

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO SUDOESTE DA BAHIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

**RELAÇÃO ENTRE A TEMPERATURA E O TEMPO DE  
CARBONIZAÇÃO NAS PROPRIEDADES DO CARVÃO VEGETAL DE**  
*Eucalyptus spp.*

**ALLANA KATIUSSYA SILVA PEREIRA**

VITÓRIA DA CONQUISTA  
BAHIA – BRASIL  
AGOSTO – 2021

**ALLANA KATIUSSYA SILVA PEREIRA**

**RELAÇÃO ENTRE A TEMPERATURA E O TEMPO DE  
CARBONIZAÇÃO NAS PROPRIEDADES DO CARVÃO VEGETAL DE  
*Eucalyptus* spp.**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, para a obtenção do título de Mestra.

**Orientador: Prof. Dalton Longue Júnior (UESB)**

VITÓRIA DA CONQUISTA  
BAHIA – BRASIL  
AGOSTO – 2021

P489r      Pereira, Allana Katiussya Silva.

Relação entre a temperatura e o tempo de carbonização nas propriedades do carvão vegetal de *Eucalyptus* spp. / Allana Katiussya Silva Pereira, 2021.

66f.

Orientador (a): Dr. Dalton Longue Júnior.

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais, Vitória da Conquista, 2021.

Inclui referências. 52 - 61.

1. Carvão vegetal – *Eucalyptus* spp. 2. Energia renovável. 3. Biomassa- Bioenergia. 4. Pirólise - Termoquímica. I. Longue Júnior, Dalton. II. Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais. III. T.

CDD: 662.62

*Catálogo na fonte:* Juliana Teixeira de Assunção – CRB 5/1890

UESB – Campus Vitória da Conquista - BA

**ALLANA KATIUSSYA SILVA PEREIRA**

**RELAÇÃO ENTRE A TEMPERATURA E O TEMPO DE  
CARBONIZAÇÃO NAS PROPRIEDADES DO CARVÃO VEGETAL DE  
*Eucalyptus* spp.**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais, para a obtenção do título de Mestra.

Aprovada em 26 de agosto de 2021.

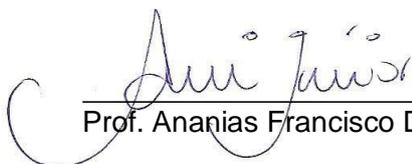
Comissão Examinadora:



Prof. Thiago de Paula Protásio (D.Sc. Ciência e Tecnologia da Madeira) – UFRA



Dra. Brunela Pollastrelli Rodrigues (D.Sc. Ciências Florestais) – CAPES/PNPD



Prof. Ananias Francisco Dias Júnior (D.Sc. Ciências) – UFES (coorientador)



Prof. Dalton Longue Júnior (D.Sc. Ciência Florestal) – UESB (orientador)

## DEDICATÓRIA

*Aos meus pais, por terem me guiado ao caminho dos estudos  
e da determinação, apesar das dificuldades.*

*À minha vó, Dona Nice, por sempre me dar forças  
para enfrentar adversidades e  
me lembrar de celebrar pequenas vitórias.*

*À todas pesquisadoras que vieram antes de mim  
e àquelas que ainda virão e farão Ciência  
apesar da falta de reconhecimento  
e da tentativa de nos invisibilizar  
por sermos mulheres.*

*A todos os estudantes sobreviventes do caos.*

*O pensamento é a força criadora, irmão  
O amanhã é ilusório porque ainda não existe  
O hoje é real  
É a realidade que você pode interferir  
As oportunidades de mudança 'tá no presente  
Não espere o futuro mudar sua vida  
Porque o futuro será a consequência do presente  
Parasita hoje  
Um coitado amanhã  
Corrida hoje  
Vitória amanhã  
Nunca esqueça disso, irmão  
Acreditar e sonhar  
E sonhar  
E sonhar.*

Racionais Mc's – A vida é um desafio

## AGRADECIMENTOS

A realização desta pesquisa não teria sido possível se eu não tivesse me deparado com pessoas tão generosas ao longo do caminho. Principalmente em tempos de caos, é necessário reconhecer todos àqueles e àquelas que me foram base, fonte de apoio e coragem nesta fase tão importante e de tantos desafios que foi o mestrado. Sendo assim, agradeço:

Aos bons ventos e energias que me levaram a todas as pessoas que encontrei e que me foram necessárias ao longo dessa trajetória. Eu não ando só.

Aos meus pais, Adalci e Benedito, e às minhas irmãs, Jéssica e Taiana, fontes inesgotáveis de apoio e compreensão. Sem o auxílio de vocês eu não seria quem sou *hoje*. Eu não teria caminhado tanto. Agradeço por seguirem trilhando comigo todas por as minhas escolhas, apesar das minhas ausências e abdições.

À Lorena Jardim, por todo companheirismo, amor e incentivo. Você foi fundamental para que eu conseguisse chegar até aqui, mesmo em tempos de caos. Agradeço por todo carinho e cuidado, por me ajudar a me enxergar no mundo e a me dar coragem para seguir na conquista dos meus objetivos. Obrigada por ser quem é e por me ajudar *a ser quem estou*.

Ao meu afilhado, Raul, à minha comadre, Ana Dária e ao meu compadre, Victor Godoi. Juntamente à Lorena Jardim, celebro a nossa família! Agradeço todos os dias por sermos quem somos e por termos uns aos outros. Obrigada por acreditarem tanto em mim. Obrigada por serem ouvidos, abraços e coração. Lugar para eu estar e voltar.

Às minhas amigas Naiara, Thaís e Thalita, pessoas que pude conhecer graças ao mestrado e que levo para além dele. Obrigada pela motivação, risadas e trocas que fizemos e continuamos fazendo diariamente. Especialmente você, Nai, nada é por acaso e, com certeza, o nosso encontro também não foi. Admiro muito a mulher que você é! Obrigada por tudo.

À Brunela, pelas infinitas conversas, conselhos, escuta e ensinamentos. Eu tenho profunda admiração pela pessoa que você é, pela profissional que trilhou a ser (e é) e por muito que ainda está por vir. Bru, o amor que você coloca em tudo que faz contagia a todos que te conhecem minimamente. Sou grata por confiar nos meus passos e por me motivar a ir sempre além! As suas contribuições me ajudam efetivamente a caminhar de forma mais assertiva. Muito obrigada!

À Ana Câmara e ao Jean, sou grata por terem me recebido em Jerônimo Monteiro quando mais precisei. Vocês foram muito importantes nessa etapa da minha vida. Muito obrigada pela generosidade e pelo apoio! A admiração que ficou depois desses dias de convivência não tem preço.

Ao Ananias, por me apontar o caminho a ser trilhado na Ciência, com tanta sabedoria, entusiasmo e simplicidade e por me lembrar frequentemente que sou capaz de fazer aquilo que quero e me proponho a fazer. Obrigada pela oportunidade de crescimento junto a você e aos seus, Mago.

À toda Equipe do Laboratório de Energia da Biomassa (LEB/UFES), nas pessoas do Aécio, Alfredo, Álison, Elias, Fabíola, Gabriela, Jéssica, João, Luis e Tayná. Obrigada pelas múltiplas contribuições na minha vida, pela receptividade, pelos copos de cerveja pós laboratório, pelas gargalhadas. Enfim, pelo espaço me cedido para trabalhar com vocês. Obrigada por todo aprendizado diário. Somos uma Equipe!

Ao professor Dalton Longue Júnior agradeço pela orientação na pesquisa e por ter me guiado nessa área tão vasta que é a Tecnologia de Produtos Florestais. Sou grata ainda a todos os professores e funcionários da Pós-Graduação em Ciências Florestais da Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia (UESB) por todo auxílio e convivência ao longo desses anos, em especial à Fabrícia. E à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal e Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa.

À Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), agradeço pela assistência nas análises concedida pelo Laboratório de Química da Madeira, na pessoa do Luciano. Laboratório de Engenharia Química, ao Pedro e à Flaviane. E ao Laboratório Central de Analítica 2, na pessoa do Prof. Demétrius.

Obrigada a tudo que vivi, experienciei e aprendi.

Obrigada a cada um e cada uma de vocês!

## RESUMO

PEREIRA, Allana Katiussya Silva. **Relação entre a temperatura e o tempo de carbonização nas propriedades do carvão vegetal de *Eucalyptus* spp.** 2021. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Vitória da Conquista, BA. Orientador: Prof. Dr. Dalton Longue Júnior. Coorientador: Prof. Dr. Ananias Francisco Dias Júnior.

Apesar de décadas de atividades, a produção de carvão vegetal ainda é marcada por baixo controle de processo. Na prática, muitas vezes os fornos não executam o planejamento em termos de tempo exposto a determinadas temperaturas finais, o que pode acarretar em alterações no carvão vegetal. Nesse contexto, o objetivo desse trabalho foi avaliar os efeitos de diferentes temperaturas e tempos de carbonização nas propriedades de carvão vegetal oriundo de madeiras comerciais de *Eucalyptus* spp. O experimento foi composto por três tempos de carbonização (4h, 5h e 7h) e três temperaturas finais (300 °C, 450 °C e 600 °C), totalizando nove tratamentos. A madeira e o carvão vegetal foram analisados frente a propriedades físicas, químicas, energéticas e mecânica, bem como o perfil frente à termodegradação, difração de raios-x e ao ensaio de combustibilidade. Os dados foram submetidos aos testes de normalidade e de homocedasticidade, seguidos de análise de variância a partir de um delineamento inteiramente casualizado, ajuste de modelos de regressão e análises multivariadas. Ao se considerar a densidade aparente, umidade, estoque de carbono fixo e densidade energética, o tempo e a temperatura final de carbonização devem ser analisados em conjunto. A análise termogravimétrica e de difração de raios-x mostraram que o tempo total de carbonização não influenciou de forma significativa na estrutura do carvão vegetal, demonstrando perfis de degradação térmica e padrões de difratogramas semelhantes dentro de cada temperatura final analisada. A análise multivariada apresentou três grupos, por temperatura de carbonização, corroborando com as demais observações acerca desta ter sido a variável que mais influenciou nas propriedades do combustível. O carvão vegetal analisado possui potencial de aplicação principalmente no setor doméstico.

**Palavras-chave:** Biomassa; Bioenergia; Energia renovável; Pirólise; Termoquímica.

## ABSTRACT

PEREIRA, Allana Katiussya Silva. **Relationship between temperature and carbonization time on *Eucalyptus* spp. charcoal properties.** 2021. Dissertation (Master's degree in Forest Sciences) – Southwestern Bahia State University, Vitória da Conquista, BA. Adviser: Prof. Dr. Dalton Longue Júnior. Co-Adviser: Prof. Dr. Ananias Francisco Dias Júnior.

Despite decades of activities, charcoal production is still marked by low process control operations. In practice, ovens often do not carry out planning in terms of time exposed to certain final temperatures, which can lead to changes in charcoal. In this context, the objective of this work was to evaluate the effects of different temperatures and carbonization times on the properties of charcoal from commercial *Eucalyptus* spp. The experiment consisted of three carbonization times (4, 5, and 7h) and three final temperatures (300, 450, and 600 °C), totaling nine treatments. Wood and charcoal were analyzed for physical, chemical, energetic and mechanical properties, as well as thermodegradation profile, x-ray diffraction and combustibility test. Data were subjected to normality and homoscedasticity tests, followed by analysis of variance from a completely randomized design, adjustment of regression models and multivariate analysis. The time and final carbonization temperature process variables must be analyzed together when considering bulk density, moisture, fixed carbon stock and energy density. Thermogravimetric analysis and X-ray diffraction showed that the total carbonization time did not significantly influence the charcoal structure, demonstrating similar thermal degradation profiles and diffractogram patterns within each final temperature analyzed. The multivariate analysis grouped charcoals with similar characteristics based on the final carbonization temperature, as this was the variable that most influenced the fuel properties. The analyzed charcoal mainly has potential application in the domestic sector.

**Keywords:** Biomass; Bioenergy; Renewable energy; Pyrolysis; Thermochemistry.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Consumo de energia no Brasil nos anos 1970, 2000 e 2019 .	4
Figura 2. Oferta interna de energia renovável no Brasil em 2019	5
Figura 3. Modelo de carbonização de Kanury e Blackshear Júnior	7
Figura 4. Frente de pirólise proposta por Holmes	9
Figura 5. Sistema de carbonização	15
Figura 6. Sistema do teste de combustibilidade do carvão vegetal	18
Figura 7. Curvas termogravimétricas (TG/DTG) da madeira oriunda da mistura de clones de <i>Eucalyptus</i>	23
Figura 8. Padrões do difratograma de raio-x da madeira oriunda da mistura de clones de <i>Eucalyptus</i> .	25
Figura 9. Rendimentos dos produtos da carbonização de <i>Eucalyptus</i> spp.	27
Figura 10. Comportamento da densidade aparente frente diferentes tempos totais e temperaturas finais de carbonização.	28
Figura 11. Umidade do carvão vegetal produzido em diferentes tempos totais e temperaturas finais de carbonização	30
Figura 12. Análise imediata de carvão vegetal produzido sob diferentes temperaturas finais de carbonização	31
Figura 13. Poder calorífico superior, inferior e útil do carvão vegetal produzido sob diferentes temperaturas de carbonização	33
Figura 14. Estoque de carbono fixo do carvão vegetal em relação a diferentes totais e temperaturas de carbonização	34
Figura 15. Densidade energética do carvão vegetal produzido a diferentes tempos totais e temperaturas finais de carbonização	34
Figura 16. Variação de temperatura (A) e consumo de massa (B) do carvão vegetal produzido a 300 °C em diferentes tempos totais de carbonização.	36
Figura 17. Variação de temperatura (A) e consumo de massa (B) do carvão vegetal produzido a 450 °C em diferentes tempos totais de carbonização.	36
Figura 18. Variação de temperatura (A) e consumo de massa (B) do carvão vegetal produzido a 600 °C em diferentes tempos totais de carbonização.	36
Figura 21. Curvas TG (A) e DTG (B) do carvão vegetal produzido a 300 °C em diferentes tempos totais de carbonização.	41
Figura 22. Curvas TG (A) e DTG (B) do carvão vegetal produzido a 450 °C em diferentes tempos totais de carbonização.	41
Figura 23. Curvas TG (A) e DTG (B) do carvão vegetal produzido à 600 °C em diferentes tempos totais de carbonização.	42
Figura 24. Padrões de difração de raios-X do carvão vegetal produzido a 300 °C em diferentes tempos totais de carbonização.	44
Figura 25. Padrões de difração de raios-X do carvão vegetal produzido a 450 °C em diferentes tempos totais de carbonização.	44
Figura 26. Padrões de difração de raios-X do carvão vegetal produzido a 600 °C em diferentes tempos totais de carbonização.	45
Figura 27. Dispersão dos tratamentos do carvão vegetal em função dos escores e diagrama de ordenação dos autovetores das duas primeiras componentes principais	48
Figura 28. Dendrograma obtido pelo método de agrupamento hierárquico da ligação média entre grupos (UPGMA)	49

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	3
<b>2.1 Contexto histórico da produção de carvão vegetal</b> .....	3
<b>2.2 Importância do setor de florestas plantadas para finalidades energéticas no Brasil</b> .....	5
<b>2.3 A carbonização e os efeitos de suas variáveis no carvão vegetal</b> .....	7
<b>2.4 Propriedades do carvão vegetal em função da carbonização</b> .....	10
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	13
<b>3.1 Amostragem e avaliação da madeira</b> .....	13
<b>3.1.1 Coleta e preparo das amostras de madeira</b> .....	13
<b>3.1.2 Caracterização da madeira</b> .....	13
<b>3.2 Processo de carbonização da madeira</b> .....	15
<b>3.3 Caracterização do carvão vegetal</b> .....	17
<b>3.4 Análise dos dados</b> .....	20
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	21
<b>4.1 Caracterização da madeira</b> .....	21
<b>4.2 Efeito das variáveis da carbonização sobre os rendimentos gravimétricos</b>	26
<b>4.3 Efeito das variáveis de processo nas propriedades do carvão vegetal</b> .....	27
<b>4.4 Análise multivariada</b> .....	47
<b>5. CONCLUSÃO</b> .....	51
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	52
<b>7. APÊNDICES</b> .....	62

## 1. INTRODUÇÃO

As árvores plantadas em sistemas mistos ou homogêneos formam maciços florestais que abastecem diferentes setores industriais e permitem diversificar o uso da madeira de forma sustentável, o que inclui, dentre outros usos, a geração de energia. Nas últimas décadas, o setor florestal brasileiro vem aprimorando suas técnicas relacionadas ao aumento da produtividade e da qualidade final da madeira em prol das suas diferentes aplicações. As mudanças climáticas e debates acerca da segurança energética dos países elevaram o tema energia da madeira a uma nova fase de importância e visibilidade (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO, 2021). Não é mais possível discutir geração de energia sem levar em consideração aspectos que envolvam o processo produtivo.

