

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DE MINAS GERAIS - *CAMPUS* SÃO JOÃO EVANGELISTA
BACHARELADO EM ENGENHARIA FLORESTAL

Eliene Morais Afonso

**CARACTERIZAÇÃO DE CARVÃO VEGETAL PRODUZIDO EM DIFERENTES
TIPOS DE FORNOS**

São João Evangelista

2025

ELIENE MORAIS AFONSO

**CARACTERIZAÇÃO DE CARVÃO VEGETAL PRODUZIDO EM DIFERENTES
TIPOS DE FORNOS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Curso de Bacharelado em Engenharia Florestal
do Instituto Federal de Minas Gerais –
Campus São João Evangelista para obtenção
do grau de bacharel em Engenharia Florestal.

Orientadora: Dr. Caroline Junqueira Sartori.

São João Evangelista

2025

A257c Afonso, Eliene Moraes.

Caracterização de Carvão vegetal produzido em diferentes tipos de fornos/ Eliene Moraes Afonso – 2026.

30f.

Orientador: Dra. Caroline Junqueira Sartori.

Trabalho de Conclusão de Curso (bacharelado em Engenharia Florestal) – Instituto Federal Minas Gerais. *Campus* São João Evangelista, 2026.

1. RAC 110. 2. RAC 220. 3. Carvão siderúrgico no norte de Minas. I. Afonso, Eliene Moraes. II. Instituto Federal de Minas Gerais *Campus* SJE. III. Título.

CDD 6362.74

Catálogo: Esther Soares Cunha - CRB-6/4333

Eliene Moraes Afonso

CARACTERIZAÇÃO DE CARVÃO VEGETAL PRODUZIDO EM DIFERENTES TIPOS DE FORNOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso Bacharelado em Engenharia Florestal do Instituto Federal de Minas Gerais – *Campus* São João Evangelista, para obtenção do grau de bacharel em Engenharia Florestal.

Aprovado em: 03/12/2025 pela banca examinadora.



Documento assinado digitalmente
CAROLINE JUNQUEIRA SARTORI
Data: 11/02/2026 11:34:27-0300
Verifique em <https://validar.ifmg.gov.br>

Prof. Dr. Caroline Junqueira Sartori. (IFMG - Orientadora)



Documento assinado digitalmente
BRUNO OLIVEIRA LAFETA
Data: 11/02/2026 11:38:46-0300
Verifique em <https://validar.ifmg.gov.br>

Prof. Dr. Bruno Oliveira Lafetá – IFMG



Documento assinado digitalmente
MAIRA REIS DE ASSIS
Data: 14/02/2026 08:34:49-0300
Verifique em <https://validar.ifmg.gov.br>

Prof. Dr. Máira Reis de Assis - UFLA

Dedico este trabalho a Deus, pela força, sabedoria e proteção que me guiaram ao decorrer desta jornada. Aos meus familiares, por sempre acreditarem em mim, e me darem a base necessária para seguir em frente, mesmo nos momentos mais difíceis. Aos professores, que com seu conhecimento e orientação, ajudaram a moldar meu percurso acadêmico. A todos que caminharam comigo durante esta trajetória – nos dias bons e especialmente nos difíceis. Este trabalho é resultado de muito mais do que estudo, é feito de esforço, resiliência e apoio mútuo.

AGRADECIMENTOS

A conclusão deste trabalho representa não apenas o fim de uma etapa acadêmica, mas também a superação de muitos desafios pessoais, profissionais e emocionais. Por isso, é com gratidão que registro aqui meus sinceros agradecimentos.

Agradeço à minha família, por todo apoio, incentivo e compreensão ao longo da graduação. Cada gesto, palavra e presença fez diferença para que eu chegasse até aqui.

À minha orientadora, Caroline Junqueira Sartori, por sua orientação precisa, paciência e disponibilidade. Sua experiência foi fundamental para o desenvolvimento deste trabalho e para minha formação como futura profissional.

Aos professores do curso, que me transmitiram não apenas conhecimento técnico, mas também valores éticos e senso crítico essenciais à prática científica.

Aos colegas do laboratório, com quem compartilhei não só os desafios das análises químicas do carvão, mas também risadas, dúvidas e descobertas. A troca de experiências foi tão valiosa quanto os próprios resultados.

Aos amigos e colegas de curso, que tornaram o caminho menos solitário e mais leve. A amizade e o companheirismo de vocês foram fundamentais. Cada um de vocês teve um papel importante na construção do conhecimento que me trouxe até aqui.

E, por fim, agradeço a todos que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a realização deste trabalho. Meu muito obrigado!

“Conhecer a composição de um material é
conhecer a história da energia que ele pode gerar.”

— Autor desconhecido

RESUMO

O carvão vegetal é um material energético proveniente do processo de pirólise lenta da madeira, o qual é largamente empregado na siderurgia. Apesar de ser utilizado há longo tempo, o sistema de produção rudimentar e o controle da carbonização de forma empírica, como no acompanhamento da coloração da fumaça, o que, além de outras variáveis, pode resultar em um material bastante heterogêneo. Diante disso, este projeto teve como objetivo, realizar análise química imediata e de análises físicas (densidades e porosidades) e energética de carvão vegetal produzido por pequeno produtor no município de Capelinha-MG. As amostras de carvão vegetal de madeira de *Eucalyptus* sp foram obtidas por meio de doação, provenientes de três tipos de fornos de carbonização: Forno circular, Forno RAC 110 e Forno RAC 220. As propriedades físicas de densidade a granel, densidade aparente, densidade verdadeira e porosidade foram determinadas. Com relação à análise imediata determinou-se a umidade, teor de cinzas, teor de voláteis e carbono fixo. O Poder calorífico superior foi determinado em bomba calorimétrica e estimado com emprego da Equação de Goutal. O estudo analisou o carvão vegetal em três tipos de fornos, encontrando diferenças significativas nos parâmetros avaliados. Os resultados destacaram o carvão do forno circular e do RAC 110, devido ao carbono fixo e menor teor de cinzas, indicando sua utilidade na siderurgia. O carvão do forno circular mostrou maior rendimento em carbono fixo e poder calorífico, tornando-o adequado para processos industriais, especialmente na siderurgia. Isso sugere que o carvão de Capelinha-MG é favorável para uso industrial. Neste trabalho podemos chegar à conclusão que o forno circular apresenta maior teor de carbono fixo e menor teor de voláteis, indicando um carvão mais denso e com maior poder calorífico pela calorimétrica, ideal para aplicações que exigem alta performance.

Palavras-chave: RAC 110. RAC 220. Carvão siderúrgico no norte de Minas.

ABSTRACT

Charcoal is an energy material derived from the slow pyrolysis process of wood and is widely used in the steel industry. Despite its long-term use, the production system is rudimentary and the control of the carbonization process is carried out empirically, such as by monitoring the color of the smoke, which, together with other variables, can result in a highly heterogeneous material. In this context, the objective of this project was to perform proximate chemical analysis, as well as physical (density and porosity) and energy analyses of charcoal produced by a small-scale producer in the municipality of Capelinha, Minas Gerais, Brazil. Charcoal samples made from *Eucalyptus* sp. wood were obtained through donation and originated from three types of carbonization kilns: circular kiln, RAC 110 kiln, and RAC 220 kiln. The physical properties of bulk density, apparent density, true density, and porosity were determined. Regarding proximate analysis, moisture content, ash content, volatile matter, and fixed carbon were determined. The higher heating value was determined using a bomb calorimeter and estimated using the Goutal equation. The study analyzed charcoal produced in three types of kilns and found significant differences in the evaluated parameters. The results highlighted the charcoal from the circular kiln and the RAC 110 kiln due to their higher fixed carbon content and lower ash content, indicating their suitability for use in the steel industry. Charcoal from the circular kiln showed higher fixed carbon yield and higher heating value, making it suitable for industrial processes, especially in steelmaking. This suggests that charcoal from Capelinha, MG, is favorable for industrial use. In this study, it can be concluded that the circular kiln presents a higher fixed carbon content and a lower volatile matter content, indicating a denser charcoal with a higher calorimetric heating value, ideal for applications that require high performance.

