolhas de tempos e temperaturas foram fundamentadas no trabalho de Amaral (2020), tendo em vista a similaridade da matéria-prima, a qual beneficiou a cinza de eucalipto.

Tabela 2. Matriz da correção do tratamento térmico de tempo e temperatura

Tempo (horas)	Temperatura (°C)		
	500	600	700
1	T1	T2	T3
3	T4	T5	T6
5	T7	T8	T9

Legenda: T – Tratamento e n – número do tratamento. Fonte: Autores (2025).

Cada tratamento foi realizado em cinco rodadas, para dar maior confiabilidade nos resultados em seis cadinhos de porcelana. A primeira etapa foi realizada variando a quantidade de massa nos cadinhos, visando identificar se no tempo e temperatura da calcinação tornava a amostra contida no cadinho homogênea (massa de cada cadinho 30, 21, 18, 12, 9 e 7 ± 1 grama).

Na segunda etapa com as demais quatro rodadas, estabeleceu-se um padrão de aproximadamente 20 ± 1 gramas de cinza em cada cadinho. O ensaio teve como objetivo verificar a perda de massa da cinza durante o tratamento, podendo avaliar se a calcinação da caldeira era efetiva ou se ainda havia potencial energético contido na cinza. Maiores perdas de massa representam uma calcinação com baixa eficiência, pois o material não foi devidamente calcinado, isto é, ainda há presença de muita matéria orgânica, ou seja, quanto menor perda de massa mais o material da caldeira foi aproveitado energeticamente, demonstrando uma boa eficiência.

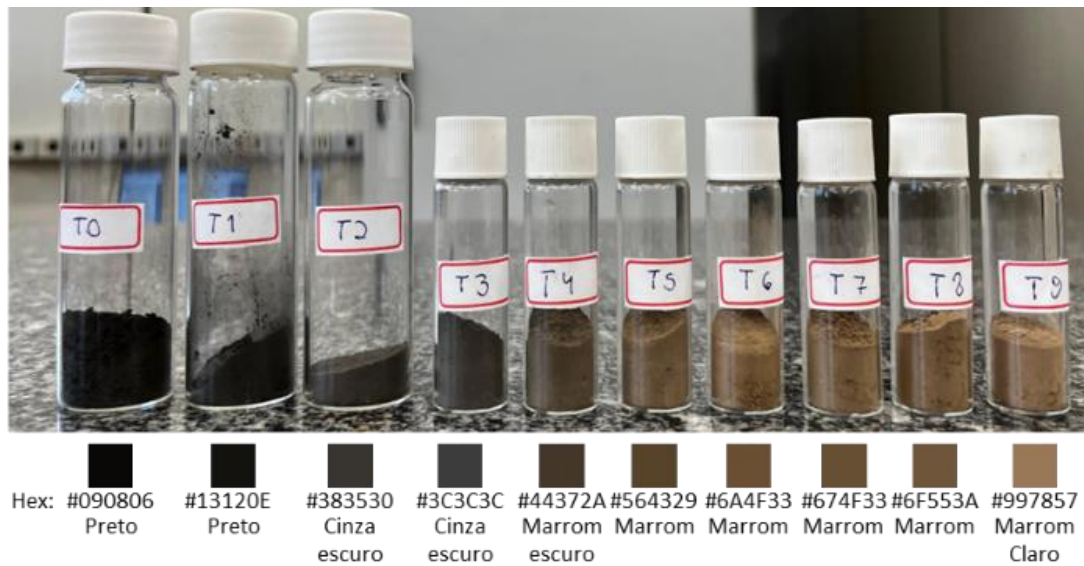
ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os valores médios e o desvio padrão dos parâmetros avaliados foram submetidos em análise de variância (ANOVA) com teor de significância de 5%, os dados foram processados no *software* Microsoft Excel. Ao utilizar a análise de variância (ANOVA), permite a comparação entre os tratamentos, neste caso, tempo e temperatura, possibilitando ver o quão cada fator pode impactar na influência de uma boa ou má calcinação do material (Barbetta, Reis, & Bornia, 2024).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Tratamento térmico

A primeira análise visual demonstrou uma alteração da coloração das partículas à medida que o tempo e a temperatura foram aumentando (Figura 3). As cores variaram desde tons em preto T0 e T1 (Sem tratamento e 500° C e 1 h), em cinza escuro para T2 e T3 (600 e 700° C em 1 h), marrom escuro para T4 (500° C e 3 h), marrom para T5, T6, T7 e T8 (600° C 3 h, 700° C 3 h, 500° C 5 h e 600° C 5 h) e marrom claro para T9 (700° C 5 h). Essa mudança de coloração também foi percebida por Cunha (2017), que observou mudanças do preto ao cinza para cinzas volantes de biomassa, indicando que os tons em preto remetem a uma significativa quantidade de matéria orgânica não queimada.