Atualmente, o Brasil possui atualmente uma área plantada de 9,0 milhões de hectares, sendo 77% de cultivos de eucalipto (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - IBÁ, 2020). Apesar dessa elevada área de cultivo, ainda existem gargalos técnicos a serem solucionados na implantação de sítios produtivos energéticos, principalmente, em regiões áridas e semiáridas do Brasil. E, ainda, investigar espécies e materiais genéticos com potencial de fonte de energia, pode ser decisivo na tomada de decisão para a expansão da área cultivada de eucalipto. Nesse contexto de florestas plantadas, o estado da Bahia participa com cerca de 657 mil hectares de plantios comerciais, 94% composto por espécies do gênero *Eucalyptus* (ASSOCIAÇÃO BAIANA DAS EMPRESAS DE BASE FLORESTAL, 2019). A região Sudoeste colabora fortemente com essa representatividade a partir da condução de plantios florestais no semiárido que abastecem o setor energético.

Em relação à produção de carvão vegetal, o Brasil é o líder mundial, responsável por 4,6 milhões de toneladas anuais, o que corresponde a 12% de toda produção global (IBÁ, 2020). No entanto, apesar da posição do Brasil como maior produtor mundial, ainda há muita dificuldade de controlar o processo de produção de carvão vegetal, seja através da homogeneidade da madeira ou do controle das temperaturas dos fornos. Tais aspectos são imprescindíveis ao bom desempenho energético do carvão vegetal, uma vez que sua qualidade está diretamente relacionada com a operação dos fornos de alvenaria e metálico (ABREU NETO *et al.*,

2020) quando submetido por determinados tempos e temperaturas finais de carbonização.

Uma boa performance do processo de carbonização da madeira, a partir das variáveis tempo total e temperatura final, impactam diretamente nas características finais do carvão vegetal. Tais características devem ser bem compreendidas e quantificadas de modo a subsidiarem tomadas de decisões acerca da produção, otimizando o seu desempenho energético do carvão vegetal e direcionando da melhor forma o seu uso. Tendo em vista essa abordagem, faz-se necessário o melhor entendimento do comportamento do carvão vegetal frente às variáveis da carbonização e de como as suas propriedades estão correlacionadas. Para isso, o uso de análises relevantes que envolvam termogravimetria, difatogramas de raios-x e índice de combustibilidade, juntamente com ferramentas estatísticas multivariadas, são fundamentais. Dessa forma, haverá subsídio a um maior controle operacional da carbonização, acarretando principalmente na realidade de pequenos produtores.

Diante do exposto, esse estudo teve por objetivo geral avaliar os efeitos das variáveis de processo de carbonização, temperatura final e tempo total, nas propriedades do carvão vegetal de madeiras comerciais de *Eucalyptus* spp. Os objetivos específicos foram: i) caracterizar as propriedades físicas, químicas e energéticas da madeira; ii) avaliar o efeito de diferentes temperaturas e tempos de carbonização nas propriedades físicas, químicas, energéticas e mecânica do carvão vegetal; iii) obter ajuste de modelos que infiram sobre a qualidade do carvão vegetal em função das variáveis de processo (temperatura final e tempo de carbonização); e iv) conhecer o agrupamento dos tratamentos que melhor explicam o comportamento do carvão vegetal frente às variáveis do processo a partir de análise multivariada.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Contexto histórico da produção de carvão vegetal

Historicamente, a madeira é uma das primeiras fontes de energia utilizada pela humanidade e continua sendo a matéria-prima individual mais importante no contexto das energias renováveis, representando, aproximadamente, 6% do fornecimento total de energia primária no mundo (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO, 2021).

A produção mundial de carvão vegetal apresenta momentos históricos importantes, baseados em alterações ao longo do tempo, tais como o uso da madeira como a primeira fonte energética nos primórdios da História, o seu declínio a partir do aumento do uso de produtos de origem petroquímica e a sua crescente substituição devido à utilização de carvão mineral. Há registros históricos datados do século XIII acerca de uma indústria primitiva de petróleo mas foi na virada dos séculos XIX para XX que o petróleo passou a ser usado em larga escala, o que ficou conhecido como a “idade do petróleo” (CARVALHO, 2014).

Tempos mais tarde, apesar do mundo apresentar uso majoritário de fontes energéticas não renováveis, a madeira foi vista como elemento crucial à humanidade, uma vez que cerca de um terço da população mundial depende dos usos tradicionais da lenha, principalmente para atividades essenciais como aquecimento e cocção de alimentos. Estima-se que metade da madeira extraída das florestas do mundo seja utilizada como combustível, sendo 17% convertidas em carvão vegetal (FAO, 2017).

No contexto energético, o Brasil se diferencia dos demais países do mundo: até 1940 a principal fonte primária de energia era a lenha, que respondia por mais de 75% do consumo energético (CARVALHO, 2014). Em 1970, a lenha e o carvão vegetal representavam 44% das fontes energéticas consumidas pela população brasileira, enquanto que, em 2000 caiu, este percentual caiu para 12% (Figura 1). O petróleo, seus derivados e o gás natural passaram de 34%, em 1970, para 46%, em 2011 (TOLMASQUIM *et al.*, 2007). Além disso, com o passar do tempo, outras fontes de energia foram implementadas, como o gás natural e urânio (fontes não renováveis) e energia solar, eólica, biodiesel, casca de arroz, capim-elefantes e óleos vegetais (fontes renováveis), conforme pode ser visto na Figura 1.

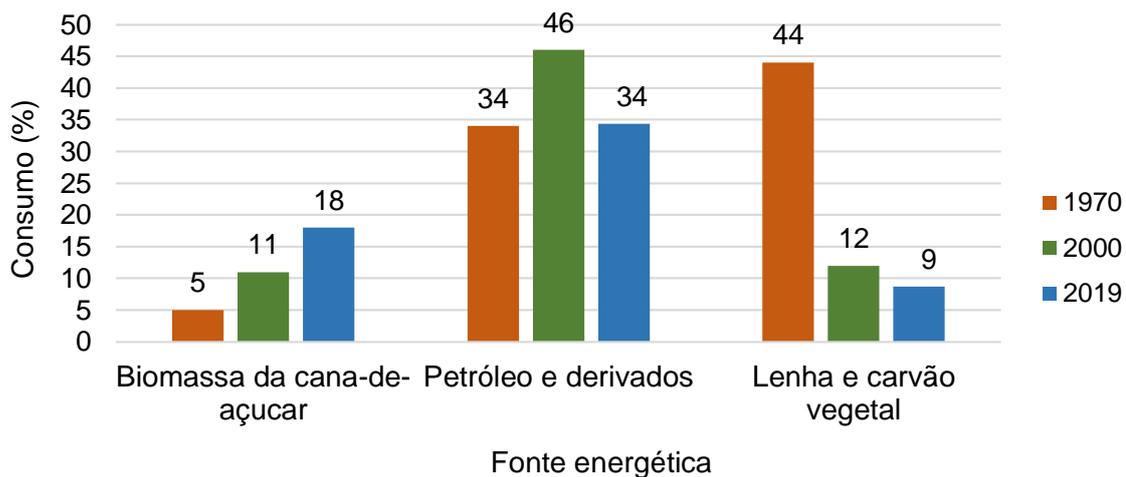


Figura 1. Consumo de energia no Brasil nos anos 1970, 2000 e 2019. Fonte: Brasil (2020); Brasil (2007); Brasil (2007); Tolmasquim *et al.* (2007).

Algumas questões merecem total destaque na produção brasileira de carvão vegetal da década de 1990, e a que mais chama atenção é em relação à oferta de matéria-prima: cerca de 78% da matéria-prima utilizada era oriunda de mata nativa. Dessa maneira, a disponibilidade de material lenhoso proveniente de florestas nativas permitiu o desenvolvimento crescente da siderurgia baseada majoritariamente nessa fonte energética. Outro aspecto era a tecnologia primitiva empregada no processo produtivo, com baixo controle operacional dos fornos de carbonização, nenhuma prática de controle qualitativo e quantitativo de emissões de gases, o que permitia o descarte de milhares de toneladas de componentes químicos (BRITO, 1990).

Após a década de 1970, época marcada por intensas crises energéticas resultantes de combustíveis fósseis, Brito (2013) mencionou que houve a “redescoberta” da madeira como fonte de energia e, desde então, busca-se a sua valorização no contexto energético. Em razão da forte presença de fontes renováveis de energia, atualmente a matriz energética brasileira é considerada uma das mais limpas do mundo. A soma de lenha e carvão vegetal, hidráulica, derivados de cana de açúcar e outras renováveis totalizaram quase metade (46,1%) da participação na matriz energética no ano de 2019 (BRASIL, 2020), conforme mostrado na Figura 2, o que demonstra menor dependência de recursos energéticos não renováveis em relação ao mundo.

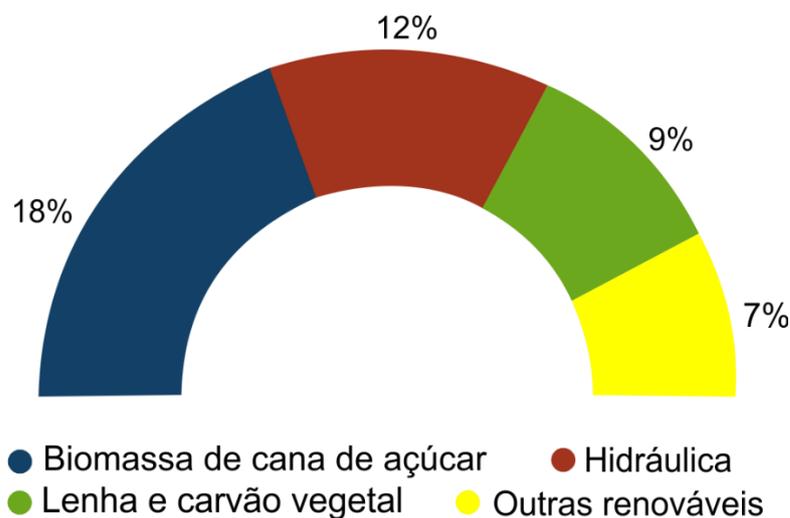


Figura 2. Oferta interna de energia renovável no Brasil em 2019.  
 Fonte: Brasil (2020).

Atualmente, a implantação em larga escala de práticas produtivas melhoradas tem contribuído para o Brasil se manter como o maior produtor mundial de carvão vegetal, com participação majoritária no setor siderúrgico (BRITO, 1990; DIAS JÚNIOR *et al.*, 2015; FAO, 2018). As melhores práticas observadas na produção brasileira de carvão vegetal utilizam procedimentos para o controle de processo da carbonização que associam as características da matéria-prima às condições de suprimento de energia do sistema, que resultam em melhorias em termos de rendimentos de processo e qualidade do carvão vegetal produzido (CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS - CGEE, 2015).

## 2.2 Importância do setor de florestas plantadas para finalidades energéticas no Brasil

A crescente demanda por matérias-primas tem chamado atenção sobre a necessidade de estudos acerca do potencial da biomassa florestal, incentivando pesquisas no Brasil e no mundo, com foco nos aspectos econômico, ambiental, social e político. Os plantios florestais com espécies de rápido crescimento (gêneros *Eucalyptus* e *Pinus*) surgiram como fontes viáveis ao suprimento de matéria-prima aos segmentos industriais (MORA e GARCIA, 2000), a exemplo do setor energético, e tem tornado viável a substituição da extração vegetal de origem nativa por florestas plantadas comerciais.

Líder mundial na produção e consumo de carvão vegetal, atualmente o Brasil é responsável por 12% da produção global desse produto (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - IBÁ, 2020). A produção de carvão vegetal proveniente da silvicultura tem aumentado desde 2008, quando foi produzido 3,4 milhões de toneladas. Dez anos depois, em 2018, a produção nacional alcançou 4,6 milhões de toneladas, o que equivale a uma taxa de crescimento de 3,5% ao ano. É importante salientar que esse aumento de produção foi acompanhado por uma mudança na origem da madeira: em 2008, cerca de 48% do carvão consumido foi oriundo de florestas plantadas, chegando a 91% em 2018 (IBÁ, 2019), o que demonstra a preocupação crescente do setor em relação às condições ambientais e à importância do manejo de florestas.

Em 2019, a oferta interna de energia do Brasil registrou um acréscimo de 1,4% em relação ao ano anterior, com participação significativa de fontes renováveis: o balanço energético brasileiro apresentou redução da oferta de carvão mineral como consequente da queda de 9,0% na produção de aço. Segundo o Balanço Energético Nacional de 2020, 9% da oferta interna de energia renovável são representados por lenha e carvão vegetal (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE, 2020).

Nesse contexto, a origem da matéria-prima do carvão vegetal é muito importante, uma vez que determina sua capacidade de mitigar ou potencializar as emissões dos gases de efeito estufa, torna o setor energético mais seguro ou estável, visto que os preços dos combustíveis fósseis apresentam oscilações constantes, e incentiva o desenvolvimento tecnológico da exploração de matérias primas alternativas. Esses fatores influenciam diretamente o setor florestal de florestas plantadas, demonstrando a sua importância dentro do setor energético.

As matas nativas no Brasil apresentam uma produtividade média ponderada de carvão de 1 m<sup>3</sup> para 1 hectare de mata desmatada (SOCIEDADE BRASILEIRA DE SILVICULTURA - SBS, 2006). Quando se considera o carvão vegetal proveniente de florestas plantadas de eucalipto, a produtividade atinge cerca de 35,3 m<sup>3</sup>/ha (IBÁ, 2020). Além da maior produtividade, as florestas plantadas oferecem benefícios ambientais como sequestro de dióxido de carbono, recuperação de áreas degradadas, redução do consumo de fontes energéticas não renováveis, e proteção às florestas nativas (ELOY *et al.*, 2015; RIBEIRO *et al.*, 2017).