Keywords: RAC 110. RAC 220. Metallurgical charcoal in northern Minas Gerais.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 REFERENCIAL TEÓRICO	12
2.1 Histórico do carvão vegetal.....	12
2.2 Importância do Setor em Minas Gerais	12
2.3 Processo de produção do carvão vegetal	13
2.4 Processos tradicionais da produção de carvão vegetal	13
2.5 Fornos de alvenaria	14
2.6 Utilização do carvão vegetal	15
3 MATERIAL E MÉTODOS	16
3.1 Local de estudo e caracterização da biomassa.....	16
3.2 Análises físicas do carvão vegetal.....	16
3.3 Análises química imediata e poder calorífico do carvão vegetal.....	17
3.4 Análise de dados	18
4 RESULTADOS DISCUSSÃO	19
5 CONCLUSÃO.....	25
REFERÊNCIAS	26

1 INTRODUÇÃO

O carvão vegetal é um material obtido pelo processo de carbonização ou pirólise da madeira, o qual é proveniente principalmente de árvores cultivadas, e substitui o carvão mineral, de origem fóssil, o que contribui para a redução na emissão de gases de efeito estufa na siderurgia, por exemplo. Assim, o setor nacional de árvores plantadas mantém uma grande importância econômica, representando em 2024 cerca de 1,3% do PIB Nacional com uma receita bruta aproximadamente de R\$ 260 bilhões. O principal polo de consumo de carvão vegetal, com mais de 40% das empresas e com concentração de aproximadamente 83% da produção nacional, encontra-se no Estado de Minas Gerais (IBÁ, 2024).

A produção de carvão vegetal é uma atividade econômica importante em Minas Gerais e em muitas outras regiões do país. Além de ser uma fonte de energia renovável, a produção de carvão vegetal é uma importante fonte de renda para pequenos produtores rurais que têm na atividade uma fonte de subsistência e também resulta na geração de novos empregos.

Dentre as biomassas, o carvão vegetal se destaca como importante fonte para o desenvolvimento sustentável. O carvão vegetal atua como agente redutor do minério de ferro e como fonte energética na indústria siderúrgica de ferro-gusa, aço e ferro-ligas, substituindo o carvão mineral, que já vem sofrendo restrições ecológicas na sua utilização. Além disso o carvão substitui outros combustíveis fósseis, como é o caso do gás natural ou gás liquefeito de petróleo para o preparo de alimentos (LANA, 2018).

Entretanto, a maior parte do carvão vegetal produzido atualmente no Brasil, é proveniente de fornos rudimentares, de alvenaria, de baixo rendimento gravimétrico (DONATO *et al.*, 2020). Normalmente esses fornos não possuem nenhum tipo de mecanização e tampouco instrumentos de medição das variáveis importantes do processo, prejudicando tanto o rendimento quanto à qualidade final do produto. O processo é dependente de seus operadores, pois o controle da carbonização ocorre em acompanhamento da coloração dos gases gerados no processo (OLIVEIRA, 2009).

O processo ocorre com moderado controle das características da madeira, do processo de carbonização e das emissões atmosféricas, tendo como consequência, um produto final com propriedades físicas e químicas variáveis, o que compromete a sua qualidade e produtividade (DONATO, *et al.*, 2020).

De maneira geral, a falta de investimento para o progresso da produção de carvão vegetal pode ser creditada a sua desvalorização como fonte energética, a escassez de políticas públicas efetivas para o setor, aos estigmas advindos das produções mais primitivas e ao baixo valor agregado do carvão vegetal, sensível demais as intempéries do mercado nacional e global. Estes fatos acabam por desestabilizar economicamente o setor, suprimindo a constância de propósito para o desenvolvimento e melhoria das tecnologias (LANA *et al.* 2018) e como consequência melhorias do produto final.

A qualidade do carvão vegetal produzido é importante, pois afeta diretamente a eficiência energética e a qualidade dos produtos finais que utilizam o carvão como fonte de energia. O conhecimento da composição química de carvão é crucial para estimar a qualidade e, assim, determinar sua composição química e ser realizada, entre outros, a análise química imediata. Essa análise determina constituintes como carbono fixo, matéria volátil e cinzas (LANA *et al.*, 2016).

Segundo Carneiro *et al.* (2014), na produção de carvão vegetal, o carbono é convertido em carbono fixo, sendo esse o principal responsável pela energia estocada no carvão. As cinzas são os componentes minerais que sobram da degradação dos constituintes da madeira e da casca, e por sua vez, podem ser prejudiciais no processo siderúrgico de determinados metais (VITAL *et al.*, 1986). O teor de materiais voláteis determina a facilidade de ignição, a estabilidade da chama e a velocidade de combustão. Um alto teor de voláteis facilita a ignição e a combustão (RIBEIRO; VALE, 2006;).

Diante do exposto, este projeto tem como objetivo caracterizar o carvão vegetal produzido em fornos circulares e retangulares RAC 110 e RAC 220, por um produtor rural no município de Capelinha – MG.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Histórico do carvão vegetal

O uso do carvão vegetal tem lastros na antiguidade, sendo um dos primeiros materiais energéticos produzidos pelo homem. Registros arqueológicos indicam que civilizações antigas, como os egípcios, já utilizavam o carvão vegetal por volta de 3.700 a.C., tanto para fundição de metais quanto para fins medicinais e de conservação (OLIVEIRA *et al.*, 2018). Durante a Idade Média, sua utilização expandiu-se na Europa, tornando-se essencial para a metalurgia do ferro e para o aquecimento doméstico (COELHO *et al.*, 2020).

No Brasil, o carvão vegetal começou a ser produzido em maior escala no período colonial, associado à necessidade de obtenção de energia para engenhos e fundições (BRITO; BARRICHELO, 1977). Com o desenvolvimento da siderurgia nacional no século XX, o carvão vegetal consolidou-se como um sucessor do principal redutor (coque) na produção de ferro-gusa, especialmente devido à abundância de florestas e à preocupação crescente com alternativas ao coque mineral (VALE *et al.*, 2011).

Nas últimas décadas, a produção de carvão vegetal passou por transformações significativas, com o avanço de tecnologias mais limpas e o uso de florestas plantadas de eucalipto para minimizar impactos ambientais (NOVOTNY *et al.*, 2015). Além de seu papel energético, o carvão vegetal passou a ser valorizado também por suas aplicações ambientais e agrícolas, como o uso do *biochar* na melhoria da fertilidade do solo e na mitigação de gases de efeito estufa (LEHMANN; JOSEPH, 2015).

2.2 Importância do Setor em Minas Gerais

O carvão vegetal em Minas Gerais ocupa posição estratégica na matriz energética nacional, pela destacada contribuição do estado no pólo siderúrgico e metalúrgico para a produção de ferro, aço e ligas metálicas. Por quase 500 anos o Brasil utilizou lenha como fonte de energia, e em 1941, a madeira respondia por aproximadamente 75% do total da energia consumida. Mesmo havendo um decréscimo da participação da madeira na matriz energética, em termos quantitativos, o consumo tem aumentado, mostrando que existe um mercado cativo para a utilização da biomassa como fonte de energia. O Brasil possui a melhor tecnologia silvicultural e é referência no mundo para implantação, manejo e exploração de

florestas plantadas. O Estado de Minas Gerais, além de possuir a maior área de florestas plantadas, é também o maior consumidor de carvão vegetal do Brasil, concentrado nos seus pólos consumidores espalhados em todo estado (REZENDE *et al.* 2010).

Em 2023, o Brasil produziu aproximadamente 6,77 milhões de toneladas de carvão vegetal advindo da silvicultura. No mesmo ano, Minas Gerais concentrou cerca de 88,1% desse volume, evidenciando sua quase-hegemonia no setor (MORAES *et al.* 2024).

Em 2024, o valor de produção da silvicultura em Minas Gerais atingiu R\$ 8,5 bilhões, o que corresponde a aproximadamente 22,8% do valor nacional. Ademais, o estado produziu cerca de 83,3% do volume nacional de carvão vegetal utilizados como insumo siderúrgico. A área de florestas plantadas no estado atingiu cerca de 2,2 milhões de hectares, das quais quase 97,2% são de eucalipto — fato que reforça a explicação para a dominância mineira no setor (MORAES *et al.* 2025).