Figura 3. Inspeção visual da alteração de cores da cinza de cada tratamento térmico

Legenda: Hex: Sistema de cores hexadecimal fundamentado no RGB (Red, Green e Blue) para nomenclatura alfanumérica das cores. Fonte: Autores (2025).

Etapa de homogeneização

A homogeneidade da cinza apresentou uma padronização mais evidente com o aumento do tempo e da temperatura, o que justifica a alteração da coloração observada. Os critérios de homogeneização foram definidos de forma binária, com respostas “sim” ou “não” (Tabela 3). A resposta era considerada “sim” quando toda a amostra apresentava coloração uniforme, indicando a completa calcinação do material. Já a resposta “não” indicava uma calcinação parcial (Figura 4), embora não fosse possível quantificar exatamente a fração do material efetivamente calcinado, tendo em vista que não havia como separar as partículas com diferentes graus de combustão.

Tabela 3. Homogeneidade da cinza em função da massa com diferentes tratamentos

Massa (g)	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
30,0	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Sim	Sim
21,0	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Sim	Sim	Sim
18,0	Não	Não	Não	Não	Não	Sim	Sim	Sim	Sim
12,0	Não	Não	Não	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
9,0	Não	Não	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
7,0	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim

Fonte: Autores (2025).

Figura 4. Calcinação parcial considerada não homogênea

Fonte: Autores (2025).

Em vista dos resultados a homogeneidade das amostras foi evidenciado que quanto mais longo o tempo e maior a temperatura, mesmo com quantidades maiores de massa, a calcinação é homogênea. Esse fator está correlacionado com um conceito chamado de calor específico (cal/g °C), que é a quantidade de energia térmica (cal) necessária para que o material aumente a temperatura em 1° C (Rao, 2003). Logo, se a quantidade de massa do material for maior, é necessário um maior gasto energético.

Diante disso, foi verificado que em T1 (500° C e 1 hora), a quantidade de massa aplicada não foi suficiente para homogeneização da cinza. Quando a temperatura foi aumentada para 600 e 700° C (T2 e T3), a massa de 7 gramas atendeu ao critério de alteração da coloração. Quando o tempo foi aumentado para 3 horas (T4, T5 e T6), percebeu-se um avanço das quantidades de massa gradual, atingindo a capacidade de homogeneização de 9, 12 e 18 respectivamente. Ainda analisando o tempo, ao aumentar para 5 horas (T7, T8 e T9), percebe-se uma maior estabilização dos ganhos, obtendo ganhos de capacidade de combustão de massa de 21, 30 e 30 respectivamente.

Ao verificar as temperaturas, em 500° C (T1, T4 e T7), entre T1 e T4, não se sabe ao certo o aumento da eficiência do processo, pois em T1, nenhum resultado apresentou o conceito “sim”. Entre T4 e T7 (de 3 para 5 horas), o aumento da capacidade de combustão foi de 2,33 vezes, passando de 9 gramas para 21. Na faixa de 600° C (T2, T5 e T8), esse processo foi similar, apresentando um ganho mais modesto entre T2 e T5 de 1,7 vezes e de T5 para T8 de 2,5 vezes. E, por fim, na temperatura de 700° C (T3, T6 e T9), com eficiência de 2,5 vezes de T3 para T6 e de 1,6 vezes de T6 para T9.

Portanto, diante dos dados apresentados, verificou-se que para homogeneização da cinza, o tempo e temperatura tiveram impactos positivos na calcinação. Mas, de modo geral, ao aumentar o tempo os resultados foram mais eficientes do que quando a temperatura foi aumentada (Tabelas 4 e 5).

Tabela 4. Eficiência da homogeneização da massa em função da temperatura

1 hora	AE	3 horas	AE	5 horas	AE
T1 - T2	NC	T4 - T5	33,33%	T7 - T8	42,86%
T2 - T3	0,00%	T5 - T6	50,00%	T8 - T9	0,00%
T1 - T3	NC	T4 - T7	100,00%	T7 - T9	42,86%

Legenda: NC – Não Conclusivo e AE – Aumento da Efetividade. Fonte: Autores (2025).