### 2.3 A carbonização e os efeitos de suas variáveis no carvão vegetal

O carvão vegetal é compreendido como um produto resultado de reações químicas ocorridas a partir da elevação da temperatura final da carbonização e aplicação de calor em quantidade de oxigênio suficientemente controlada para que ocorra apenas a degradação parcial da madeira. A partir do aquecimento, ocorre a eliminação da maior parte dos componentes voláteis da madeira, permanecendo como resíduo do processo o carvão vegetal (DUFOR *et al.*, 2011; ERNSTING, 2015).

A carbonização é um processo marcado por mudanças nas propriedades físicas e químicas do carvão vegetal, cujas fases do processo são compostas por formas de transferência de calor e caracterizadas pela ocorrência de transformações termoquímicas na madeira. Os pesquisadores Kanury e Blackshear Júnior (1970) apresentaram um modelo de carbonização dividido em cinco períodos, em função do tempo de exposição ao calor (Figura 3).

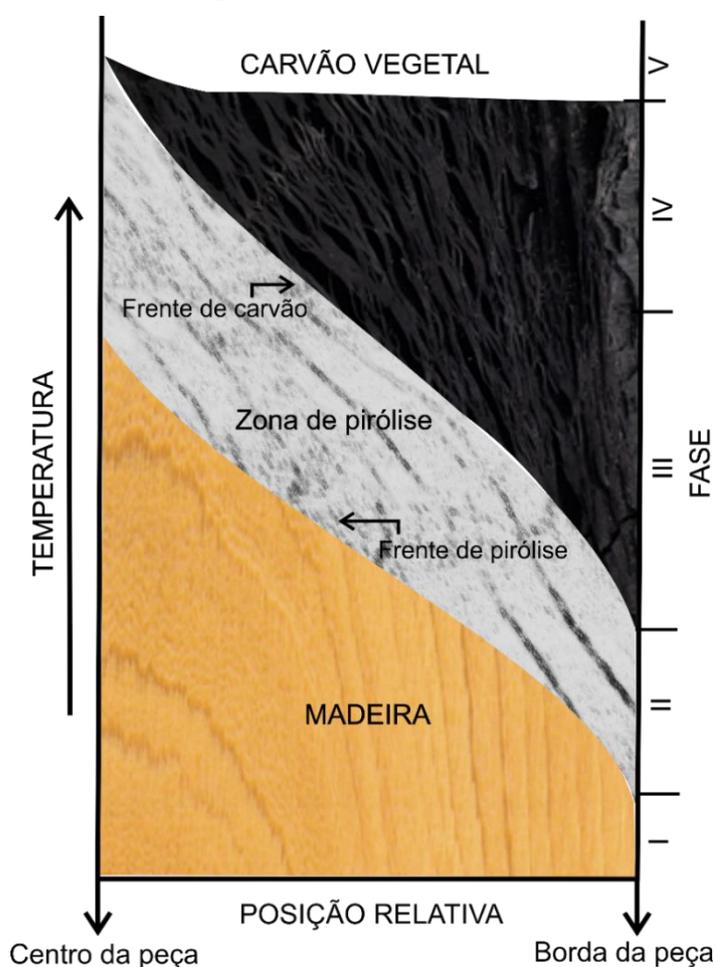


Figura 3. Modelo de carbonização de Kanury e Blackshear Júnior.  
Fonte: Kanury e Blackshear Júnior (1970), adaptado pela autora.

Segundo os autores e com base na Figura 3, na fase I ocorre apenas a liberação de água e é caracterizado por uma fase de propagação de calor por meio de condução térmica.

Na fase II a madeira começa a sofrer as primeiras decomposições térmicas e é subdividido em dois estágios: um correspondente à origem da zona de pirólise e outro em que a madeira continua aquecendo, fazendo com que os gases quentes transportem o calor para o exterior da madeira por convecção térmica. Abaixo dessa camada, a madeira continua em processo de aquecimento predominantemente via condução de modo que o processo de evaporação dos gases ocorra pela absorção de energia.

Já na fase III se inicia a formação do carvão vegetal a partir da remoção de materiais voláteis e são perceptíveis três camadas distintas: uma camada de madeira interna que ainda não sofreu alteração, uma camada de pirólise intermediária e uma camada de carvão superficial.

A fase IV é caracterizada pelo desaparecimento da madeira em seu estado original, e apresenta apenas uma parte da zona da pirólise e uma zona de carvão vegetal. Por fim, a fase V equivale à última fase da carbonização, formada por uma única camada, o carvão vegetal. Não há mais gases para serem volatizados e a transferência de calor se dá por condução térmica na camada porosa gerada (KANURY e BLACKSHEAR JÚNIOR, 1970).

A Figura 4 ilustra como se dá a evolução da “frente de pirólise” através da madeira durante o processo de carbonização:

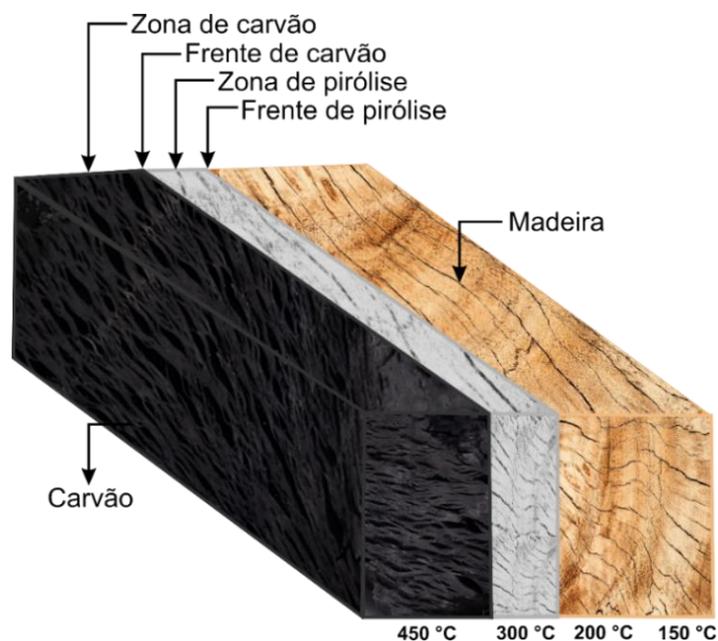


Figura 4. Frente de pirólise proposta por Holmes.  
Fonte: CETEC (1982) citado por Vilela (2014), adaptado pela autora.

Segundo o modelo de Holmes, o processo de carbonização se inicia com o aumento gradativo da temperatura da peça de madeira, realizado a partir de processos de convecção e condução térmica. Assim como explicitado por Kanury e Blackshear Júnior (1970), este modelo propõe a formação de um gradiente de temperatura entre a borda e o centro da peça de madeira até que a mesma começa a se decompor na região denominada zona de pirólise, gerando gases condensáveis e não condensáveis. Posteriormente, esses gases são conduzidos para fora da madeira e os gases pesados e parte do alcatrão sofrem decomposição e geram gases mais leves, especialmente gás carbônico, monóxido de carbono, metano, hidrogênio e propano. Estes gases, ao saírem do interior da madeira, encontram oxigênio e queimam, produzindo uma reação exotérmica (combustão). A partir disso, a zona de pirólise atinge o centro da peça de madeira até que haja transformação completa da mesma em carvão vegetal (VILELA, 2014).

Para o sucesso da carbonização além do conhecimento teórico as variáveis de processo precisam ser bem definidas e controladas, tais como a taxa de aquecimento, a temperatura final e tempo total de carbonização. Nesse sentido, a correlação entre as variáveis da carbonização e a produção de carvão vegetal é relatada em diferentes trabalhos. Autores como Oliveira (2003) e Oliveira *et al.* (2010) mostraram que altas temperaturas finais e elevadas taxas de aquecimento influenciam negativamente no rendimento em carvão vegetal e favorecem a geração de gases devido à maior degradação térmica dos componentes da madeira.

Os pesquisadores Trugilho e Silva (2001) relataram um decréscimo acentuado no rendimento em carvão vegetal acarretado pelo aumento da temperatura final de carbonização e posterior estabilização dos valores à medida em que as temperaturas finais eram muito elevadas, a partir de 700 °C. Observou-se que as variáveis de processo e o rendimento gravimétrico em carvão e em gases não-condensáveis se correlacionaram de maneira inversamente proporcional, ou seja, à medida em que o tempo e a temperatura final de carbonização aumentaram houve uma redução do rendimento em carvão vegetal (OLIVEIRA *et al.*, 2010).

O efeito dessas variáveis na qualidade do carvão vegetal tem sido estudado por diversos pesquisadores. Dentre as propriedades mais importantes do carvão

vegetal, o poder calorífico, até certo ponto, apresenta aumento com a elevação da temperatura (FARIA, 1984; PROTÁSIO *et al.*, 2021). A densidade aparente do carvão vegetal também é afetada pelo tempo, temperatura final da carbonização e taxa de aquecimento e apresenta redução a partir do aumento da taxa de aquecimento (BOAS *et al.*, 2010. VELLA *et al.*, 1989). Já o teor de carbono fixo tende a aumentar com a elevação da temperatura final de carbonização devido ao maior consumo de hidrogênio e oxigênio na formação de compostos como monóxido de carbono, dióxido de carbono e hidrocarbonetos (FARIA, 1984; PROTÁSIO *et al.*, 2021).

## **2.4 Propriedades do carvão vegetal em função da carbonização**

Algumas propriedades do carvão vegetal estão intrinsecamente relacionadas à sua capacidade de disponibilidade de energia. Densidade, porosidade, umidade, análise imediata, poder calorífico e friabilidade, e são as propriedades mais utilizadas em análises da qualidade desse produto (OLIVEIRA *et al.*, 2015).

A densidade é uma das propriedades mais importantes para determinação da qualidade do carvão vegetal e deve ser a maior possível (BRITO *et al.*, 1982). Nesse sentido, a densidade relativa aparente é a propriedade que considera os poros de cada carvão, enquanto que a densidade a granel expressa a quantidade de carvão vegetal em um recipiente de volume conhecido (ABNT, 1981). Já a porosidade é uma propriedade que estima a medida de espaços vazios, uma característica intrínseca ao carvão vegetal que influencia diretamente na higroscopicidade e reatividade desse material (LEITE *et al.*, 2015).

A umidade no carvão vegetal deve ser a menor possível, uma vez que quanto maior o teor de água maior o gasto energético para secagem deste combustível na primeira etapa da combustão (BRITO, 1993). A umidade do carvão vegetal é uma propriedade importante na siderurgia, uma vez que elevados teores acarretam no aumento do consumo de carvão vegetal. Desse modo, há redução da eficiência e produtividade energética em prol da necessidade de uma maior intensidade de reações de combustão para fornecimento de calor e da elevação da temperatura do ar das ventaneiras para compensar a redução de temperatura no interior do alto-forno (BRITO, 1993).

A análise imediata determina o teor de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas, sendo diretamente relacionada à temperatura de carbonização e à matéria-prima a ser utilizada (SILVA, 1988). O carbono fixo é uma das propriedades que mais despertam interesse, uma vez que pode ser compreendido como a quantidade de carbono contida no carvão vegetal após a carbonização.

Paralelamente, o poder calorífico define-se como a quantidade de energia na forma de calor que é liberada pela combustão de uma unidade de massa e é dividido em superior, inferior e útil. Denomina-se superior quando a combustão é realizada a volume constante e no qual a água formada durante o processo encontra-se em estado líquido e o calor latente do vapor d'água não é perdido (FRIEDL *et al.*, 2005; ABNT, 1984). O poder calorífico inferior é a energia efetivamente disponível por unidade de massa de combustível levando em consideração o calor liberado pela condensação da água gerada pela combustão (MCKENDRY, 2002; THOMAZ *et al.*, 2007) e o poder calorífico útil leva em consideração o teor de umidade do material. É uma propriedade que se relaciona com a análise imediata do material: quanto menor o teor de cinzas e maior o teor de carbono fixo, maior tende a ser o poder calorífico do carvão vegetal (MACHADO *et al.*, 2014).

A friabilidade é uma propriedade que reflete diretamente na resistência mecânica do carvão vegetal. Geralmente, altas temperaturas de carbonização tendem a produzir um produto final mais friável, capaz de gerar grande quantidade de finos ao longo da sua cadeia produtiva (BRITO, 1993; MACHADO *et al.*, 2014).

Pensando em carvão vegetal para uso doméstico, grande parte é produzida por pequenos produtores, de forma rudimentar e com pouca tecnologia envolvida, o que acarreta na formação de um produto de qualidade duvidosa que não sofre nenhuma caracterização antes da comercialização (COSTA *et al.*, 2019). No entanto, algumas propriedades são muito importantes, como o carvão vegetal não deve ser muito duro, deve ser facilmente inflamável, com alto teor de carbono fixo, baixo teor de cinzas, além de apresentar baixa emissão de fumaça, ou seja, baixo teor de materiais voláteis (ANATER, 2017; BRITO e BARRICHELO, 1981).

No Brasil, a resolução nº 40 SAA/2015, instituída pela Secretaria de Agricultura e Abastecimento do Estado de São Paulo, define padrões mínimos de qualidade para o carvão vegetal de uso doméstico ser apto ao recebimento do selo *Premium*. Dentre outros aspectos de cunho social e ambiental, o controle de qualidade preconiza que o

material apresente umidade abaixo de 5%, teor de carbono fixo superior a 73%, teor de materiais voláteis abaixo de 25,5% e teor de cinzas inferior a 1,5% (BRASIL, 2015).

Já para carvão vegetal para uso siderúrgico, a granulometria é um fator importante, uma vez que há indicações de que o calibre médio do carvão deve ser o triplo do minério para que haja a máxima vazão de gases sem perigo de fluidização do redutor. A densidade também é uma variável muito importante e reflete diretamente na produtividade do alto-forno, além da resistência mecânica do carvão vegetal, que diz respeito ao fato de carvões menos resistentes serem mais facilmente degradados (BRITO, 1993).

Em relação à análise imediata, assim como acontece no carvão doméstico, na siderurgia espera-se utilizar um carvão vegetal com elevados teores de carbono fixo e, conseqüentemente, menor presença de materiais voláteis. Dessa forma, as fissuras decorrentes da eliminação destes materiais durante o aquecimento tendem a ser menores, reduzindo a produção de finos no alto forno (BRITO, 1993).

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Amostragem e avaliação da madeira

##### 3.1.1 Coleta e preparo das amostras de madeira

Para realização do estudo e para garantir uma amostragem representativa do local e da madeira, foram amostradas árvores de diferentes materiais clonais de *Eucalyptus* spp. com idade média de cinco anos, provenientes de plantios localizados no semiárido nordestino, na região Sudoeste do estado da Bahia. A área de coleta é caracterizada por apresentar um relevo plano a levemente ondulado, clima classificado como Cwb (tropical de altitude), segundo a classificação de Köppen, com média de temperatura de 21 °C e precipitação anual de 700 mm (OLIVEIRA *et al.*, 2020).

Foram abatidas um total de 18 árvores, das quais foram retirados toretes em três posições do tronco, 0%, 50% e 100% da altura comercial (diâmetro mínimo = 8 cm). De cada torete foi retirado um disco e os mesmos transformados em amostras com dimensões de 30 mm x 30 mm x 60 mm (altura x largura x comprimento). Todas as amostras retiradas foram igualmente misturadas afim de homogeneizar o material (*mix* de madeira) e, em seguida, retirou-se amostras dessa mistura para realização das análises da madeira e posteriormente do carvão vegetal.