2.3 Processo de produção do carvão vegetal

O processo de produção de carvão vegetal, na maioria das empresas, é o mesmo que o de três mil anos atrás, em que consome parte da madeira como combustível a fim de fornecer a energia necessária para a carbonização do restante da madeira. Os pequenos produtores de carvão vegetal, normalmente utilizam fornos construídos de alvenaria revestidos com barro. Esses fornos normalmente são feitos em barrancos ou na terra e não possuem formatos padronizados. Suas formas e tamanhos distinguem de uns para outros, fazendo com que o processo seja muito irregular e que seja dependente de forma direta de seus operadores. Também é normal que nesses fornos não haja nenhum tipo de mecanização e tampouco instrumentos de medição das variáveis importantes no processo, prejudicando o rendimento quanto à qualidade final do produto (OLIVEIRA *et al.* 2009).

2.4 Processos tradicionais da produção de carvão vegetal

A produção de carvão vegetal no Brasil é destinada ao atendimento da demanda de diversos segmentos da indústria (siderurgia, metalurgia, cimento, etc.), bem como para utilização residencial urbana e rural. A principal utilização, no entanto, se faz ver na indústria de siderurgia (BRITO *et al.* 1990). Dessa forma, com o crescente aumento do consumo do carvão vegetal impulsionado principalmente por parte do setor industrial (MME, 2008), a evolução do processo de carbonização é inevitável.

2.5 Fornos de alvenaria

No Brasil, o sistema principal da produção de carvão vegetal é constituído de fornos de alvenaria e argila, comumente chamados de fornos meia-laranja ou rabo quente. Onde tais fornos ainda são conhecidos como fornos de superfície, quando o terreno é plano, ou fornos de encosta, quando estes são construídos em regiões de relevo acidentado e podendo carbonizar diferentes volumes de lenha, normalmente na faixa de 6 a 20 estéreos (quantidade de lenha que pode ser empilhada ordenadamente em um metro cúbico) (BRITO *et al.* 1990).

Um salto na evolução da produção de carvão vegetal veio na década de 90 com a construção de um forno retangular de alvenaria. Este forno de 40 m³ foi equipado com uma grande porta metálica, denominado RAC 40 (R=Retangular, AC=Acesita, Capacidade=40m³), o que permitiu iniciar o processo mecanização durante a maior parte da fase de carregamento e de descarregamento. No final dos anos 90, foi realizada uma melhoria em cima do já existente RAC 40. Este forno passou a ter um maior volume, 110 m³ (RAC 110) e possibilitou mecanizar o processo de carregamento da madeira e a descarga do carvão. Este forno foi o primeiro a utilizar uma proteção por estrutura metálica e a apresentar inovações que proporcionaram o conceito de campanha de 20 anos do forno retangular. Posteriormente, veio o RAC 220 que inovou ao possuir duas portas e, mais recentemente o RAC 700 com capacidade para 1000 m³ de madeira (OLIVEIRA *et al.* 2009).

Os fornos retangulares foram desenvolvidos para atender produções maiores, com maior mecanização, maiores volumes internos, carregamento de toras mais longas e menor número de ciclos por produção anual. O modelo RAC 110 representa um forno retangular com volume menor (110 m³) e o RAC 220 com aproximadamente o dobro ou mais do volume (220 m³ ou similar). Um estudo relata que o RAC 220 possui dimensões de 26 m de comprimento × 4,0 m de largura × 4,2 m de altura (CARVALHO, 2012).

Enquanto o forno circular que também poderá ser denominado forno de superfície ou cilíndrico consiste em uma câmara de alvenaria ou metálica com formato predominantemente circular ou cilíndrico, na qual a madeira é carregada, e então iniciada a queima/pirólise e depois o carvão é retirado (DAMÁSIO, 2015).

Um dos métodos par poder ser feita a escolha entre forno circular ou retangular (RAC 110/RAC 220) deve considerar: volume de produção desejado, disponibilidade de toras e dimensões da madeira, capital disponível para investimento, logística de carga/descarga,

mão-de-obra, controle operacional e requisitos de qualidade do carvão principalmente quando o uso é voltado para a siderurgia (CARVALHO, 2012).

2.6 Utilização do carvão vegetal

A produção de carvão vegetal, no Brasil, é destinada ao atendimento da demanda de diversos segmentos da indústria (siderurgia, metalurgia, cimento, etc.), bem como para utilização residencial urbana e rural. A principal utilização, no entanto, se faz ver na indústria de siderurgia (BRITO, 1990).

O carvão vegetal é um produto obtido pela carbonização da madeira ou de resíduos vegetais, sendo amplamente utilizado em diferentes setores econômicos. Na indústria, destaca-se como importante fonte de energia e como redutor na siderurgia, especialmente na produção de ferro-gusa e aço, representando uma alternativa mais sustentável em comparação ao coque mineral (OLIVEIRA *et al.*, 2018). No campo agrícola, o carvão vegetal pode ser aplicado na forma de *biochar*, melhorando as propriedades físicas e químicas do solo, aumentando a retenção de nutrientes e contribuindo para o sequestro de carbono (LEHMANN; JOSEPH, 2015).

Além disso, o carvão vegetal serve de matéria-prima para a produção de carvão ativado, empregado em sistemas de purificação de água, tratamento de efluentes e em processos de adsorção de poluentes (MARQUES *et al.*, 2018). Também é utilizado em aplicações médicas e cosméticas, devido à sua capacidade de adsorver toxinas e impurezas (SILVA *et al.*, 2021). Assim, o carvão vegetal possui grande relevância ambiental e econômica, sendo um insumo versátil em diversos segmentos produtivos.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Local de estudo e caracterização da biomassa

O carvão vegetal utilizado neste estudo é proveniente do município de Capelinha localizado no alto Vale do Jequitinhonha, nordeste de Minas Gerais, nas nascentes do Rio Fanado, afluente do Rio Araçuaí. Sua sede municipal situa-se nas coordenadas 17°45'18" de latitude sul e 42°28'15" de longitude pelo Meridiano de Greenwich, numa altitude de 840 metros, a 286 Km em linha reta de Belo Horizonte, dados segundo a Prefeitura de Capelinha.

Para a realização da pesquisa, foram obtidos cerca de 2000 g carvões vegetais provenientes de madeiras de *Eucalyptus* sp. de sistema de carbonização do tipo de superfície, circular (4 metros de diâmetro) e fornos retangulares RAC 110 (com duas câmaras de combustão externas) e RAC 220 (com três câmaras de combustão externas), de uma empresa no município de Capelinha, MG.

3.2 Análises físicas do carvão vegetal

Foi determinada a densidade a granel do carvão vegetal com emprego de uma caixa de aproximadamente 3000 cm³, onde a mesma foi preenchida de carvão, determinando-se a massa em uma balança de precisão. A densidade a granel (g/cm³) foi obtida com a relação entre a massa de carvão contida na caixa e seu volume.

Para a determinação da Densidade Relativa Aparente anidra (DRA) foi utilizada como base a norma NBR 9165 (ABNT, 1985). Foram utilizadas amostras do carvão vegetal, as quais foram secas em estufa com circulação forçada de ar a 102±3°C, e em balança de precisão foi determinada a massa anidra (M0%). O volume das amostras do carvão vegetal foi determinado através do método de imersão. Para evitar que as amostras absorvessem água, as mesmas foram enroladas em um filme de PVC, e por imersão foi determinado o volume anidro (V0%). A densidade aparente foi determinada conforme Equação 1.

$$DRA = \frac{M0\%}{V0\%} \quad (1)$$

A densidade verdadeira foi obtida de acordo com a NBR 9165 (ABNT, 1985). Para determinar a densidade relativa verdadeira (Drv), as amostras do carvão foram trituradas em um moinho de facas do tipo Willey. Após a trituração essas amostras foram peneiradas em uma peneira granulométrica redonda de aço inoxidável, nas escalas de 200 – 270 mesh.