Tabela 5. Eficiência da homogeneização da massa em função do tempo

500°C	AE	600°C	AE	700°C	AE
T1 - T4	NC	T2 - T5	71,43%	T3 - T6	157,14%
T4 - T7	133,33%	T5 - T8	150,00%	T6 - T9	66,67%
T1 - T7	NC	T2 - T8	328,57%	T3 - T9	328,57%

Legenda: NC – Não Conclusivo e AE – Aumento da Efetividade. Fonte: Autores (2025).

Etapa de calcinação em função da perda de massa

Quanto a verificação da perda de massa em função da calcinação apresentou porcentagens desde 27,67% sendo a menor, até 44,34% sendo a maior (Tabela 6). Maiores porcentagens de massa remanescente indicam que maiores quantidades de cinza não foram devidamente calcinadas, ou seja, maior presença de matéria orgânica, enquanto maiores percentuais de perda significam que maiores porções de cinza foram calcinadas, demonstrando boas combustões.

Tabela 6. Perda de massa em função da calcinação

Amostra	Massa remanescente (%)	Perda (%)	Desvio Padrão
T1 (1 h 500°C)	72,33	27,67	0,0103
T2 (1h 600°C)	71,96	28,04	0,0389
T3 (1h 700°C)	67,15	32,85	0,0419
T4 (3 h 500°C)	65,66	34,34	0,0209
T5 (3h 600°C)	63,23	36,77	0,0086
T6 (3h 700°C)	60,43	39,57	0,0120
T7 (5 h 500°C)	59,73	40,27	0,0182
T8 (5h 600°C)	57,89	42,11	0,0326
T9 (5h 700°C)	55,66	44,34	0,0240

Fonte: Autores (2025).

Ao verificar os dados da Tabela 6, percebe-se uma linha de tendência crescente do aumento da perda de massa em função da calcinação. Ao realizar a análise em função do tempo, em 1 hora (T1, T2 e T3) obteve-se uma redução de massa de 5,18%. Em 3 horas (T4, T5 e T6), diminuiu 5,23%, enquanto em 5 horas (T7, T8 e T9) com 4,07%. Nota-se que ao aumentar a temperatura tem-se resultados menos expressivos.

Diante da perspectiva em função da temperatura, em 500° C (T1, T4 e T7), percebeu-se uma redução de massa de 12,6%. Para faixa de 600° C (T2, T5 e T8), diminuiu em 14,07%, já em 700° C (T3, T6 e T9) com 11,49%. Ao modificar o tempo da calcinação, os resultados foram mais expressivos quando comparados com a temperatura.

Com relação a outras pesquisas, os resultados foram em sua grande maioria diferentes dos encontrados na literatura. De acordo com Amaral (2020), a perda de massa da cinza de eucalipto foi de 15,19%. Para Cunha (2017), a cinza de biomassa ficou entre 6 e 7%. Enquanto para Misra, Ragland e Baker (1993) a cinza de madeira de caldeira ficou entre 23 a 48%. Além disso, segundo Couto (2018), a perda de massa de cinza de eucalipto foi de 38,24%, atingindo valores semelhantes aos encontrados nesta pesquisa.

Análise estatística

Para aferição e comprovação da eficiência da calcinação entre tempo e temperatura, os dados foram submetidos em análise de variância (ANOVA) com 5% de significância (Tabela 7).