##### 3.1.2 Caracterização da madeira

A caracterização do *mix* de madeira foi realizada com base na densidade básica determinada a partir do método da balança hidrostática, norma NBR 11941 (ABNT, 2003).

A composição química da madeira foi determinada em material seco e livre de extrativos preparado a partir de extração dos extrativos totais e quantificação em aparelho Soxhlet. A primeira etapa consistiu em uma extração utilizando uma solução de álcool/tolueno (1:2) e a segunda etapa foi realizada com água desmineralizada, segundo a norma TAPPI T204 cm-97 (adaptado) (TAPPI, 1997). Os teores de lignina

solúvel e insolúvel da madeira foram determinados conforme a norma TAPPI T222 om-02 (TAPPI, 2002) em base seca livre de extrativos. O teor de lignina total foi obtido por meio do somatório da lignina solúvel e insolúvel. O teor de holocelulose foi determinado por diferença entre a massa de amostra inicial (100%) e o somatório entre a lignina total e extrativos totais.

Para determinação da umidade, amostras de madeira foram pesadas em uma balança analítica de precisão e secas em estufa a  $103 \pm 2$  °C até massa constante. Posteriormente, procedeu-se a determinação dos teores de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas. Para tal, amostras de madeira foram trituradas e classificadas em peneiras de 40/60 *mesh*, conforme a norma NBR 6923 (ABNT, 1981) e as frações retidas na peneira de 60 *mesh* foram secas em estufa a  $103 \pm 2$  °C. Para a determinação dos teores de carbono fixo, materiais voláteis e cinzas, em base seca, adotou-se os procedimentos da norma D1762-84 (ASTM, 2021). Utilizou-se um forno tipo mufla microprocessado Quimis modelo Q318M24.

Para compreender a degradação térmica da madeira, realizou-se a análise termogravimétrica (TGA) em um equipamento Labsys evo marca Setaram com taxa de aquecimento de  $5$  °C  $\text{min}^{-1}$  a partir de aproximadamente 4 mg de madeira com granulometria de 60 *mesh*. A análise durou 130 min e os termogramas foram produzidos a partir da temperatura ambiente (25°C) em atmosfera de gás nitrogênio com vazão de 1,8 bar até a temperatura de 650 °C.

Para caracterizar a estrutura cristalina da madeira, realizou-se a análise de difração de raios-X (DRX). Os difratogramas de raios-X foram registrados a partir de amostras com granulometria de 60 *mesh* em difratômetro Rigaku MiniFlex600-C, com ângulo de difração de  $2\theta$ , variando de 5° a 85° em passos de 20° e taxa de varredura de  $0,5$  °C  $\text{min}^{-1}$ . O índice de cristalinidade e o percentual de regiões amorfas foram calculados a partir do *software Match! – Phase Analysis using Powder Diffraction*.

Para determinação do poder calorífico superior (PCS) foram utilizados 0,30 g de amostra absolutamente seca em triplicata, utilizando uma bomba calorimétrica isotérmica modelo IKA C200, conforme a norma EN 14918 (DIN, 2010). A transformação dos valores do PCS para poder calorífico inferior (PCI) foi realizada com base na Equação 1, que considera 6% o teor de hidrogênio (H) presente no material (BRITO, 1993b).

$$PCI = PCS - 600 * \frac{9H}{100} \quad \text{Equação 1}$$

Em que: PCI = poder calorífico inferior (kcal/kg); PCS = poder calorífico superior (kcal/kg); H = percentual de hidrogênio (%).

O poder calorífico útil foi estimado com base na Equação 2:

$$PCU = PCI \left( \frac{100-U}{100} \right) - 6 * U \quad \text{Equação 2}$$

Em que: PCU = poder calorífico útil (kcal/kg); PCI = poder calorífico inferior (kcal/kg); U = umidade (%).

### 3.2 Processo de carbonização da madeira

Cerca de 420 g de amostras de madeira secas em estufa a  $103 \pm 2$  °C, de aproximadamente 30 mm x 30 mm x 60 mm de dimensões, foram inseridas em reator metálico de 1,34 dm<sup>3</sup>. As carbonizações foram realizadas em um forno elétrico tipo mufla com condensador resfriado à água e coletor de gases condensáveis (Figura 5).

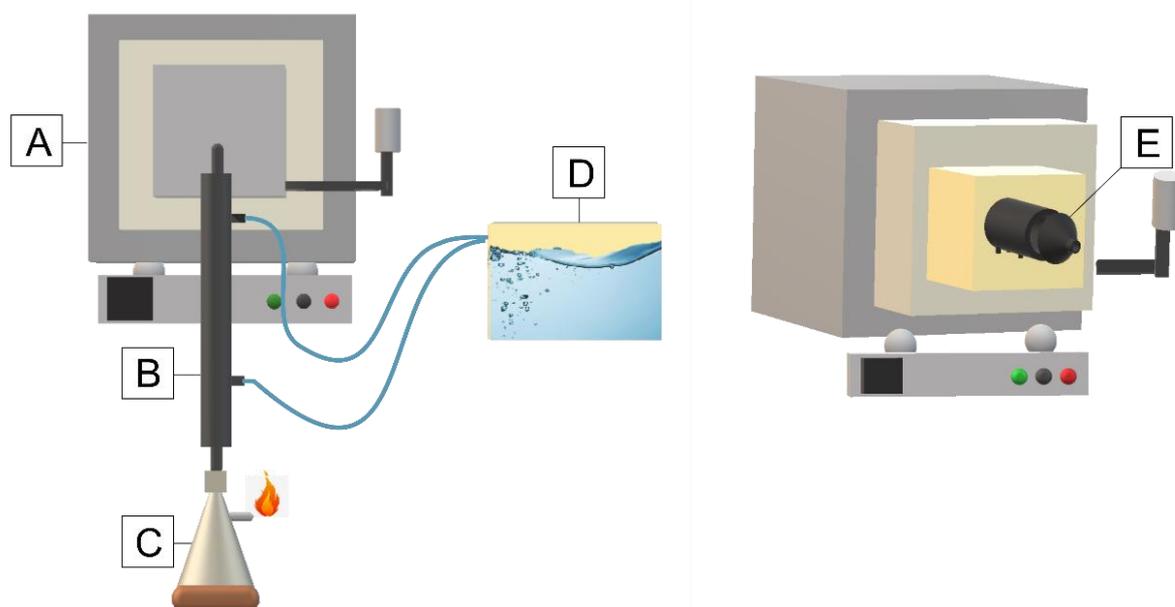


Figura 5. Sistema de carbonização em que: A) forno tipo mufla; B) condensador; C) coletor de gases condensáveis; D) água fria; E) reator metálico.  
Fonte: a autora (2021).

Para avaliar o efeito das variáveis de processo nas propriedades do carvão vegetal, a carbonização foi realizada com três tempos totais e três temperaturas finais

(Tabela 1), totalizando nove tratamentos. Cada carbonização se iniciou a partir de 50 °C e foram realizadas cinco repetições de cada tratamento, perfazendo um total de 45 carbonizações.

Tabela 1. Planejamento experimental das carbonizações

Temperatura final	Tempo total de carbonização
300°C <sup>1</sup>	4h
	5h
	7h
450°C <sup>2</sup>	4h
	5h
	7h
600°C <sup>3</sup>	4h
	5h
	7h

Em que: <sup>1,2,3</sup> tempo até a temperatura: 75 min, 120 min e 165 min respectivamente.

Em relação aos rendimentos do processo de carbonização, a determinação do rendimento gravimétrico em carvão vegetal (RCV) foi realizada obedecendo a Equação 3:

$$RCV = \frac{M_c}{M_m} * 100 \quad \text{Equação 3}$$

Em que: RCV = rendimento em carvão vegetal (%); M<sub>c</sub> = massa seca do carvão (g); M<sub>m</sub> = massa seca da madeira (g).

Para determinar o rendimento de gases condensáveis (RGC) utilizou-se a Equação 4:

$$RGC = \frac{M_l}{M_m} * 100 \quad \text{Equação 4}$$

Em que: RGC = rendimento de gases condensáveis (%); M<sub>l</sub> = massa de gases condensáveis (g); M<sub>m</sub> = massa seca da madeira (g).

O rendimento de gases não condensáveis (RNC) foi determinado segundo a Equação 5:

$$RNC = 100 - (RCV + RGC) \quad \text{Equação 5}$$

Em que: RNC = rendimento de gases não condensáveis (%); RCV = rendimento gravimétrico em carvão vegetal (%); RGC = rendimento de gases condensáveis (%).

### 3.3 Caracterização do carvão vegetal

A densidade aparente foi determinada seguindo as diretrizes da norma NBR 11941 (ABNT, 2003), pela imersão de peças de carvão vegetal em água. Em seguida, as amostras foram colocadas em estufa a  $103 \pm 2$  °C e, após secas, retiradas da estufa e pesadas em balança analítica (Apêndice A). A densidade aparente foi calculada com cinco repetições a partir da relação entre a massa seca da amostra.

A determinação da densidade a granel foi realizada conforme a norma ASTM D5057-17 (ASTM, 2017), utilizando uma caixa de 1356,6 cm<sup>3</sup> e carvão vegetal com granulometria de 16 mm. Devido a homogeneidade do carvão vegetal, o ensaio foi realizado com apenas uma repetição, afim de descrever o material.

A porosidade foi conduzida de acordo com a norma NBR 9165 (ABNT, 1985). O cálculo para determinação da porosidade foi realizado a partir da Equação 7.

$$P = \left(1 - \frac{DA}{DV}\right) * 100 \quad \text{Equação 7}$$

Em que: P = porosidade (%); DA = densidade aparente do carvão vegetal (g/cm<sup>3</sup>); DV = densidade verdadeira do carvão vegetal (g/cm<sup>3</sup>).

A determinação da umidade e análise imediata foi realizada seguindo as mesmas metodologias citadas para a madeira. Para determinar o estoque em carbono fixo utilizou-se a Equação 8:

$$ECF = DA * \left(\frac{TCF}{100}\right) \quad \text{Equação 8}$$

Em que: ECF = estoque em carbono fixo (kg/m<sup>3</sup>); DA= densidade relativa aparente (kg/m<sup>3</sup>); TCF = teor de carbono fixo (%).

Os poderes caloríficos superior, inferior e útil foram avaliados seguindo as mesmas metodologias citadas para a madeira. A densidade energética do carvão vegetal foi obtida conforme a Equação 9.

$$DE = DG * \left(\frac{PCU}{10^6}\right) \quad \text{Equação 9}$$

Em que: DE = densidade energética do carvão vegetal (Gcal/m<sup>3</sup>) DG= densidade a granel do carvão vegetal (kg/m<sup>3</sup>); PCU = poder calorífico útil (Kcal/kg).

Afim de avaliar o desempenho do carvão vegetal durante o processo de combustão, realizou-se a determinação do índice de combustibilidade (ICOM) seguindo os procedimentos adotados por Quirino e Brito (1991) e Dias Júnior *et al.* (2015). O aparato utilizado foi dotado de um combustor de 3,30 dm<sup>3</sup>, uma proteção de folha de alumínio para reduzir a entrada de oxigênio no sistema, um termômetro digital modelo SALVTERM 1200 e uma balança digital Bel L16001 (Figura 6).

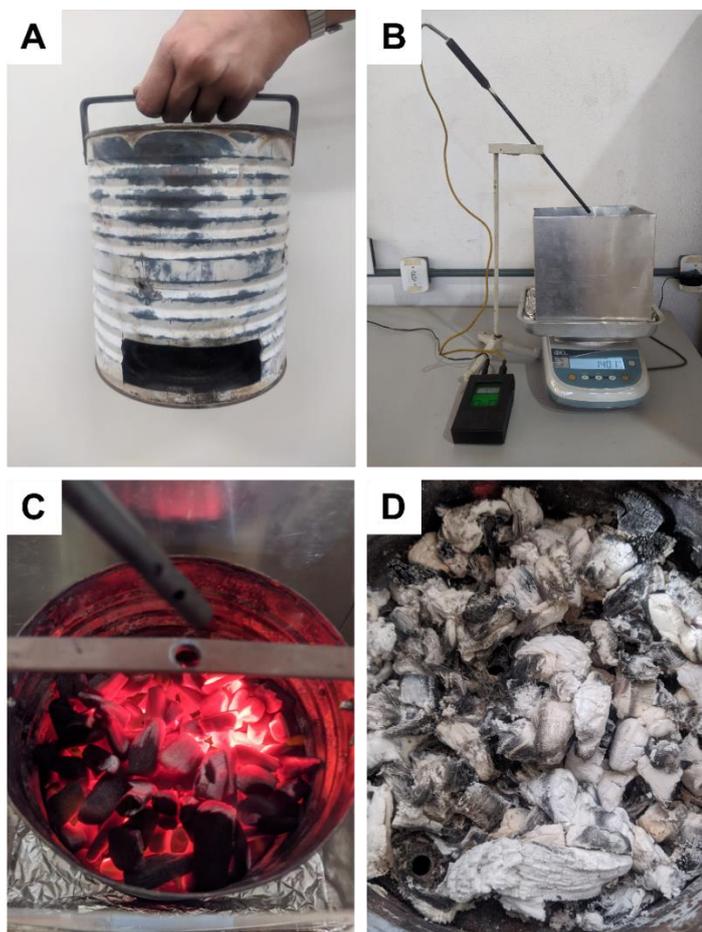


Figura 6. Sistema do teste de combustibilidade do carvão vegetal; A) combustor; B) conjunto combustor, base, balança e termômetro; C) posição do termômetro digital e combustão do carvão vegetal em andamento; D) final da combustão. Fonte: a autora (2021).

Foram utilizados  $149 \pm 1,22$  g de carvão vegetal seco em granulometria homogênea de 16 mm, conforme sugerido por Dias Júnior *et al.* (2015a). A ignição foi realizada utilizando 4,5 g de álcool anidro 96° INPM. A temperatura alcançada e a massa consumida ao longo do teste foram registradas a cada 3 minutos. O início do teste foi considerado a partir da volatilização do álcool no sistema (2 minutos e 41

segundos) e o final foi determinado a partir da completa combustão do material, após o sistema não apresentar variação de massa por 5 leituras consecutivas. O Índice de Combustibilidade foi calculado com uma repetição conforme a Equação 10:

$$ICOM = \frac{A*B}{100*C} \quad \text{Equação 10}$$

Em que: ICOM = índice de combustibilidade; A = porcentagem do tempo no qual a temperatura permaneceu acima de 150 °C em relação ao tempo (min) total de combustão; B = porcentagem da temperatura máxima atingida no teste em relação à temperatura de 150 °C; C = porcentagem da massa total consumida gerando temperaturas acima de 150 °C.

Para compreender a variação da massa da do carvão vegetal em relação à temperatura, realizou-se a análise termogravimétrica (TGA) em um equipamento Labsys evo marca Setaram com taxa de aquecimento de 5 °C min<sup>-1</sup> a partir de aproximadamente 4 mg de carvão vegetal com granulometria de 60 *mesh*. Os termogramas foram produzidos a partir da temperatura ambiente (25°C) em atmosfera de gás nitrogênio com vazão de 1,8 bar até a temperatura de 1000 °C. O tempo de duração foi de 200 min.