Em seguida, foram preparados cinco picnômetros de capacidade de 50 mL, cada um foi preenchido com água até a sua borda e pesados em balança analítica de precisão (Ppa). Os picnômetros foram lavados e secados, preenchidos com 1g de carvão vegetal moído e seco (Pcs). Os picnômetros contendo as amostras de carvão foram preenchidos até a metade com água e foram levados a uma chapa de aquecimento no qual permaneceram por duas horas a 100°C.

Posteriormente, os picnômetros contendo as amostras de carvão e água após esfriar, tiveram os volumes completados com água, e foram pesados em balança analítica de precisão (Ppca). A densidade relativa verdadeira (Drv), foi determinada conforme Equação 2.

$$Drv = \frac{Pcs}{(Pcs - (Ppca - Ppa))} \quad (2)$$

A porosidade foi calculada a partir dos dados das densidades aparente e verdadeira, com auxílio da Equação 3.

$$Porosidade = \left(1 - \frac{Dap}{Drv}\right) * 100 \quad (3)$$

3.3 Análises química imediata e poder calorífico do carvão vegetal

Para as análises de poder calorífico, análises químicas imediatas, de umidade, teor de materiais voláteis, teor de carbono fixo e cinzas as amostras foram moídas em moinho Wiley, e passadas em peneiras de 40 e 60 mesh, e utilizadas as amostras retidas na peneira de 60 mesh.

Em relação ao poder calorífico superior, foi realizado de acordo com a NBR 8633 (ABNT, 1984), em bomba calorimétrica, IKA C200, com amostras previamente secas em estufa.

O Poder Calorífico Superior (PCS) foi também estimado de acordo com a Equação de Goutal (SATER et al., 2011) (Equação 4), utilizando-se os valores de carbono Fixo (CF%), Materiais Voláteis (V%) e o coeficiente A dado pela relação $V/(V+CF)$.

$$PCS = (82 * CF + A * V) \quad (4)$$

Para a determinação da umidade dos carvões, foram utilizados cerca de 1,0 g do carvão moído, em balança de precisão de 0,0001g, em cadinhos de porcelana previamente secos e tarados. Os cadinhos com carvão foram levados à estufa regulada a 102 ± 3 °C, por um período de 2 horas. Logo após, foram retirados da estufa e armazenados em dessecador

por cerca de 20 minutos para esfriar, e pesados para a determinação da umidade em base úmida.

Para a determinação dos materiais voláteis (TMV), utilizou-se o material (particulado e seco na determinação da umidade - M_s). Assim levados a mufla previamente aquecida e estabilizada a 950°C. Primeiramente os cadinhos, tampados, foram colocados na extremidade externa da mufla sobre a porta, onde ficou por dois minutos. Posteriormente foram colocados na entrada da mufla ainda com a porta aberta por mais três minutos, para que os mesmos passassem por um pré-aquecimento. Feito isso, estes foram colocados no interior da mufla por seis minutos, com a porta fechada. Após esse período os cadinhos tampados foram retirados da mufla, e passaram-se para o dessecador por aproximadamente 30 minutos para esfriar a temperatura ambiente. Depois de esfriados, os materiais foram pesados, obtendo-se então a massa de material seco sem a presença de materiais voláteis (M_{sv}). O teor de materiais voláteis do carvão vegetal foi calculado pela Equação 5:

$$TMV = \frac{M_s - M_{sv}}{M_s} * 100 \quad (5)$$

Para a determinação do teor de cinzas (TCz), o material da análise anterior foi levado novamente a mufla para incineração total à temperatura de 750°C por 6 horas, sem a tampa do cadinho. Terminada a incineração, armazenou-se em dessecador por aproximadamente 30 minutos para posterior pesagem e obtenção da massa residual inorgânica (M_r). O teor de cinzas do carvão vegetal foi calculado pela Equação 6:

$$TCz = \frac{M_r}{M_s} * 100 \quad (6)$$

A determinação do teor de carbono fixo (TCF) é uma medida indireta, obtida através do cálculo da Equação (7) utilizando os parâmetros previamente determinados.

$$TCF = 100 - (TMV + TCz) \% \quad (7)$$

3.4 Análise de dados

Os testes foram submetidos ao teste de Kruskal-Wallis, post hoc Bonferroni, ambos ao nível de significância de 5% de probabilidade. Todas as análises estatísticas foram efetuadas com auxílio do software R (R CORE TEAM, 2025)

4 RESULTADOS DISCUSSÃO

Os resultados obtidos das amostras analisadas com médias e respectivos desvios padrão (entre parênteses) de densidade a granel, densidade relativa aparente anidra e a densidade relativa verdadeira estão apresentados na tabela 1.

Tabela 1- Valores medios de densidade a granel (DA), densidade relativa aparente anidra (Dap) e densidade relativa verdadeira (Drv) e Porosidade (Po) das amostras de carvão vegetal de madeira de *Eucalyptus* sp nos diferentes fornos.

Tratamentos	Da (g/cm ³)	Dap (g/cm ³)	Drv (g/cm ³)	Po (%)
Forno circular	0,202 a	0,424 a	1,542 a	72,12 ab
RAC 110	0,206 a	0,397 ab	1,437 a	70,76 b
RAC 220	0,175 a	0,295 b	1,511 a	80,45 a

Medianas seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Kruskal-Wallis (pós-teste de Bonferroni), a 5% de significância.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

De acordo com a Tabela 1 verifica-se que a densidade a granel teve medianas de 0,202; 0,206 e 0,1 g/cm³, sendo os tratamentos iguais entre si pelo teste de Kruskal-Wallis a 5% de significância. A densidade aumenta a medida que diminui o tamanho da partícula, este fato ocorre devido aos espaços vazios entre essas partículas serem menores, sendo que quanto maior a densidade a granel, maior a massa que pode ser transportada ou armazenada num recipiente de volume fixo (KUMAR *et al.*, 2020). E de acordo com este estudo a amostra referente ao forno retangular RAC 110 apresentou a maior densidade a granel, porém não foram verificadas diferenças estatísticas entre os fornos.

Já a densidade relativa aparente anidra teve medianas de 0,424; 0,397 e 0,295 g/cm³, sendo estes valores iguais estatisticamente entre os fornos circular e RAC 110 e RAC 110 e RAC 220. A densidade relativa real obteve-se medianas de 1,542; 1,437 e 1,511 g/cm³ sendo os tratamentos iguais entre si pelo teste de Kruskal-Wallis a 5% de significância.

Para a produção do carvão vegetal o diâmetro das peças a serem carbonizadas é um aspecto importante a ser considerado, vale ponderar que peças de dimensões similares devem se carbonizadas em conjunto, ao modo que peças de madeira de diâmetros muito elevados não são interessantes para a carbonização, o que resulta numa produção com elevado teor de cinzas e finos. Donato *et al.* (2020) que buscava analisar a influência do diâmetro da madeira de eucalipto na produtividade e propriedades do carvão vegetal, obteve valores médios de densidade a granel de 0,156 g/cm³, o que corrobora com os resultados encontrados.

Da mesma maneira que assegura Brito (1982), que encontrou valores com variação de densidade a granel do *Eucalyptus* spp, de 0,18 g/cm³ a 0,19 g/m³.

Em estudo realizado por Pereira et al. (2016), no qual utilizaram um forno elétrico tipo mufla, verificou uma densidade relativa aparente do carvão de *Eucalyptus* sp média entre 0,361 g/cm³ e 0,405 g/cm³, valores estes dentro do intervalo encontrado nesta pesquisa, exceto a densidade aparente do carvão vegetal produzido no forno RAC 220, em que o valor foi inferior, de 0,295 g/cm³.

Em estudo realizado por Brito (1982), com três espécies *Eucalyptus*, em que a carbonização foi conduzida em um forno metálico de volume nominal de 13m³, demonstrou-se densidade aparente dos carvões com médias variando entre 0,242 g/cm³ e 0,317 g/cm³; no mesmo estudo, o autor obteve densidade a granel do carvão variando entre 0,186 g/cm³ e 0,195 g/cm³, valores estes compatíveis ao verificado nesse estudo.