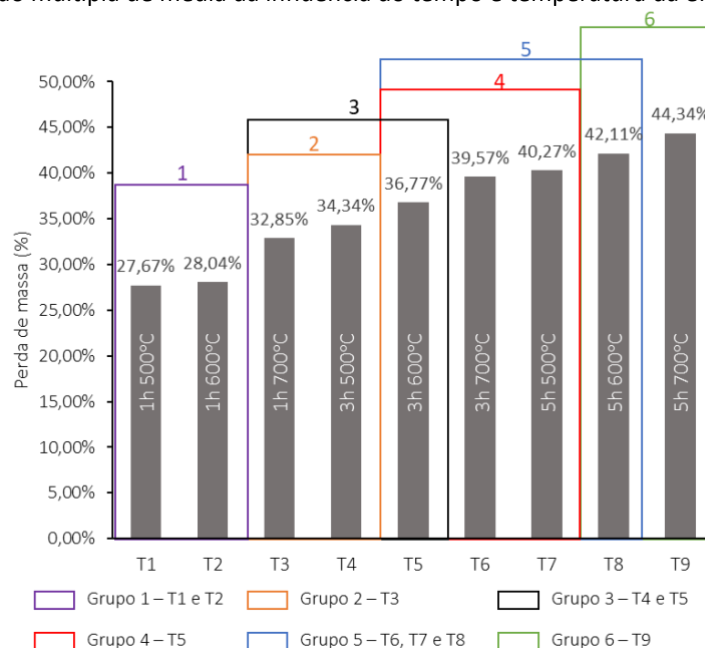
Tabela 7. Análise de variância (ANOVA) quanto a influência do tempo e temperatura da eficiência da calcinação

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	F crítico	SIG
Tempo (A)	0,1224	2	0,0612	91,790	3,2594	Sim
Temperatura (B)	0,0182	2	0,0091	13,664	3,2594	Sim
AB	0,0011	4	0,0003	0,4265	2,6335	Não
Erro	0,0240	36	0,0007			
Total	0,1658	44				

Legenda: SQ – Soma quadrada; GDL – Graus de liberdade; MQ – Média quadrada; Teste F = MQ / MQerro; F Tab – Valor tabelado de Fischer; Sig – Efeito significativo (Sim / Não). Fonte: Autores (2025).

Com base nos dados apresentados, observa-se que o tempo teve um impacto mais significativo do que a temperatura. Tanto na análise da homogeneização quanto na perda de massa, o aumento do tempo resultou em efeitos mais expressivos, evidenciando sua maior influência no processo. Estatisticamente falando, esse fato ocorre devido ao valor do “Teste F” para o tempo ser maior do que a temperatura ($91,79 > 13,66$).

No entanto, apesar do tempo e temperatura serem considerados significativos, a interação entre ambos não apresentou relevância estatística. Para auxiliar a explicação desse quesito, os tratamentos foram inseridos em comparação múltipla de médias (Figura 5).

Figura 5. Comparação múltipla de média da influência do tempo e temperatura da eficiência da calcinação

Fonte: Autores (2025).

Quando verificado os tempos, em 1 hora percebe-se que a temperatura influenciou somente em 700° C, pois T3 é estatisticamente diferente de T2 e T1 (Grupo 1, $T1 = T2 \neq T3$). Já nos períodos de 3 e 5 horas, os resultados mostraram que quando aumentado a temperatura em 100° C, os tratamentos foram considerados equivalentes ($T4 = T5 = T6$) ($T7 = T8 = T9$), contudo quando a diferença de temperatura foi de 200° C, isto é, de 500 para 700° C, houve diferença significativa ($T4 \neq T6$) ($T7 \neq T9$).

Já entre as temperaturas de 500, 600 e 700° C, todos os resultados ao aumentar o tempo, demonstraram diferença significativa, ou seja, houve uma influência mais expressiva de tempo que é evidenciado pela diferença entre os tratamentos ($T1 \neq T4 \neq T7$) ($T2 \neq T5 \neq T8$) ($T3 \neq T6 \neq T9$).

E, por fim, a iteração entre tempo e temperatura mostrou que, ao verificar os grupos como no caso do número 2, o tratamento T3 é igual ao tratamento T4, ou seja, mesmo com uma menor temperatura e mais tempo (T4), a calcinação é considerada equivalente a uma calcinação com maior temperatura e menos tempo (T3), logo o tempo e temperatura não influenciam no resultado, o que comprova não significância, expressa pela Tabela 6. Esse problema também é verificado nos grupos 3 e 5, quanto aos demais grupos 1, 4 e 6 não apresentam iterações, pois compõem somente elementos da mesma faixa de tempo.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A caldeira em estudo opera em temperaturas entre 750° C e 850° C, produzindo 37 toneladas por hora de vapor. No entanto, mesmo em condições de temperatura inferiores às praticadas na caldeira, ainda foi possível identificar um desperdício de potencial energético significativo. No pior tratamento avaliado (T1 – 1 hora a 500° C), observou-se uma redução de massa de 27,67%, indicando que mais de um quinto da matéria-prima estava sendo subaproveitada. Já no melhor tratamento (T9 – 5 horas a 700° C), a eficiência de redução de massa atingiu 44,34%, revelando que quase metade do material poderia estar sendo mais bem aproveitado. Além disso, foi evidente a mudança de coloração da cinza quando bem calcinada, eliminando boa e/ou toda parte da matéria orgânica, comprovando um *déficit* de exploração da biomassa.