Para caracterizar a estrutura cristalina do carvão vegetal, realizou-se a análise de difração de raios-X (DRX). Os difratogramas de raios-X foram registrados a partir de amostras com granulometria de 60 *mesh* em difratômetro Rigaku MiniFlex600-C, com ângulo de difração de 2θ, variando de 5° a 85° em passos de 20° e taxa de varredura de 0,5 °C min<sup>-1</sup>.

O teste de friabilidade do carvão vegetal foi realizado a partir do teste de tamboramento, afim de determinar a resistência à abrasão provocada durante o transporte e manuseio do material. Utilizou-se um friabilômetro ajustado para girar em torno de seu eixo a 30 rotações por minuto, por um tempo total de 5 minutos (Apêndice B). As amostras de carvão vegetal foram pesadas antes do teste, perfazendo um total de aproximadamente 300 g. Após 150 rotações, o material foi retirado, peneirado e pesado. O carvão vegetal que passou pela malha de 8 mm foi considerado como finos. O percentual de peso perdido nesse processo correspondeu à friabilidade do carvão, conforme a Equação 11:

$$F = \frac{P_f}{P_i} * 100 \quad \text{Equação 11}$$

Em que: F = friabilidade (%);  $P_i$  = peso inicial da amostra de carvão vegetal (g); e  $P_f$  = Peso final da amostra de carvão vegetal (g).

### 3.4 Análise dos dados

Os dados foram submetidos aos testes de normalidade (Shapiro-Wilk) e de homocedasticidade (Bartlett). Realizou-se a análise de variância seguindo um delineamento inteiramente aleatorizado com 9 tratamentos, compreendido por três variáveis respostas relacionadas ao tempo de carbonização (4h, 5h e 7h) e três variáveis respostas relacionadas à temperatura final (300 °C, 450 °C e 600°C). Quando houve efeito significativo das variáveis independentes (temperatura e tempo de carbonização) nas variáveis resposta (propriedades analisadas) modelos de regressão foram ajustados. Gráficos de superfície de resposta foram confeccionados para os modelos de regressão quadrática.

A Análise de Componentes Principais foi realizada afim de explorar possíveis agrupamentos de dados, onde os mesmos foram normalizados a partir de uma matriz de covariância. É uma técnica de estatística multivariada que permite identificar padrões em dados e expressá-los segundo suas semelhanças e diferenças, apresentando como vantagem a possibilidade de agrupá-los para explicar a estrutura da variância total (HONGYU; SANDANIELO; OLIVEIRA JUNIOR, 2016; SMITH, 2002). Posteriormente, realizou-se um agrupamento hierárquico da ligação média entre grupos (UPGMA) para formação de *clusters* e avaliação de similaridade entre os grupos.

Todas as análises foram executadas a 95% de probabilidade. Medidas de dispersão do desvio padrão foram fornecidas para melhor entender o intervalo de confiança obtido para cada variável estudada. O *software* R (R CORE TEAM, 2020) foi utilizado para todas as análises estatísticas.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Caracterização da madeira

A densidade básica da madeira é um dos principais critérios a ser considerada quando se pensa na seleção de matérias-primas para a geração de energia (PEREIRA *et al.*, 2012; PROTÁSIO *et al.*, 2021), uma vez que impacta diretamente no comportamento do carvão vegetal como combustível (MCKENDRY, 2002). O *mix* de madeira analisada no presente estudo apresentou densidade básica média de 500 kg/m<sup>3</sup>, variando entre 475 kg/m<sup>3</sup> e 558 kg/m<sup>3</sup>. Esse valor está de acordo com o encontrado na literatura para madeiras de clones de *Eucalyptus* spp. estudados com finalidades energéticas (PROTÁSIO *et al.*, 2021; SANTOS *et al.*, 2011; SILVA; FORTES; SETE JUNIOR, 2018). A literatura sugere que madeiras destinadas à produção energética devem apresentar densidade básica igual ou superior a 500 kg/m<sup>3</sup> (PROTÁSIO *et al.*, 2017; SANTOS *et al.*, 2011; TRUGILHO *et al.*, 2001). Dessa maneira, a madeira desse estudo pode ser aplicada para fins energéticos.

Em relação à composição química, a madeira apresentou um teor de lignina total de 29,2% ( $\pm 0,18$ ) (base seca), valor considerado satisfatório à geração de energia, uma vez que valores acima de 28% de lignina da madeira são indicativos de que a carbonização terá um rendimento em carvão vegetal e que o mesmo apresentará bom desempenho energético (DUFOURNY *et al.*, 2019; PEREIRA *et al.*, 2013a; PROTÁSIO *et al.*, 2017). O valor encontrado é semelhante ao encontrado por outros estudos que avaliaram clones de *Eucalyptus* spp. (PROTÁSIO *et al.*, 2020; SANTOS *et al.*, 2011). Esse é um parâmetro importante a ser avaliado na produção e qualidade de carvão vegetal, visto que está entre os compostos da madeira mais importantes e é o que apresenta a maior resistência à degradação térmica (PEREIRA *et al.*, 2013b; YANG *et al.*, 2007).

Extrativos são macromoléculas complexas com variada massa molecular e degradação térmica entre 250 e 505 °C (MÉSZÁROS *et al.*, 2007) que contribuem positivamente com o potencial energético da biomassa (MENCCELLI *et al.*, 2019) e afetam diretamente a produção de carvão vegetal (PROTÁSIO *et al.*, 2021b). O teor de extrativos encontrado nesse estudo foi de 5,16% ( $\pm 0,19$ ) e está em conformidade

com o observado em outros estudos que avaliaram clones de *Eucalyptus* spp. para finalidade energética (CASTRO, 2011; PEREIRA *et al.*, 2012; SANTOS *et al.*, 2011; VIEIRA, 2019).

A holocelulose corresponde à maior fração química da madeira, uma vez que é formada pelos compostos celulose e hemiceluloses. São componentes que apresentam elevada instabilidade térmica (SANTOS, 2010; SHAFIZADEH, 1985) e colaboram diretamente com o aumento de gases condensáveis e não condensáveis, proporcionando a volatilização do carbono (SANTOS, 2010). Dessa forma, não são desejáveis em grande quantidade quando se pensa em madeiras para o processo de carbonização. O teor de holocelulose encontrado nessa pesquisa ( $65,7\% \pm 0,25$ ) foi semelhante ao analisado por outros pesquisadores em clones de eucalipto para energia (PEREIRA *et al.*, 2012; PROTÁSIO *et al.*, 2014; VIEIRA, 2019).

A respeito da análise imediata, o teor de materiais voláteis ( $82,58\% \pm 0,65$ ), cinzas ( $0,67\% \pm 0,13$ ) e carbono fixo ( $16,75\% \pm 0,74$ ) demonstraram similaridade a outras madeiras comerciais de eucalipto analisadas para fins energéticos (NEVES *et al.*, 2011); VIEIRA, 2019). Quanto maior a relação materiais voláteis/carbono fixo maior tende ser a intensidade da combustão (GARCÍA *et al.*, 2013), além de proporcionar maior poder calorífico da biomassa. As cinzas são constituintes inorgânicos que representam cerca de 1% da massa seca da madeira. Quando apresentados em altos valores, podem ser prejudiciais à geração de energia, uma vez que são componentes que não se degradam na combustão, contribuindo com a redução do poder calorífico do material (VIEIRA, 2019).

O comportamento da madeira proveniente da mistura de clones de eucalipto provenientes do Sudoeste baiano frente análise termogravimétrica (TG) e sua derivada (DTG) está apresentado na Figura 7.

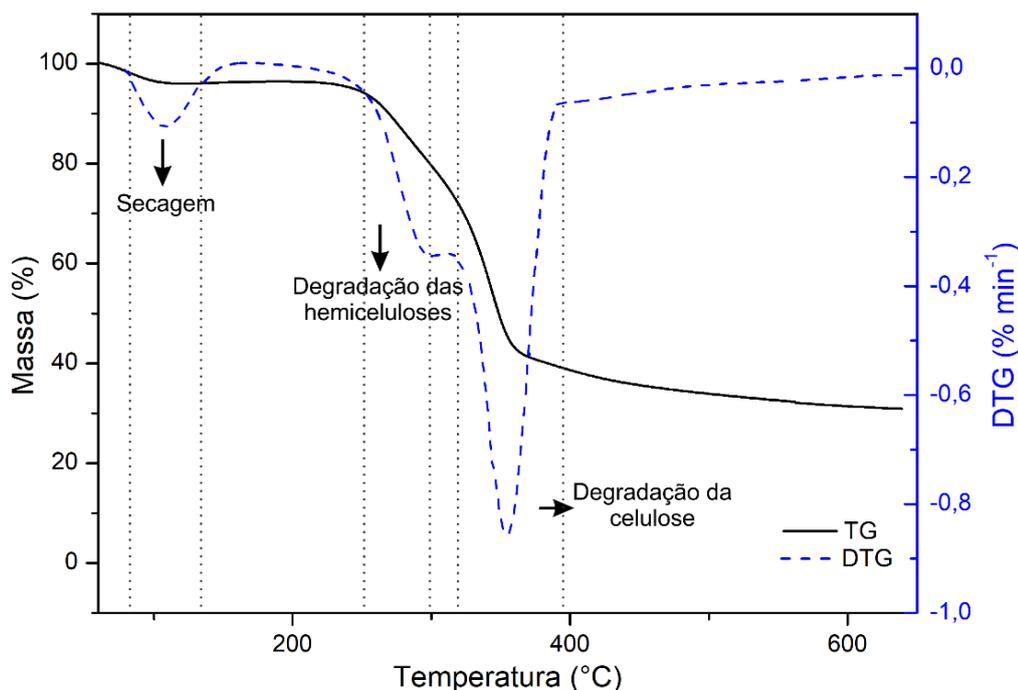


Figura 7. Curva termogravimétrica (TG) e sua derivada (DTG) da madeira oriunda da mistura de clones de *Eucalyptus*.

As curvas TG/DTG, de maneira geral, indicam três faixas de degradação térmica, sendo a primeira (fase I) atribuída à fase de secagem da madeira (perda de água de adesão), a segunda (fase II) à degradação das hemiceluloses (220 – 315 °C) e a terceira (fase III) à degradação da celulose (315 – 400 °C) (PEREIRA *et al.*, 2013a; PROTÁSIO *et al.*, 2017; SHAFIZADEH, 1985; YANG *et al.*, 2007). As curvas da análise termogravimétrica desse estudo corresponderam com pesquisadas relatadas na literatura (BIAGINI; BARONTINI; TOGNOTTI, 2006; PEREIRA *et al.*, 2013a; SHAFIZADEH, 1985) com pico de secagem entre 80 °C e 137 °C, degradação de hemiceluloses entre 259 °C e 297 °C e de celulose na faixa de 310 °C a 378 °C. Após essas faixas de temperaturas, observou-se redução da degradação térmica da madeira devido à degradação de lignina. A partir de 400 °C os componentes químicos em maior proporção na madeira, celulose e hemiceluloses, já foram degradados (PEREIRA *et al.*, 2013a; SHAFIZADEH, 1985).

Na fase I compreendida na faixa de degradação térmica de 50 a 100°C e correspondente à fase de secagem da madeira, foi observado perda de massa de 3,84%, com pico apresentado pela curva DTG entre 80 °C e 137 °C. Esta fase é considerada endotérmica, caracterizada pela perda da água de adesão presente na parede celular realizada mediante absorção de energia (VIEIRA, 2019). Estudos da

degradação térmica da madeira de eucalipto realizados por Pereira *et al.* (2013a) e Vieira (2019) mostraram perda de massa na fase de secagem superior à madeira desse estudo, de 6,47% e 6,21% respectivamente.

Para a fase II, faixa de temperatura entre 100 e 250 °C houve perda de massa de 2,19%. Nessa faixa não é esperado que ocorra degradação térmica expressiva, uma vez que os componentes da madeira são termicamente estáveis nesse intervalo quando não são expostos ao calor por longos períodos de tempo (PEREIRA, 2012; RAAD; PINHEIRO; YOSHIDA, 2006).

Por fim, a fase III, entre 250 e 400 °C, apresentou valores de perda de massa média de 55,71%. A maior parte dessa massa perdida é atribuída à degradação das hemiceluloses (pico na curva DTG entre 259 °C e 297 °C) e da celulose (pico na curva DTG entre 310 °C a 378 °C). Para a faixa de degradação térmica entre 400 e 600°C observou-se uma perda de massa média de 7,23% ocasionada, provavelmente, a partir da degradação térmica da lignina, uma vez que a partir de 400 °C os componentes químicos presentes em maior proporção na madeira, celulose e hemiceluloses, já foram degradados (PEREIRA *et al.*, 2013a; SHAFIZADEH, 1985). A Figura 7 não apresentou o pico de degradação da lignina devido ao fato de sua decomposição térmica ocorrer em ampla faixa de temperatura, apesar de uma pequena fração se decompor em temperaturas inferiores a 450 °C (MÜLLER - HAGEDORN *et al.*, 2003; YANG *et al.*, 2007; YU; WANG; SUN, 2021).

A análise de difração de raios-x da madeira analisada está apresentada na Figura 8.

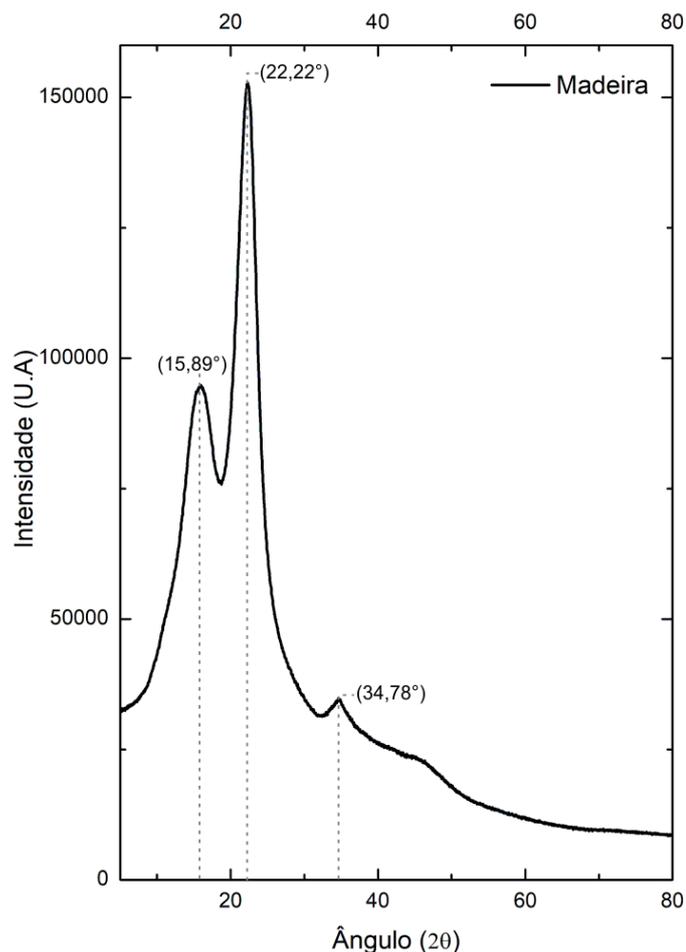


Figura 8. Padrões do difratograma de raios-x da madeira oriunda da mistura de clones de *Eucalyptus*.