Segundo Assis (2008), a porosidade é a medida de espaço vazio (poros) em um material, sendo uma característica singular do carvão vegetal influenciando na densidade, higroscopicidade e reatividade. A molhabilidade (ângulo entre a cavidade do poro da partícula e gás) depende da porosidade, ou seja, maior molhabilidade, maior contato sólido e gases, ajudando, assim, a troca de calor entre gases-partícula e a cinética de combustão da partícula (reatividade). Assim diante os resultados as amostras do forno 3 foi o que apresentou uma maior porosidade, e apresentou também uma menor densidade aparente a granel.

Os valores médios da análise química imediata, bem como umidade estão apresentados na tabela 2.

Tabela 2 – Valores médios de umidade em base úmida, voláteis, cinzas e carbono fixo do carvão vegetal de madeira *Eucalyptus* sp, nos diferentes tipos de fornos.

Tratamentos	U		Vol (MV)		Cz		TCF	
Forno circular	3,92	c	17,29	c	0,62	B	83,09	a
RAC 110	5,01	a	24,49	b	0,41	C	74,84	b
RAC 220	4,78	b	25,25	a	0,74	A	74,00	c

Medianas seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Kruskal-Wallis (pós-teste de Bonferroni), a 5% de significância.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Conforme Tabela 2, verifica-se que a umidade mediana dos carvões vegetais foram de 3,92; 5,01 e 4,78%. O teor de voláteis foi de 17,29; 24,49 e 25,25 %. O teor de cinzas foi de 0,62; 0,41 e 0,74%. Já o teor de carbono fixo verificado foi de 83,09; 74,84 e 74,00%. Nota-se que para todas as características analisadas verificou-se diferença estatística significativa entre os fornos de carbonização.

O valor médio da umidade neste trabalho foi inferior àquele encontrado por Brand *et al.* (2015), que determinaram o valor de 7,35% para amostras de carvão vegetal para uso doméstico na região Serrana Sul de Santa Catarina, classificando-o como alto. Já Oliveira *et al.* (2015) encontraram o teor de umidade entre 4,02 e 7,77% para carvão vegetal de municípios da região Oeste do Paraná. Verificando-se o teor mediano de umidade neste trabalho observou-se que apenas o forno RAC 110 está acima do estabelecido pelo Selo Premium (SÃO PAULO, 2003), que estabelece valores abaixo de 5,0%.

Dentre as características mais importantes relacionadas com a qualidade do carvão vegetal para uso siderúrgico, está a umidade. O carvão é considerado um produto higroscópico, podendo absorver em poucas horas de 4 a 16% de seu peso em água (carvão recém-produzido) (MORAIS *et al.* 2005) e, particularmente, para os sistemas de injeção, levando à indução do entupimento dos vasos de transporte de carvão pulverizado para as ventaneiras. Seu teor no carvão vegetal deve ser o mais reduzido possível para o uso siderúrgico, pois quanto mais elevado o teor de umidade, mais calor dos gases será necessário para a evaporação da água. Segundo dados publicados pela Aperam Bioenergia, a umidade média do carvão vegetal produzido no mês de fevereiro de 2018 foi de 6,66% (Aperam Bioenergia 2018), sendo verificado nesse estudo para todos os fornos, valores inferiores a este. Diante disso podemos observar que os fatores que influenciam a absorção de água pelo carvão vegetal, podem ser a porosidade, pois quanto mais poroso seja o carvão, maior será a área interna para adsorver água e outras possíveis substâncias. Tem também a granulometria, pois as partículas de carvão menores ou mais finas podem oferecer uma área superficial maior, o que aumenta a retenção de água. Essa alta incidência de umidade pode afetar diretamente no poder calorífico, a eficiência de combustão, carbono fixo e a densidade a granel.

Na siderurgia pode-se observar alguns fatores possam influenciar tanto no aumento quanto na diminuição do teor de voláteis, como por exemplo o caso da temperatura final de carbonização, sendo ela considerada o maior fator. Pois assim quanto maior for a temperatura final de carbonização, menor será o teor de materiais voláteis, e também as carbonizações feitas com baixas temperaturas acarreta em um carvão com maior teor de voláteis, o que geralmente pode ser indesejável na siderurgia, pois diminui o carbono fixo e o poder calorífico.

Apesar do material volátil também possuir carbono, a sua fração no carvão vegetal é inferior ao carbono fixo. Comparando-se com um trabalho de Arruda *et al.* (2011) encontraram valor médio de materiais voláteis igual a 22,7%, enquanto Oliveira *et al.* (2020)

encontraram valor médio igual a 24,4% ao caracterizarem as propriedades do carvão vegetal de eucalipto produzido em fornos retangulares industriais, valores estes superiores ao verificado nesse estudo para o forno circular, que foi de 17,29%.

O carbono fixo representa a fração do carvão que queima no estado sólido e promove um aumento da estabilidade e resistência térmica do combustível. Logo, visando à maior durabilidade da combustão nas caldeiras e fornalhas dos combustíveis utilizados como fonte de bioenergia, deve-se priorizar aqueles com maiores quantidades de carbono fixo e menores de materiais voláteis (NOGUEIRA; LORA, 2003; BRAND, 2010).

Conforme Ribeiro e Vale, 2006, para que o carvão vegetal possa ser considerado de boa qualidade para o uso doméstico, deve reunir algumas características como: alta densidade relativa aparente; alto teor de carbono fixo; alto poder calorífico; baixa umidade; baixo teor de materiais voláteis e baixo teor de cinzas. Para o teor de cinzas, todos os carvões vegetais analisados nesse estudo, atendem à especificação estabelecidas pela norma PMQ 3 – 03 (São Paulo, 2003) para o uso siderúrgico e doméstico, pois são inferiores a 1,5%. Já para teor de carbono fixo, somente o carvão vegetal produzido no Forno circular atendem o mínimo estabelecido pela norma, que exige valores superiores a 75%.

Sendo também, que os altos teores de cinzas no carvão podem torná-lo inviável para a utilização do mesmo (SANTOS, 2008). O carvão com baixo teor de cinzas podem conferir boas características energéticas já com alto teor de cinzas pode impactar negativamente produtos metalúrgicos (SANTOS, 2008).

Botrel *et al.* (2010), trabalhando com oito clones de eucalipto, encontraram teores de cinzas variando de 0,11 a 0,25%. Neves *et al.* (2012), analisando características energéticas de dois clones desenvolvidos pela empresa Acesita Energética, e um clone desenvolvido pela empresa Plantar Cultivados, em duas localidades de Bom Jardim de Minas, encontraram teores de cinzas da madeira variando de 0,65 a 0,88%. Quanto ao teor de cinzas, menores quantidades também são desejadas no carvão vegetal, pois os minerais não sofrem o processo de combustão e, conseqüentemente, diminuem o valor calórico do combustível (Brand, 2010).

Segundo Protásio *et al.*, (2012), as cinzas também aumentam a corrosão dos equipamentos utilizados na conversão energética, principalmente em sistemas termoquímicos. Geralmente, o carvão vegetal de clones ou espécies de *Eucalyptus* possuem teor de cinzas inferior a 1% (NEVES *et al.*, 2012) assemelhando-se ao observado nesse trabalho.

Quanto maior o teor de carbono fixo maior será o poder calorífico superior do carvão vegetal, uma vez que a entalpia associada ao carbono é que determina o valor calórico dos combustíveis submetidos à pirólise. O carbono fixo representa a fração do carvão que

queima no estado sólido e promove um aumento da estabilidade e resistência térmica do combustível. Logo, visando à maior durabilidade da combustão nas caldeiras e fornalhas dos combustíveis utilizados como fonte de bioenergia, deve-se priorizar aqueles com maiores quantidades de carbono fixo e menores de materiais voláteis (BRAND, 2010). Este comportamento foi verificado neste estudo, pois o carvão vegetal proveniente do forno circular foi o que apresentou maior teor de carbono fixo, que foi de 83,09% (Tabela 2), e resultou em maiores valores de poder calorífico, conforme visto na Tabela 3.