Entretanto, é importante destacar que os experimentos foram realizados em escala laboratorial, utilizando aproximadamente 20 gramas de material em cada cadinho. Em uma caldeira industrial, onde a biomassa é processada em toneladas, a eficiência da redução de massa pode ser impactada por diversos fatores operacionais, como produção da fábrica, impurezas, como cascas e folhas, umidade e temperatura. Assim, conforme demonstrado neste estudo, uma solução viável para otimizar o aproveitamento da biomassa seria manter a temperatura operacional da caldeira e prolongar o tempo de calcinação do material, visando extrair seu potencial máximo. Caso não seja satisfatório para obtenção da energia térmica, ou seja, reduza a capacidade produtiva da caldeira em toneladas hora de vapor, pode-se aproveitar a cinza para formulação de novas formas de combustível, como a elaboração de briquetes e *pellets*.

Portanto, o objetivo do presente estudo foi alcançado, podendo identificar que a calcinação da biomassa de pinus da caldeira em estudo não é totalmente efetiva, podendo otimizar o processo para maximizar o aproveitamento energético do material.

REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Energia Elétrica. (2008). *Atlas de energia elétrica do Brasil: Edição*. ANEEL. Recuperado de <https://biblioteca.aneel.gov.br/Resultado/Listar?guid=1697320171191>

Amaral, R. C. (2020). Substituição do cimento Portland por cinza volante proveniente da combustão de eucalipto *citriodora* sob diferentes beneficiamentos em concreto convencional. (Dissertação de mestrado). *Fundação Universidade Regional de Blumenau*, Blumenau, SC.

Barbetta, P. A., Reis, M. M., & Bornia, A. C. (2024). *Estatística: Para cursos de engenharia, computação e ciência de dados*. Rio de Janeiro, RJ: LTC.

Couto, A. F. (2018). *Cinza de madeira de eucalipto como adição mineral em argamassas de cimento Portland*. (Dissertação de mestrado). *Universidade Estadual de Londrina*, Londrina, PR.

Cunha, D. M. F. da. (2017). *Betões eco eficientes com incorporação de cinzas de biomassa*. (Dissertação de Mestrado). *Universidade do Minho*, Braga, Portugal.

Empresa de Pesquisa Energética. (2022). *Atlas de eficiência energética do Brasil 2022: Relatório de Indicadores*. Recuperado de <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/atlas-da-eficiencia-energetica-brasil/>

Empresa de Pesquisa Energética. (2023). *Balanço Energético Nacional: Relatório síntese 2023*.

Recuperado de <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben/>

Indústria Brasileira de Árvores. (2022). *Relatório Anual de 2022*. Recuperado de <https://iba.org/publicacoes/relatorios/>

Marafon, A. C., Santiago, A. D., Amaral, A. F. C., Bierhals, A. N., Paiva, H. L., & Guimarães, V. dos S. (2016). Uso da biomassa para a geração de energia. Aracaju, *Embrapa Tabuleiros Costeiros*. <http://www.bdpa.cnptia.embrapa.br/consulta/busca?b=ad&id=1063559&biblioteca=vazio&busca=1063559&qFacets=1063559&sort=&paginacao=t&paginaAtual=1>

Misra, M. K., Ragland, K. W., & Baker, A. J. (1993). Wood ash composition as a function of furnace temperature. *Biomass and Bioenergy*, volume 4, 103-116.

Poizot, P. & Dolhem, F. (2011). Clean energy new deal for a sustainable world: From non-CO₂ generating energy sources to greener electrochemical storage devices. *Energy & Environmental Science*, 4(6), 2003-2019. <https://doi.org/10.1039/C0EE00731E>

Ramos, A., Berzosa, J., Espí, J., Clarens, F., & Rouboa, A. (2020). Life cycle costing for plasma gasification of municipal solid waste: A socio-economic approach. *Energy Conversion and Management*, 209, 112508. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112508>

Rao, Y. V. C. (2003). *An introduction to thermodynamics* (2ª ed.). *Universities Press*.