A madeira estudada apresentou picos nos planos cristalográficos nos seguintes ângulos de Bragg ( $2\theta$ ): 15,89°; 22,22° e 34,78°, apresentando comportamento característico de materiais lignocelulósicos (ALMEIDA; SARDELA; LAHR, 2019; PEREIRA, 2012) e de outras madeiras de eucalipto que também apresentaram picos largos de difração próximos a 20° e 40° (MUNIR *et al.*, 2020; XIAO *et al.*, 2020). Além disso, apresentou índice de cristalinidade de 28,93%.

A análise de difração de raios-X (DRX) possibilita o estudo da cristalinidade de materiais (AHVENAINEN; KONTRO; SVEDSTRÖM, 2016; ALMEIDA; SARDELA; LAHR, 2019) de maneira não destrutiva e robusta (ALMEIDA; SARDELA; LAHR, 2019; LINDNER *et al.*, 2015). Nesse contexto, de modo geral, a madeira analisada se configura como resistente à degradação térmica, uma vez que se pressupõe que madeiras com altos índices de cristalinidade apresentem esse comportamento, hipótese que está atrelada a pesquisas que comprovam que as regiões amorfas da

celulose são mais susceptíveis à ação do calor e menos estáveis termicamente quando comparadas às regiões cristalinas (BASCH; LEWIN, 1974; KIM; EOM; WADA, 2010; MAJOR, 1958).

Em relação ao poder calorífico, a madeira analisada apresentou poder calorífico superior de 19,47 MJ/kg ( $\pm 0,09$ ), seguido de 18,11 MJ/kg ( $\pm 0,09$ ) de poder calorífico inferior e 18,10 MJ/kg ( $\pm 0,09$ ) de poder calorífico útil. O poder calorífico é um dos principais parâmetros de avaliação da potencialidade energética da madeira (FRIEDL *et al.*, 2005; PARIKH *et al.* (2005), de modo que madeiras com elevado poder calorífico liberam mais energia no processo de combustão. Nesse sentido, a umidade também exerce papel fundamental e deve ser a menor possível, uma vez que madeiras com alta umidade reduzem o poder calorífico útil do carvão vegetal e a temperatura na câmara de combustão com conseqüente perda da eficiência, aumento no consumo de biomassa e de emissões atmosféricas (WIECHETECK, 2009). A madeira deste estudo apresentou umidade de 10,8%.

#### **4.2 Efeito das variáveis da carbonização sobre os rendimentos gravimétricos**

Os rendimentos gravimétricos obtidos da carbonização da madeira em diferentes temperaturas finais estão dispostos na Figura 9.

Os rendimentos resultantes dos processos de carbonização testados não apresentaram diferenças significativas para os tempos analisados. Em relação à temperatura, observou-se que o rendimento em carvão vegetal diminuiu à medida que se aumentou a temperatura, apresentando rendimento de 34,75% a 300 °C, 30,03% na temperatura intermediária de 450 °C e de 28,03% a 600 °C. Esse comportamento corrobora com o que é relatado em outros estudos (DIAS JUNIOR *et al.*, 2020; DUFOURNY *et al.*, 2019; WEBER; QUICKER, 2018) e ocorre em razão do aumento da temperatura facilitar a dissociação do carvão vegetal com a liberação de gases e gaseificar parte da sua estrutura sólida, acarretando em aumento dos rendimentos de gases e líquidos (ASSIS *et al.*, 2016; FARIA, 1984). Nesse sentido, o rendimento em gases condensáveis se manteve parcialmente estável entre 300 (36,13%) e 450 °C (36,35%), com tendência de aumento até os 600 °C (37,76%), haja vista que altas temperaturas condensam gases, fomentando o aumento de líquido pirolenhoso (ASSIS *et al.*, 2016; FARIA, 1984). Para os gases não condensáveis, observou-se

maiores rendimentos nas carbonizações conduzidas a 450 e 600 °C, 33,61% e 34,22% respectivamente, seguidas por 29,12% aos 300 °C.

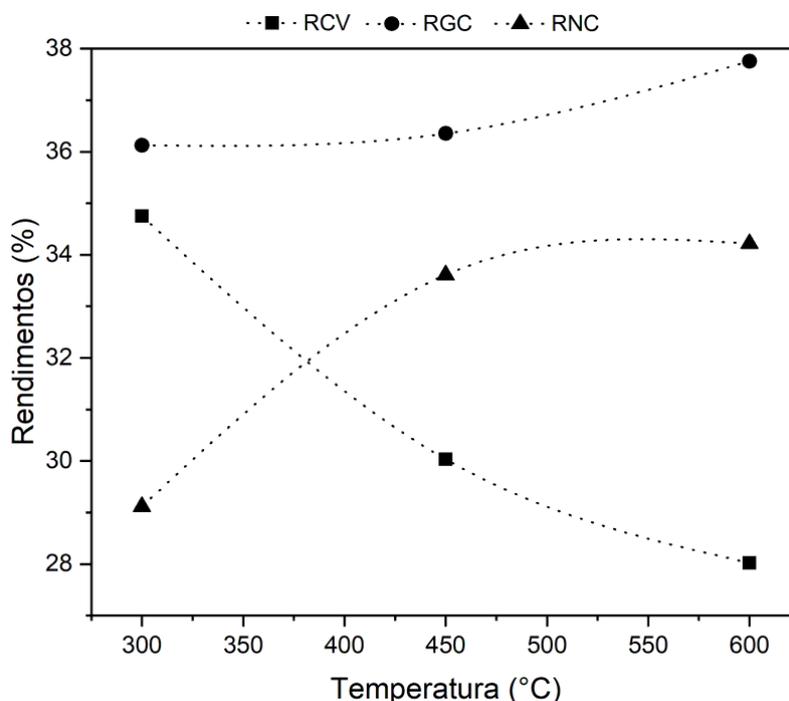


Figura 9. Rendimentos dos produtos da carbonização de *Eucalyptus* spp. Em que: RCV = rendimento em carvão vegetal (%); RGC = rendimento de gases condensáveis (%); RNC = rendimento de gases não condensáveis (%). Equações de regressão: RCV =  $52,35 + 6,0363e-5 - 7,675e-2TPR$ ,  $R^2_{aj} = 0,9466$  (p-valor < 0,001); RGC =  $41,03 - 0,022427TPR$ ,  $R^2_{aj} = 0,8978$  (p-valor < 0,001); RNC =  $24,66856 - 0,01699TPR$ ,  $R^2_{aj} = 0,2180108$  (p-valor < 0,001); TPR = temperatura final.

#### 4.3 Efeito das variáveis de processo nas propriedades do carvão vegetal

O comportamento da densidade aparente do carvão vegetal frente aos tempos totais e as temperaturas finais de carbonização está disposto na Figura 10, bem como a superfície de resposta do modelo de regressão ajustado.

Observou-se que o aumento da densidade aparente do carvão vegetal está atrelado à sua exposição a temperaturas altas desde que seja associado a tempos reduzidos de carbonização. A influência da temperatura final de carbonização é discutida na literatura a partir da análise acerca das variações sobre a massa e o volume: é relatado que a elevação da temperatura provoca uma perda de massa e variações dimensionais no carvão vegetal (DIAS JUNIOR *et al.*, 2020; FARIA, 1984; TRUGILHO e SILVA, 2001) de modo que a redução da massa entre as temperaturas

de 300 °C a 500 °C seja superior à redução das dimensões volumétricas, acarretando na diminuição da densidade aparente (DIAS JUNIOR *et al.*, 2020; TRUGILHO e SILVA, 2001).

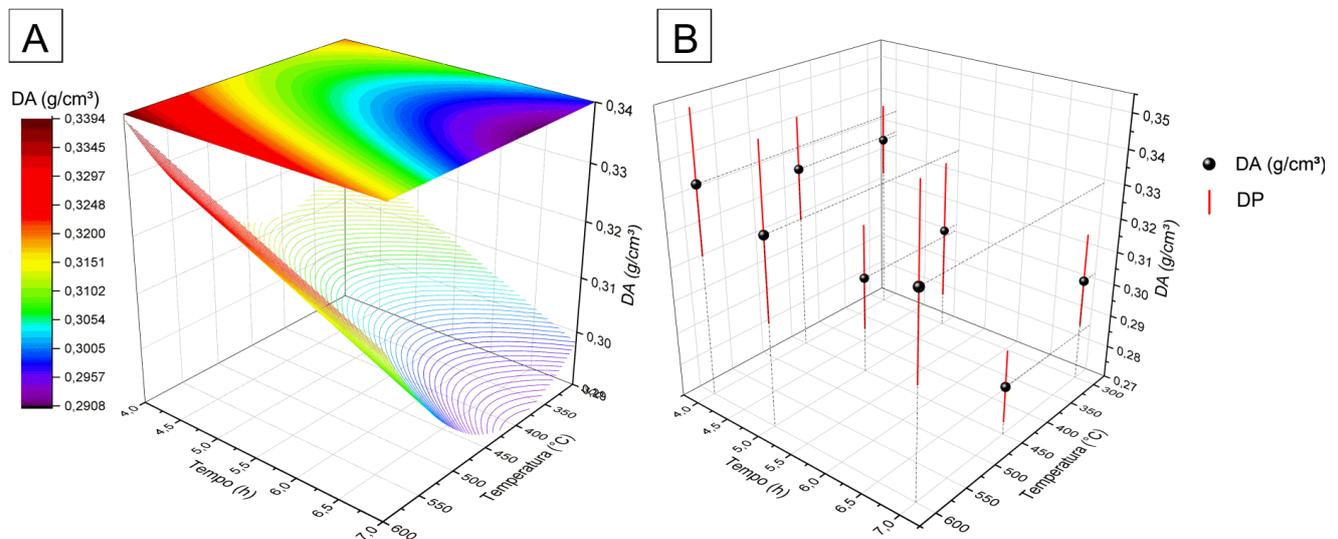


Figura 10. Comportamento da densidade aparente frente aos diferentes tempos totais e temperaturas finais de carbonização (A), média e desvio padrão (B). Em que: DA = densidade aparente (g/cm³); DP = Desvio Padrão. Equação de regressão:  $DA = 4,526e-01 - 7,110e-03TMP - 5,567e-04TPR + 6,919e-07TPR^2$ ,  $R^2_{aj} = 0,3175$  (p-valor < 0,001); TMP = tempo total; TPR = temperatura final.

A partir de 600 °C, a perda de massa passou a ser menor que a redução do volume do carvão vegetal, possivelmente devido ao rearranjo estrutural do carbono residual que levou a um aumento da densidade aparente do carvão vegetal (TRUGILHO e SILVA, 2001). Tal propriedade tem relação direta com a resistência mecânica do carvão, bem como estoques energéticos e de carbono fixo (MOUTINHO *et al.*, 2017; PROTÁSIO *et al.*, 2013).

Esses resultados indicaram que, tendo em vista a produção de carvão vegetal que apresente maior densidade aparente, deve haver aumento da temperatura final e redução do tempo de carbonização. Assim, conseqüentemente será obtido um biocombustível com maior densidade aparente, foco principalmente da siderurgia, setor que necessita de carvão vegetal de alta densidade aparente, pois, para um mesmo volume, a densidade está relacionada ao volume ocupado pelo mesmo no alto forno (MOUTINHO *et al.*, 2017; PROTÁSIO *et al.*, 2013).

Para a densidade a granel a média encontrada foi de 112,6 kg/m³, cerca de 56% inferior ao encontrado na literatura, onde a média é de aproximadamente 200

kg/m<sup>3</sup> (DIAS JÚNIOR; BRITO; ANDRADE, 2015; DONATO *et al.*, 2020; ISBAEX, 2014). Assim como na densidade aparente, espera-se obter carvão vegetal com alta densidade a granel. Trata-se de uma propriedade importante tanto a nível industrial como doméstico, pois determina o espaço útil que o material irá ocupar nos reatores de combustão (BRITO *et al.*, 1982).

Em relação à porosidade, não foram detectadas diferenças significativas entre os diferentes tratamentos, sendo a média 75,5% ( $\pm$  8,03). No entanto, a literatura indica que mesmo para amostras com porosidade similar, o tamanho dos poros influencia na adsorção de compostos solúveis pelo carvão vegetal, uma vez que os microporos são detentores de alto poder de capilaridade e aparecem em carvões produzidos sob elevadas temperaturas de carbonização (YU; YING; KOOKANA, 2006).

Sugere-se estudos mais aprofundados acerca dos aspectos morfológicos que possibilitem a análise mais apurada dos poros do carvão vegetal, como por exemplo o uso da microscopia eletrônica de varredura (MEV). Dessa forma, a análise descritiva da porosidade do carvão vegetal poderá fornecer subsídios à discussão acerca da influência das variáveis da carbonização no tamanho dos poros e consequente interferência nas aplicações comerciais do carvão vegetal.

A umidade do carvão vegetal apresentou interação entre os diferentes tempos totais e temperaturas finais de carbonização analisados. A Figura 11 mostra a superfície de resposta do modelo de regressão ajustado.

A distribuição dos dados e a superfície de resposta refletiram o acréscimo da umidade do carvão vegetal à medida em que houve aumento da temperatura final e do tempo total de carbonização. A umidade do carvão vegetal é atribuída à sua alta capacidade de absorção de água atmosférica e está diretamente relacionado à higroscopicidade (SIEBENEICHLER *et al.*, 2017), uma das características inerentes a esse material. De maneira geral, carvão vegetal produzido sob altas temperaturas acarretam em maior higroscopicidade e, conseqüentemente, em maior absorção de umidade (BOAS *et al.*, 2010).

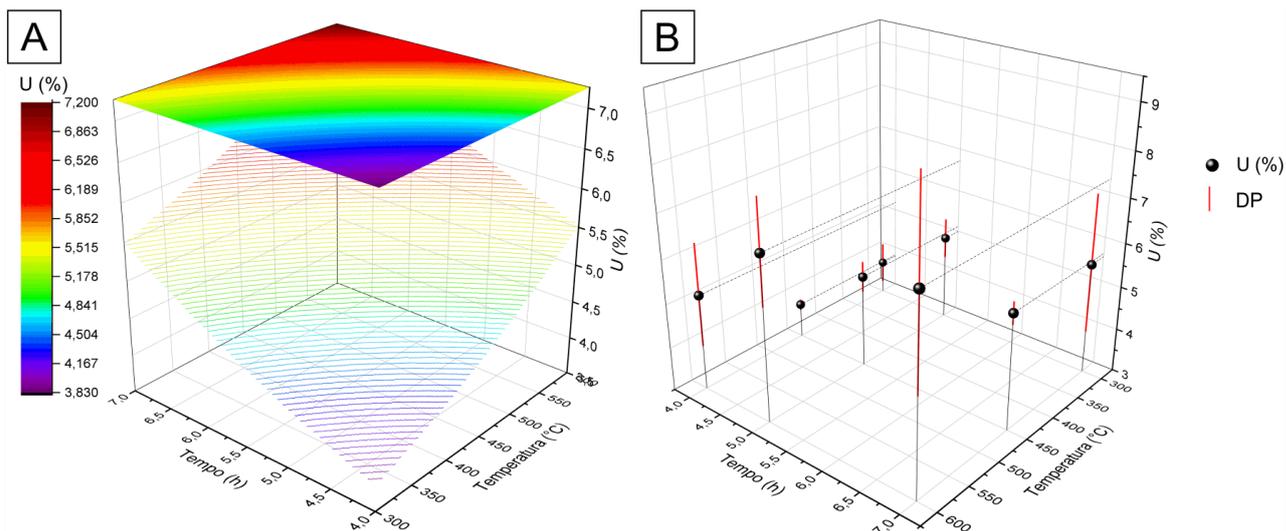


Figura 11. Umidade do carvão vegetal produzido em diferentes tempos totais e temperaturas finais de carbonização (A), média e desvio padrão (B). Em que: U = Umidade média (%); DP = desvio padrão. Equação de regressão:  $U = 2,452 + 5,057e-02TMP^2 + 6,300e-06TPR^2$ ,  $R^2_{aj} = 0,4396$  (p-valor < 0,001); TMP = tempo total; TPR = temperatura final.