Os valores médios encontrados para o poder calorífico superior determinado em bomba calorimétrica, bem como valor estimado pela Equação de Goutal com as medianas de voláteis e carbono fixo estão apresentados na tabela 3.

Tabela 3 – Poder calorífico superior dos carvões vegetais nos diferentes fornos.

Tratamentos	Poder calorífico (Kcal/Kg)	
	Bomba calorimétrica	Equação de Goutal
Forno circular	7875	8836,3
RAC 110	7531	8806,3
RAC 220	7536	8668,8

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

De acordo com a tabela 3 os valores de poder calorífico encontrado foram de 7875 e 8836,3 Kcal/Kg no Forno Circular; de 7531 e 8806,3 Kcal/Kg no RAC 110 e de 7536 e 8668,8 kcal/Kg no RAC 220 pela bomba calorimétrica e pela equação de Goutal respectivamente. Conforme a tabela 3, pode-se verificar que o poder calorífico do carvão vegetal mostrou uma pequena diferença em relação a bomba calorimétrica e da equação de Goutal, porém nota-se que em ambas determinações, o maior valor foi verificado no Forno circular, que verificou-se maior teor de carbono fixo em sua composição. Mas porém fazendo uma comparação com o trabalho de Soares (2015), onde o autor encontrou valores entre 6.684 e 7.501 kcal/kg onde foi utilizado a norma NBR 8112 da ABNT (1986), o poder calorífico encontrado neste estudo foi superior nas duas análises.

O poder calorífico é dado pela quantidade de energia que é liberada quando o material é queimado com adição de ar. Visto isso, o calor obtido durante a queima de diferentes espécies florestais ou resíduos madeiros pode variar dependendo de suas propriedades físicas, químicas e biológicas. (VAN LOO; KOPPEJAN, 2008) divide-se o Poder Calorífico em Superior e Inferior. O Poder Calorífico Superior – PCS é a quantidade de energia liberada pela combustão completa do combustível. Para o PCS a água formada

durante o processo de combustão é condensada, recuperando o calor derivado da condensação. Essa quantidade de calor liberado durante a condensação do vapor de água e aquecimento dos produtos da combustão é considerado até 25°C. A melhor condição de queima, ou seja, a ideal é quando o material encontra-se completamente seco, porém na maior parte dos processos de combustão o material não é seco anteriormente pelos custos elevados para secagem. (VAN LOO; KOPPEJAN, 2008).

Perante todo esse conhecimento, conclui-se que o poder calorífico é fundamental na indústria por ser importante no processo de produção, pois influencia diretamente na eficiência e no custo dos processos que envolvem a queima de combustíveis. Na geração de energia, seja por meio de termelétricas ou outras fontes, o poder calorífico dos combustíveis determina a quantidade de energia elétrica que pode ser gerada a partir deles.

A caracterização do carvão vegetal produzido em diferentes tipos de fornos (circular, RAC 110 e RAC 220) no município de Capelinha – MG, permitiu avaliar como as condições de carbonização influenciam diretamente nas propriedades físicas, químicas e energéticas do produto final. De modo geral, observou-se que o carvão proveniente do forno circular apresentou os melhores resultados, destacando-se por possuir maior teor de carbono fixo (83,09%), menor teor de materiais voláteis e cinzas, além do maior poder calorífico superior, evidenciando sua melhor qualidade energética.

As diferenças encontradas entre os fornos refletem a influência do tipo de equipamento, do controle de temperatura e das condições operacionais sobre o rendimento e a qualidade do carvão vegetal. O carvão produzido pelo forno RAC 220, apresentou maior porosidade, menores densidades e teores de carbono fixo, o que o torna menos eficiente para usos siderúrgicos. Já o forno circular demonstrou ser mais adequado para a produção de carvão com características desejáveis para aplicações industriais e energéticas, como maior estabilidade térmica e maior eficiência na combustão.

Os resultados podem reforçar que mesmo diante muitos avanços tecnológicos a utilização dos fornos rudimentares ainda possuem uma grande importância, especialmente entre pequenos produtores. A modernização dos fornos e a adoção de práticas de controle de processo são fundamentais para aumentar a competitividade do setor e promover a sustentabilidade da cadeia produtiva do carvão vegetal em Minas Gerais e no Brasil.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho podemos chegar á conclusão que o forno circular apresenta maior teor de carbono fixo e menor teor de voláteis, indicando um carvão mais denso e com maior poder calorifico pela calorimétrica, ideal para aplicações que exigem alta performance.

REFERÊNCIAS

- Aperam BioEnergia: **Qualidade em ação**. 6ª edição [CITED 2018] Available from: Disponível em: https://aperambioenergia.com.br/wpcontent/uploads/2018/02/qualidadeemacao_6_fev2018_v1.pdf. Acesso em: 06 nov. 2025.
- ASSIS, C. F. C. de. **Caracterização de carvão vegetal para a sua injeção em altos-fornos a carvão vegetal de pequeno porte**. 2008. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2008. Disponível em: <https://www.repositorio.ufop.br/items/81490340-e9fb-482c-a638-82474f436ec1>. Acesso em: 18 jun. 2025.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 9165**: determinação da densidade relativa aparente, relativa verdadeira e porosidade. Rio de Janeiro: ABNT, 1985. 8p. Disponível em: <https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/3772/abnt-nbr9165-carvao-vegetal-determinacao-da-densidade-relativa-aparente-relativa-verdadeira-e-porosidade>. Acesso em: 14 abr. 2024.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 8633**: carvão vegetal - determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro, 1984. 13p. Disponível em: <https://www.scienceopen.com/document?vid=aa174383-b6e3-426a-990c-90640377e921>. Acesso em: 14 abr. 2024.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. – ABNT. **NBR 8112**: carvão vegetal: análise imediata. Rio de Janeiro, 1986. 8 p. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/910393294/NBR8112-Analise-Imedita-Carvao-Vegetal-1>. Acesso em: 14 abr. 2024.
- ARRUDA, T. P. M.; PIMENTA, A. S.; VITAL, B. R.; LUCIA, R. M. D.; ACOSTA, F. C. Avaliação de duas rotinas de carbonização em fornos retangulares. 2011. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 35, n. 4, p. 949-955, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622011000500020>. Acesso em: 06 nov. 2025.
- BRITO, José O. *et al.* **Estimativa da densidade a granel do carvão vegetal partir de sua densidade aparente**. Piracicaba: IPEF, 1982. Disponível em: <https://www.ipef.br/publicacoes/ctecnica/nr150.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2025.
- BRITO, José Otávio. **Carvão vegetal no Brasil**: gestões econômicas e ambientais. Estudos avançados, v. 4, p. 221-227, 1990. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ea/a/YcDzd6q3pswcyzxFwJyNLfq/?format=html&lang=pt>. Acesso em: 20 nov. 2025.
- BOTREL, M. C. G.; TRUGILHO, P. F.; ROSADO, S.C.S.; MOREIRA DE SILVA, J.R. - Seleção de clones de Eucalyptus para biomassa florestal e qualidade da madeira. **Scientias Forestales**, v. 38, n. 86, p. 237-245, 2010. Disponível em: <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr86/cap11.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2025.

BRAND, M. A. **Energia de biomassa florestal**. Rio de Janeiro: Interciência, 2010. 131p. Disponível em: <https://www.editorainterciencia.com.br/index.asp?pg=prodDetalhado.asp&idprod=79&token>. Acesso em: 20 set. 2025.

BRAND M. A., RODRIGUES. A. A., OLIVEIRA, A.; MACHADO. M. S., ZEN, L. R. Qualidade do carvão vegetal para o consumo doméstico comercializado na Região Serrana Sul de Santa Catarina. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 39, n. 6, p. 1165-1173, 2015. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rarv/a/zpTfWvNQQZb6jbQCT34835Q/?lang=pt>. Acesso em: 20 set. 2025.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. **A produção de carvão vegetal**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, 1977. Disponível em: <https://mundoflorestal.com.br/arquivos/podercalorifico.pdf>. Acesso em: 22 set. 2025.