Nesse sentido, a literatura apresenta alguns estudos que mostram a relação direta entre a capacidade do carvão vegetal de absorver água e a sua porosidade (BARCELLOS, 2007; DIAS JÚNIOR *et al.*, 2016; SIEBENEICHLER *et al.*, 2017). O aumento da quantidade de poros proporcionado por diferentes tempos e altas temperaturas de carbonização (BROWN *et al.*, 2006; ELYOUNSSI e HALIM, 2014) acarreta no aumento da área superficial do carvão vegetal e, como consequência, proporciona que moléculas de água sejam mais facilmente absorvidas (ELYOUNSSI e HALIM, 2014).

A umidade do carvão vegetal deve ser a menor possível, tanto para fins industriais como domésticos, pois está intimamente relacionada com a geração de finos e com desempenho energético. O comportamento obtido neste estudo (Figura 11) aponta que valores reduzidos de umidade podem ser obtidos quando o carvão vegetal é obtido sob baixas temperaturas final e tempos totais de carbonização.

Os resultados obtidos para a influência do processo de carbonização no teor de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas no carvão vegetal estão dispostos na Figura 12.

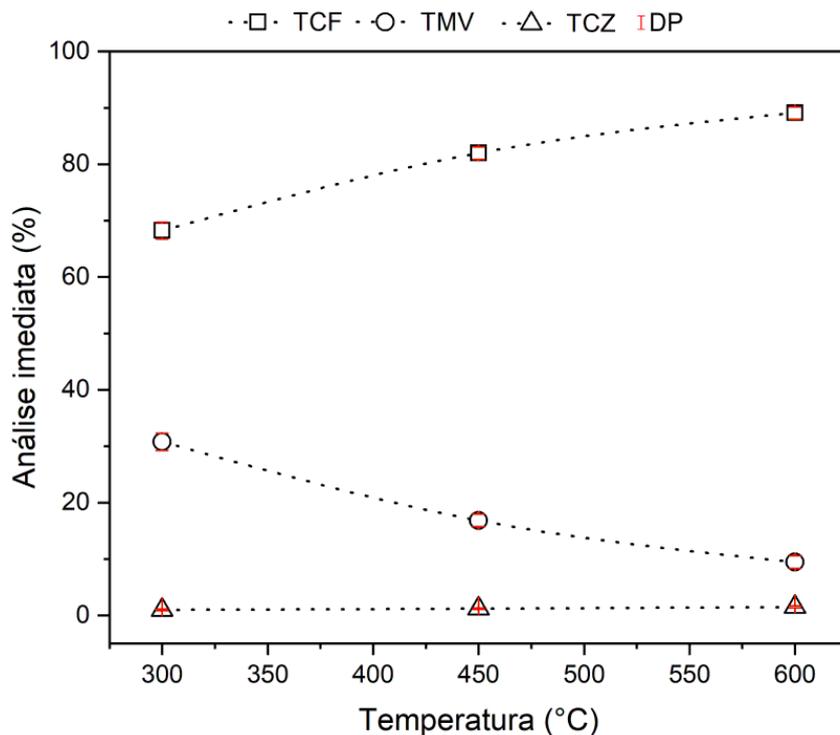


Figura 12. Análise imediata de carvão vegetal produzido sob diferentes temperaturas finais de carbonização. Em que: TCF = teor de carbono fixo (%); TMV = teor de materiais voláteis (%); TCZ = teor de cinzas (%); DP = Desvio Padrão. Equação de regressão:  $TCF = 48,466 + 0,0695TPR$ ,  $R^2_{aj} = 0,9489$  (p-valor < 0,001);  $TMV = 78,385 + 0,0001458TPR^2 - 0,2023578TPR$ ,  $R^2_{aj} = 0,9803$  (p-valor < 0,001);  $TCZ = 0,4779 + 0,001633TPR$ ,  $R^2_{aj} = 0,667$ ; TPR = temperatura final.

As reações que ocorrem durante a carbonização fazem com que a composição imediata do carvão vegetal seja totalmente influenciada pela temperatura final em que a madeira é submetida e os resultados encontrados foram similares ao encontrado em carvões de eucaliptos analisados em outras pesquisas (DIAS JUNIOR *et al.*, 2020; PROTÁSIO *et al.*, 2021; SILVA e ATAÍDE, 2019).

À medida em que houve aumento da temperatura de carbonização ocorreu redução considerável do teor de materiais voláteis (DIAS JUNIOR *et al.*, 2020; DUFOURNY *et al.*, 2019; TRUGILHO e SILVA, 2001), compostos majoritariamente por vapor d'água e dióxido de carbono (FARIA, 1984). Os resultados obtidos nesse estudo estão em conformidade com esse comportamento, de modo que a temperatura de 300 °C apresentou teor médio de materiais voláteis de 30,8%, enquanto que a temperatura final de 600 °C reduziu o teor de materiais voláteis para 9,4%. Trata-se de uma reação negativa ao carvão vegetal, pois, embora a redução de materiais voláteis ocorra simultaneamente ao aumento de carbono fixo, o carvão vegetal

produzido em elevada temperatura tende a apresentar maior dificuldade de combustão.

Dessa maneira, a correlação inversa entre a temperatura de carbonização e a quantidade de materiais voláteis é uma das razões da correlação direta observada entre a temperatura e a quantidade de carbono fixo (FARIA, 1984; TRUGILHO e SILVA, 2001). O carvão vegetal produzido a 600 °C apresentou 30,6% de carbono fixo a mais que o carvão vegetal produzido a 300 °C, demonstrando que o aumento da temperatura favorece a concentração de carbono nesse material.

O aumento da temperatura final da carbonização ocasionou um acréscimo do teor de cinzas do carvão vegetal, de modo a apresentar 0,98% quando produzido a 300 °C, 1,19% a 450 °C e 1,47% a 600 °C. A correlação direta entre a temperatura final de carbonização e o teor de cinzas está atrelado à possibilidade de haver maior degradação de outros constituintes da madeira, que acarreta no aumento proporcional da concentração de minerais (DIAS JUNIOR *et al.*, 2020; TRUGILHO; SILVA, 2001). Em outras palavras, elevadas temperaturas favorecem a concentração de minerais no carvão vegetal (KLINGENBERG *et al.*, 2020).

De modo geral, a indústria do aço e o setor doméstico necessitam de carvão vegetal com altos teores de carbono fixo (74 – 77%) e baixos teores de materiais voláteis (22-25%) e cinzas (abaixo de 1,5%) (ASSIS *et al.*, 2016; BRASIL, 2015; GARCÍA *et al.*, 2013; ROUSSET *et al.*, 2011), pois essa composição reflete na melhoria do seu consumo específico, o que confere uma maior eficiência energética ao material (LOUREIRO *et al.*, 2021).

Uma vez que se observou a relação direta entre a temperatura final e o teor de carbono fixo e indireta com o teor de materiais voláteis (Figura 12), percebeu-se a elevação do poder calorífico superior (PROTÁSIO *et al.*, 2021; TRUGILHO e SILVA, 2001; VALE; DIAS; SANTANA, 2010), como pode ser observado na Figura 13.

Nesse sentido, o poder calorífico superior (PCS) variou 11,1% entre o carvão vegetal oriundo das carbonizações realizadas entre 300 °C e 450 °C e 13,9% entre o carvão vegetal oriundo das carbonizações realizadas entre 300 °C e 600 °C, corroborando com o comportamento descrito anteriormente acerca do aumento do poder calorífico superior estar atrelado ao aumento da temperatura final da carbonização. Paralelamente, o poder calorífico inferior (PCI) e útil (PCU), embora apresentem o mesmo comportamento em relação à temperatura final de

carbonização, tendem a ser menores, uma vez que, enquanto o PCI leva em consideração o calor liberado através da condensação da água gerada pela combustão (MCKENDRY, 2002; THOMAZ *et al.*, 2007), o PCU considera a umidade (base úmida) do material (VALE *et al.*, 2000).

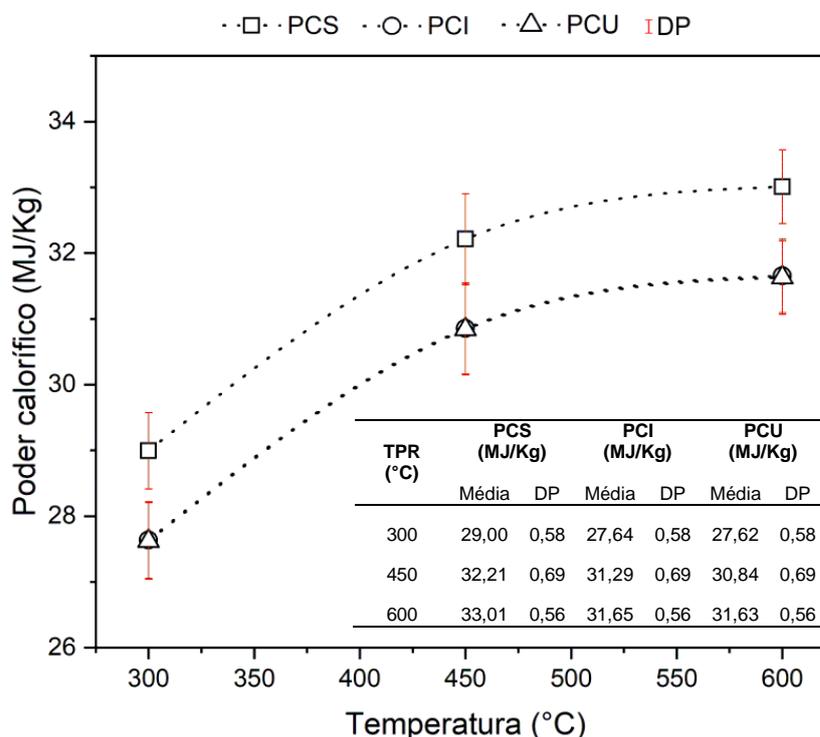


Figura 13. Poder calorífico superior, inferior e útil do carvão vegetal produzido sob diferentes temperaturas finais de carbonização. Em que: PCS = poder calorífico superior (MJ/Kg); PCI = poder calorífico inferior (MJ/Kg); PCU = poder calorífico útil (MJ/Kg); DP = Desvio Padrão. Equação de regressão: PCS =  $15,31 + 6,173 \times 10^{-2} TPR - 5,372 \times 10^{-5} TPR^2$ ,  $R^2_{aj} = 0,8915$  (p-valor < 0,001); PCI =  $13,95 + 6,173 \times 10^{-2} TPR - 5,372 \times 10^{-5} TPR^2$ ,  $R^2_{aj} = 0,8915$  (p-valor < 0,001); PCU =  $13,93 \times 10^1 + 6,181 \times 10^{-2} TPR - 5,383 \times 10^{-5} TPR^2$ ,  $R^2_{aj} = 0,8908$ ; TPR = temperatura final.

O estoque de carbono fixo associa duas propriedades do carvão vegetal, a densidade aparente e o teor de carbono fixo, e é um excelente indicador para avaliar as variáveis do processo de carbonização. A Figura 14 aborda a superfície de resposta do modelo de regressão ajustado para o estoque de carbono fixo em relação aos tempos e temperaturas analisados.

Houve efeito significativo das variáveis do processo de carbonização no estoque de carbono fixo do carvão vegetal (Figura 14). Temperaturas mais elevadas e tempos mais curtos de carbonização levaram a um maior aumento do estoque de carbono fixo. Tal propriedade, dada por unidade de volume, é compreendida como o produto da multiplicação entre a densidade aparente e o teor de carbono fixo do

carvão vegetal (PROTÁSIO *et al.*, 2013; PROTÁSIO *et al.*, 2014). Portanto, quanto maior a densidade aparente e o teor de carbono fixo maior será o estoque energético do carvão vegetal.

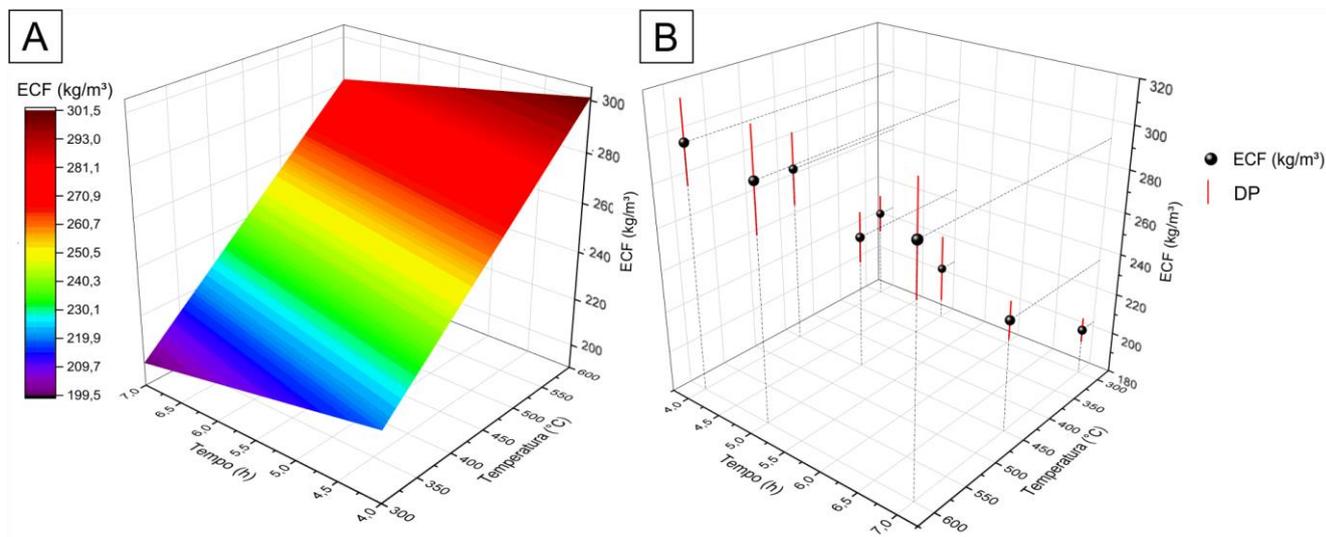


Figura 14. Estoque de carbono fixo do carvão vegetal em relação a diferentes tempos totais e temperaturas finais de carbonização (A), média e desvio padrão (B). Em que: ECF = estoque de carbono fixo ( $\text{kg/m}^3$ ); DP = Desvio Padrão. Equação de regressão:  $\text{ECF} = 162,12705 + 0,27424\text{TPR} - 6,37124\text{TMP}$ ,  $R^2_{aj} = 0,8148$  ( $p\text{-valor} < 0,001$ ); TMP = tempo total; TPR = temperatura final.

Os resultados obtidos para a densidade energética do carvão vegetal frente aos diferentes tempos e temperaturas de carbonização estão dispostos na Figura 15.