CARNEIRO, A. C. O.; CASTRO, A. F. N. M.; CASTRO, R. V. O.; SANTOS, R. C.; 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): 375-381. 2014. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rarv/a/vKWj7XdBGgQwLc6gmSqp4Cb/?lang=pt>. Acesso em: 20 ago. 2025.

CARVALHO, S. R. de; Borges, V. L.; Mulina, B. H. O.; Mota de Oliveira, R. L.; Figueira Júnior, E. A.; Pessoa Filho, J. S. Instrumentação térmica aplicada ao processo de produção de carvão vegetal em fornos de alvenaria – forno retangular RAC220. **Revista Árvore**, 36(4), 2012. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rarv/a/g9WfqbQnJwvdbWKN75GxSkk/?format=html&lang=pt>. Acesso em: 20 ago. 2025.

COELHO, M. M.; NOGUEIRA, L. A. H.; SZKLO, A. Histórico e perspectivas da produção de carvão vegetal no Brasil. **Revista Brasileira de Energia**, v. 26, n. 2, p. 27–42, 2020. Disponível em: <https://sbpe.org.br/index.php/rbe/issue/view/59>. Acesso em: 20 ago. 2025.

DAMÁSIO, Renato Augusto Pereira *et al.* Controle da Carbonização em Forno Circular por Meio da Temperatura Interna. **Revista Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**, v. 6, n. 1, p. 10.12953/2177-6830/rcm.v61p11-22, 2015. Disponível em: <https://periodicos.ufpel.edu.br/index.php/cienciadamadeira/article/view/4197>. Acesso em: 22 set. 2025.

DONATO, Danilo Barros *et al.* Influência do diâmetro da madeira de eucalipto na produtividade e propriedades do carvão vegetal. **Revista Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**, v. 11, n. 2, 2020. Disponível em: <https://periodicos.ufpel.edu.br/index.php/cienciadamadeira/article/view/13573>. Acesso em: 24 set. 2025.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. IBÁ 2024. Brasília, DF, 2024. **Relatório anual 2024**. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios,qrelatorio-iba-2024.pdf>. Acesso em: 06 nov. 2025.

KUMAR, J. A.; KUMAR, K. V.; PETCHIMUTHU, M.; IYAHRAJA, S.; KUMAR, D. Vignesh. **Comparative analysis of briquettes obtained from biomass and charcoal. Materials Today: Proceedings**, p. 1-5, mar. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214785320317089>. Acesso em: 24 set. 2025.

LANA, A. Q.; SALLES, T. T.; CARNEIRO, A. O .C.; CARDOSO, M. T.; TEIXEIRA, R. U. Comparison of procedures for immediate chemical analysis of charcoal. **Revista Árvore**, 40 (2). 2016. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rarv/a/nRtVYkpMvqHKz8mrCt7wHqf/?stop=next&lang=en&format=html>. Acesso em: 24 set. 2025.

LANA, A. Q. **Forno de alvenaria para incremento da produtividade por meio do resfriamento externo do carvão vegetal**. 2018. 87 f. Tese (Doutorado em Ciências) - Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2018. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11150/tde-22012019-172709/en.php>. Acesso em: 20 out. 2025.

LEHMANN, J.; JOSEPH, S. **Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation**. 2. ed. London: Routledge, 2015. Disponível em: https://books.google.com.br/books?hl=ptBR&lr=&id=e34IEQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=LEHMANN,+J.%3B+JOSEPH,+S.+Biochar+for+Environmental+Management:+Science,+Technology+and+Implementation.+2.+ed.+London:+Routledge,+2015.&ots=ujpacnkW0&sig=A2-Sh94RCbCAndfxKCK6ehUPDKI&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false. Acesso em: 20 out. 2025.

MARQUES, M. D. F. *et al.* Carvão ativado de origem vegetal: produção e aplicações ambientais. **Química Nova**, v. 41, n. 4, p. 472–479, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/32249>. Acesso em: 20 out. 2025.

MME – MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Balanco Energético Nacional**. 2008. Disponível em: https://www.fans.edu.br/wpcontent/uploads/2015/06/texto_matrizes_energeticas_brasil_cenario_2010.2030.pdf. Acesso em: 25 out. 2025.

MORAES, Marcílio de. **Minas lidera produção da silvicultura no país**. Estado de Minas, 29 set. 2024. Disponível em: <https://www.em.com.br/colunistas/marciliodemoraes/2024/09/6953144-minas-lidera-producao-da-silvicultura-no-pais.html>. Acesso em: 06 nov. 2025.

MORAES, Marcílio de. **Minas Gerais lidera na produção e em área plantada de florestas**. Estado de Minas, 28 set. 2025. Disponível em: <https://www.em.com.br/colunistas/marcilio-demoraes/2025/09/7257972-minas-gerais-lidera-na-producao-e-em-area-plantada-deflorestas.html>. Acesso em: 06 nov. 2025.

MORAIS, S. A. L., Nascimento, E. A., Melo, D. C. Análise da Madeira de Pinus Carpa Parte 1 –Estudo dos Constituintes Macromoleculares e Extrativos Voláteis. SIF, Sociedade de Investigações Florestais, **Revista Árvore**, v. 29, n. 3, p. 461-470, 2005. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rarv/a/DcCpsxrjS8ZNZxHjfxr4KFw/?format=html&lang=pt>. Acesso em: 25 out. 2025.

NEVES, Thiago Andrade. **Qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de Eucalyptus cultivados no sul de Minas Gerais**. 2012. Disponível em: https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/UFLA_1665cc7346832e67bf017e861a283c97. Acesso em: 25 out. 2025.

NOGUEIRA, L. A. H.; LORA, E. E. S. **Dendroenergia: fundamentos e aplicações**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2003. 199 p. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/ElectoLora/publication/272814747_Dendroenergia_fundamentos_e_aplicacoes_2a_ed/links/653a700924bbe32d9a71f5e5/Dendroenergia-fundamentos-e-aplicacoes-2a-ed.pdf. Acesso em: 25 out. 2025.

NOVOTNY, E. H. *et al.* **Biochar: Características, aplicações e perspectivas para o Brasil**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2015. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/860706/biochar-uma-nova-ferramenta-no-manejo-de-solos>. Acesso em: 25 out. 2025.

OLIVEIRA, Rogério Lima Mota de *et al.* **Instrumentação e análise térmica do processo de produção de carvão vegetal**. 2009. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/14855>. Acesso em: 26 nov. 2025.

OLIVEIRA, A. F.; BAVARESCO, A.; PESSUTI, C. A. A.; MIYASHIRO, C. S.; FRANK, J. Análise da Qualidade do Carvão para Consumo Doméstico de Quatro Municípios do Estado do Paraná. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 4, n. 3, 2015. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/rber/article/view/43034>. Acesso em: 25 nov. 2025.

OLIVEIRA, L. C. A. *et al.* Carvão vegetal: produção, propriedades e aplicações. **Revista Virtual de Química**, v. 10, n. 2, p. 336–361, 2018. Disponível em: <https://querobolsa.com.br/enem/geografia/carvao-vegetal>. Acesso em: 25 out. 2025.

OLIVEIRA, A. C.; RAMOS, D. C.; PEREIRA, B. L. C.; CARNEIRO, A. C. O. Carbonization temperature and charcoal properties at different positions in rectangular kiln. **Revista Brasileira de ciências Agrárias**, Recife, v.15, n.4, e8493, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.5039/agraria.v15i4a8493>. Acesso em: 06 nov. 2026.

PEREIRA, Bárbara Luísa Corradi *et al.* Efeito da carbonização da madeira na estrutura anatômica e densidade do carvão vegetal de Eucalyptus. **Ciência Florestal**, v. 26, p. 545-557, 2016. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cflo/a/zHBZmcCFdkbkpWg8qT9n5Cn/?lang=pt>. Acesso em: 06 nov. 2025.

PROTÁSIO, T. P.; BUFALINO, L.; MENDES, R. F.; RIBEIRO, M. X.; TRUGILHO, P. F.; LEITE, E. R. S. Torrefação e carbonização de briquetes de resíduos do processamento dos grãos de café. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 11, p.1252-1258, 2012. DOI: 10.1590/S1415-43662012001100015. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/K9qGCSkYVMjzRyLLLBQ3Kdy/?format=html&lang=pt>. Acesso em: 06 nov. 2025.

REZENDE, J.B.; SANTOS, A.C. **A cadeia produtiva do carvão vegetal em Minas Gerais: pontos críticos e potencialidades**. Belo Horizonte: EPAMIG, 2010. 80 p. Boletim Técnico.

Disponível em: <https://livrariaepamig.com.br/wp-content/uploads/2023/02/BT-95-Cadeia-Produtiva-do-Carvao-Vegetal-.pdf>. Acesso em: 006 nov. 2025.

RIBEIRO, P. G.; VALE, A. T. Qualidade do carvão vegetal de resíduos de serraria para o uso doméstico. In: **Anais da Reunião Anual da Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência**; Florianópolis. Belém: Universidade Federal do Paraná; 2006. Disponível em: [cholar.google.com/scholar?hl=ptBR&as_sdt=0%2C5&q=RIBEIRO%2C+P.+G.%3B+VALE%2C+A.+T.+Qualidade+do+carv%C3%A3o+vegetal+de+res%C3%ADuos+de+serraria+para+o+uso+dom%C3%A9stico.+In%3A+Anais+da+Reuni%C3%A3o+Anual+da+Sociedade+Brasileira+para+o+Progresso+da+Ci%C3%BAncia%3B+Florian%C3%B3polis.+Bel%C3%A9m%3A+Universidade+Federal+do+Paran%C3%A1%3B+2006.&btnG](https://scholar.google.com/scholar?hl=ptBR&as_sdt=0%2C5&q=RIBEIRO%2C+P.+G.%3B+VALE%2C+A.+T.+Qualidade+do+carv%C3%A3o+vegetal+de+res%C3%ADuos+de+serraria+para+o+uso+dom%C3%A9stico.+In%3A+Anais+da+Reuni%C3%A3o+Anual+da+Sociedade+Brasileira+para+o+Progresso+da+Ci%C3%BAncia%3B+Florian%C3%B3polis.+Bel%C3%A9m%3A+Universidade+Federal+do+Paran%C3%A1%3B+2006.&btnG). Acesso em: 06 set. 2025.

SANTOS, A. L. S. **Integração de comunidades rurais com recursos vegetais**: o caso dos remanescentes de floresta estacional do município de Junqueiro (AL-Brasil). 134 f. Tese (Doutorado) – Curso de Geografia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008. Disponível em:

[scholar.google.com/scholar?hl=ptBR&as_sdt=0%2C5&q=SANTOS%2C+A.+L.+S.+Integra%C3%A7%C3%A3o+de+comunidades+rurais+com+recursos+vegetais%3A+o+caso+dos+remanescentes+de+floresta+estacional+do+munic%C3%ADpio+de+Junqueiro+\(AL-Brasil\).+134+f.+Tese+\(Doutorado\)+--Curso+de+Geografia%2C+Universidade+Federal+de+Pernambuco%2C+Recife%2C+2008.&btnG](https://scholar.google.com/scholar?hl=ptBR&as_sdt=0%2C5&q=SANTOS%2C+A.+L.+S.+Integra%C3%A7%C3%A3o+de+comunidades+rurais+com+recursos+vegetais%3A+o+caso+dos+remanescentes+de+floresta+estacional+do+munic%C3%ADpio+de+Junqueiro+(AL-Brasil).+134+f.+Tese+(Doutorado)+--Curso+de+Geografia%2C+Universidade+Federal+de+Pernambuco%2C+Recife%2C+2008.&btnG). Acesso em: 06 set. 2025.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Agricultura e Abastecimento. Resolução SAA – 10, de 11-7-2003. **Norma de padrões mínimos de qualidade para carvão vegetal, como base para certificação de produtos pelo Sistema de Qualidade de Produtos Agrícolas, Pecuários e Agroindustriais do Estado de São Paulo, instituído pela Lei 10.481-9**. Diário Oficial do Estado de São Paulo, São Paulo, v. 113, n. 129, jul. 2003. Disponível em: https://codeagro.agricultura.sp.gov.br/arquivos/selo/saa_1031a0ff69a85454e1cde89c327ac490f5.pdf. Acesso em: 08 ago. 2025.

SILVA, A. C. *et al.* Aplicações cosméticas do carvão ativado vegetal. **Revista Brasileira de Cosmetologia**, v. 10, n. 1, p. 45–52, 2021. Disponível em: <https://www.google.com/search?q=Aplica%C3%A7%C3%B5es+cosm%C3%A9ticas+do+carv%C3%A3o+ativado+vegetal+Revista+Brasileira+de+Cosmetologia+v.10+n.1+2021>. Acesso em: 09 jul. 2025.

SOARES, VÁSSIA CARVALHO *et al.* Análise das propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto em três idades. **Cerne**, v. 21, p. 191-197, 2015. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cerne/a/pNMFr9vxhmVj6bGdC4XWdJN/?lang=pt&format=html>. Acesso em: 06 set. 2025.

TEAM, R. Core. **R language definition**. Vienna, Austria: R foundation for statistical computing, v. 3, n. 1, p. 116, 2000. Disponível em: <https://cran.r-project.org/doc/manuals/r-release/R-lang.pdf>. Acesso em: 06 set. 2025.

VALE, A. T. *et al.* A produção de carvão vegetal no Brasil e o uso de florestas plantadas: situação atual e perspectivas. **Ciência Florestal**, v. 21, n. 4, p. 853–864, 2011. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/cienciaflorestal/search?q=A+produ%C3%A7%C3%A3o+de+carv%C3%A3o+vegetal+no+Brasil>. Acesso em: 08 ago. 2025.

VAN LOO, Sjaak; KOPPEJAN, Jaap. **The Handbook of Biomass Combustion and Cofiring**. 1.Ed. London • Sterling, VA: Earthscan, 2008. 465 p. v. 1. Disponível em:

https://scholar.google.com/scholar?hl=ptBR&as_sdt=0%2C5&q=VAN+LOO%2C+Sjaak%3B+KOPPEJAN%2C+Jaap.+The+Handbook+of+Biomass+Combustion+and+Cofiring.+1.Ed.+London+%E2%80%A2+Sterling%2C+VA%3A+Earthscan%2C+2008.+465+p.+v.+1.&btnG=. Acesso em: 06 set. 2025.

VITAL, B. R.; JESUS, R. M.; VALENTE, O. F. Efeito da constituição química e da densidade básica da madeira de clones de *Eucalyptus grandis* na produção de carvão vegetal. **Revista Árvore** 10(2): 151-160. 1986. Disponível em:

[https://books.google.com.br/books?hl=ptBR&lr=&id=N0SaAAAAIAAJ&oi=fnd&pg=PA151&dq=VITAL,+B.+R.%3B+JESUS,+R.+M.%3B+VALENTE,+O.+F.+Efeito+da+constitui%C3%A7%C3%A3o+qu%C3%ADmica+e+da+densidade+b%C3%A1sica+da+madeira+de+clones+de+Eucalyptus+grandis+na+produ%C3%A7%C3%A3o+de+carv%C3%A3o+vegetal.+Revista+%C3%81rvore+10\(2\):+151160.+1986.&ots=rzYdG_qD3Y&sig=wOb4Pxc8CedMntQ3wTV3YUJp2i8&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.br/books?hl=ptBR&lr=&id=N0SaAAAAIAAJ&oi=fnd&pg=PA151&dq=VITAL,+B.+R.%3B+JESUS,+R.+M.%3B+VALENTE,+O.+F.+Efeito+da+constitui%C3%A7%C3%A3o+qu%C3%ADmica+e+da+densidade+b%C3%A1sica+da+madeira+de+clones+de+Eucalyptus+grandis+na+produ%C3%A7%C3%A3o+de+carv%C3%A3o+vegetal.+Revista+%C3%81rvore+10(2):+151160.+1986.&ots=rzYdG_qD3Y&sig=wOb4Pxc8CedMntQ3wTV3YUJp2i8&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false). Acesso em: 06 set. 2025.