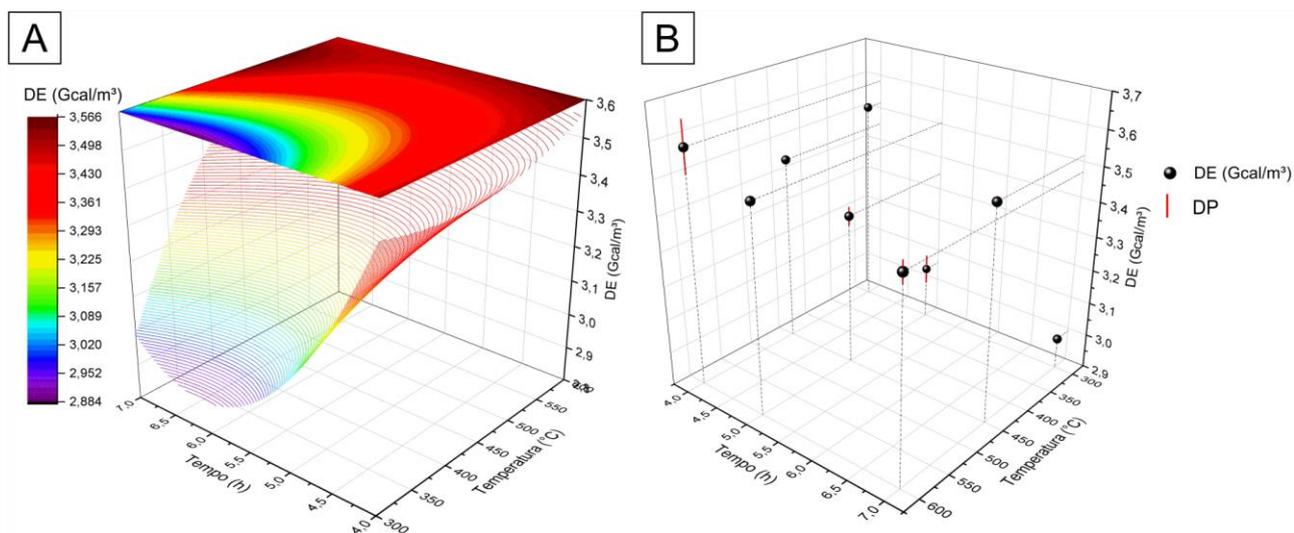


Figura 15. Densidade energética do carvão vegetal produzido a diferentes tempos totais e temperaturas finais de carbonização (A), média e desvio padrão (B). Em que: DE = densidade energética ( $\text{Gcal/m}^3$ ); DP = Desvio Padrão. Equação de regressão:  $\text{DE} = 1,404e+01 - 3,234\text{TMP} - 2,331e-02\text{TPR} + 1,793e-01\text{TMP}^2 + 1,063e-05\text{TPR}^2 +$

$5,216e-03TMPTPR - 4,803e-07TMP^2TPR^2$ ,  $R^2_{aj} = 0,9716$  ( $p$ -valor  $< 0,001$ ); TMP = tempo total; TPR = temperatura final.

As variáveis do processo de carbonização acarretaram em diferenças significativas na densidade energética do carvão vegetal, de modo que temperaturas mais elevadas e tempos mais curtos de carbonização levaram a um maior aumento dessa propriedade. A densidade energética é um importante parâmetro para combustíveis sólidos, uma vez que avalia a quantidade de energia armazenada em um determinado volume de material. Em se tratando do carvão vegetal, apesar da redução da densidade gerada pela carbonização, os valores de densidade energética são superiores aos de outra fonte de biomassa em função do aumento do poder calorífico no material quando submetido à ação da temperatura (ANDRADE, 2017).

Nesse contexto, observou-se que a densidade energética do carvão vegetal foi diretamente proporcional à densidade a granel e ao poder calorífico útil. Assim como na densidade aparente e na densidade a granel, espera-se obter carvão vegetal com alta densidade energética, tanto para fins industriais como doméstico, uma vez que é uma propriedade que diz respeito à máxima quantidade de energia por unidade de volume do carvão vegetal. Os resultados obtidos nesse estudo mostraram que altos valores podem ser obtidos a partir de carbonização realizada com altas temperaturas finais e baixos tempos totais.

O comportamento do carvão vegetal durante o ensaio de combustibilidade mostrou que os valores foram distintos para os tratamentos, 300 °C, 450 °C e 600 °C, respectivamente, conforme disposto nas Figuras 16 a 18.

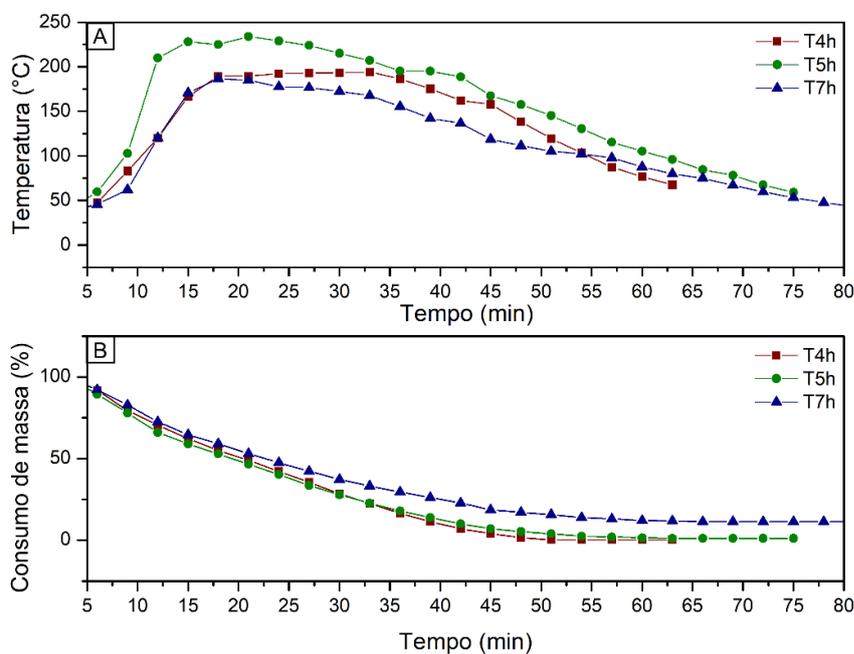


Figura 16. Variação de temperatura (A) e consumo de massa (B) do carvão vegetal produzido a 300 °C em diferentes tempos totais de carbonização.

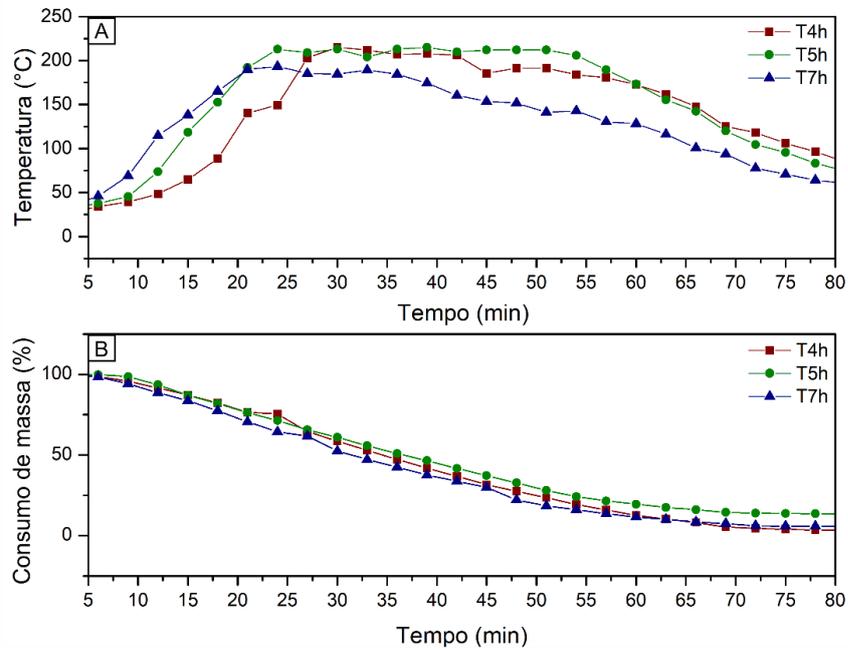


Figura 17. Variação de temperatura (A) e consumo de massa (B) do carvão vegetal produzido a 450 °C em diferentes tempos totais de carbonização.

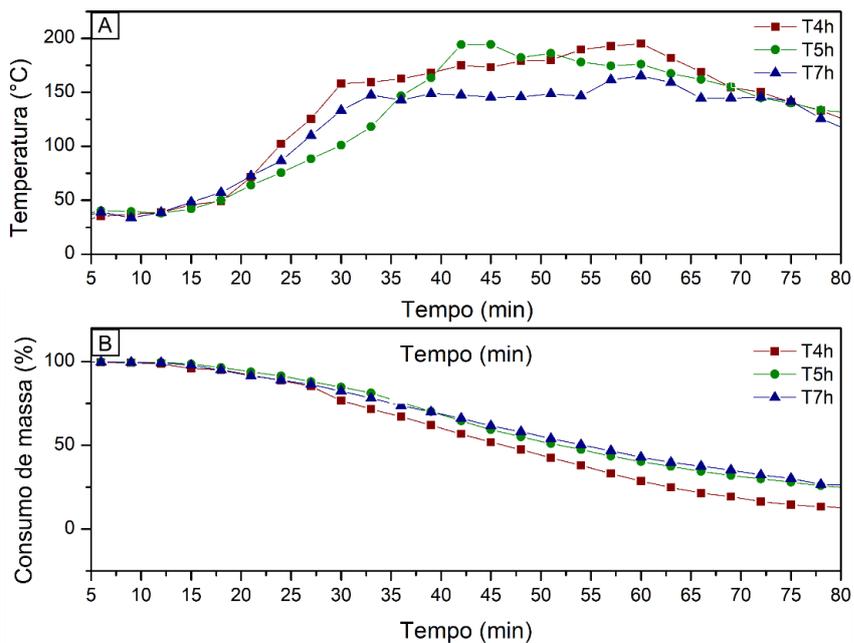


Figura 18. Variação de temperatura (A) e consumo de massa (B) do carvão vegetal produzido a 600 °C em diferentes tempos totais de carbonização.

O carvão produzido a 300 °C (Figura 16) apresentou comportamento diferente quando produzido em diferentes tempos de carbonização, de modo que o carvão de 5h atingiu maior temperatura (234 °C), seguido do carvão produzido a 4h (194,1 °C) e 7h (186,5 °C).

Quando analisado o comportamento do carvão vegetal produzido a 450 °C (Figura 17), observou-se uma similaridade na temperatura de combustão com os carvões produzidos nos tratamentos com 300 °C. No entanto, o carvão produzido com 4h - 450 °C atingiu uma temperatura de combustão maior (215 °C) do que quando produzido à 4h - 300 °C (194,1 °C), e o consumo de massa ocorreu de maneira menos abrupta para todos os tempos estudados a 450 °C, em relação aos tratamentos com 300 °C.

Por fim, ao analisar os carvões produzidos a 600 °C (Figura 18), em relação à temperatura de combustão, não houve diferença expressiva entre os diferentes tempos propostos, sendo a temperatura observada no tratamento com 7h (165,1 °C) menor do que as observadas nos tratamentos 4h (195,1°C) e 5h (194,4°C). O consumo de massa foi ainda mais estável do que o ocorrido nos tratamentos 300 e 450 °C. Observou-se que a variável tempo de carbonização influenciou o comportamento do carvão vegetal em baixas temperaturas e que o seu efeito foi sendo compensado pelo aumento da temperatura até os 600 °C.

As primeiras fases da combustão são marcadas pela liberação de umidade e baixa perda de massa, gerados principalmente pelos primeiros sinais de desvolatilização do carvão vegetal (CALVO *et al.*, 2014; KANURY e BLACKSHEAR JÚNIOR, 1970). Isso justifica o fato do carvão vegetal produzido sob temperaturas menores ter apresentado maior consumo de massa inicial, haja vista que o mesmo apresentou maior teor de materiais voláteis, explicado pela perda de massa menos abrupta à medida que a temperatura aumentou.

Posteriormente, a combustão apresentou fases caracterizadas com significativa desvolatilização e ignição de voláteis (CALVO *et al.*, 2014; KANURY e BLACKSHEAR JÚNIOR, 1970), que justificaram o expressivo consumo de massa do carvão vegetal (CALVO *et al.*, 2014). Por fim, as últimas fases apresentaram baixo consumo de massa, de modo a não oferecerem mais gases a serem volatilizados (CALVO *et al.*, 2014; KANURY e BLACKSHEAR JÚNIOR, 1970). Aliado a isso, observou-se o comportamento do combustível frente às temperaturas alcançadas: o

carvão vegetal produzido a 300 °C alcançou altas temperaturas (> 150 °C) em menos tempo (43 min) do que o carvão produzido a 450 °C (58 min) e 600 °C (68 min).

É importante mencionar que o carvão vegetal produzido a 600 °C apresentou dificuldade de ignição. Esse comportamento pode estar atrelado à higroscopicidade, haja vista que o aumento da temperatura final de carbonização afeta diretamente a porosidade do carvão vegetal e sua capacidade de absorver umidade (DIAS JÚNIOR *et al.*, 2016). Além disso, a higroscopicidade pode influenciar significativamente na baixa potência de ignição e conseqüente redução da combustibilidade (DIAS JÚNIOR *et al.*, 2015).

A relação entre a temperatura máxima alcançada e o ICOM do carvão vegetal está representada pela Figura 19.

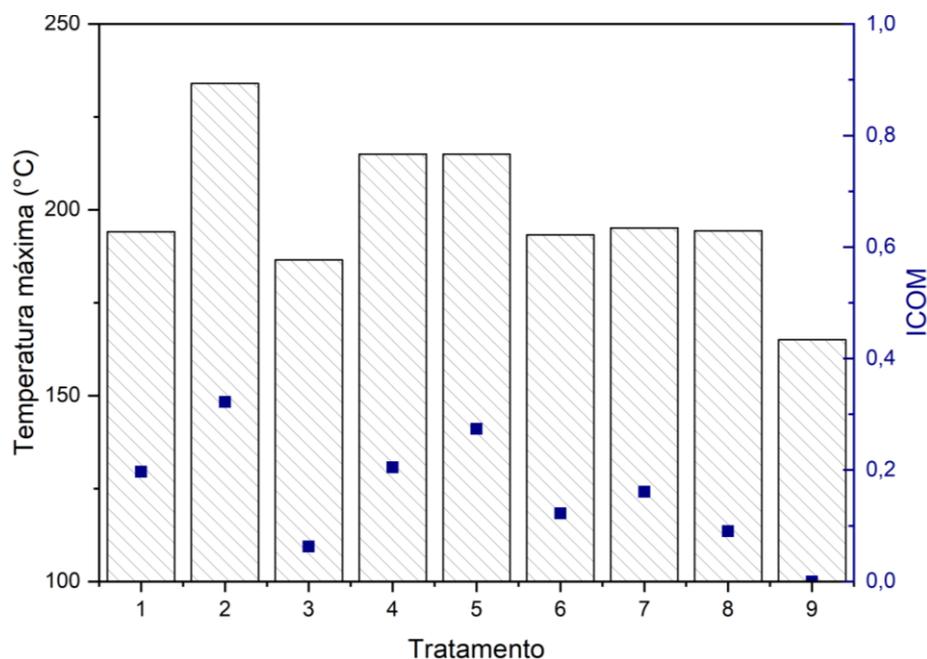


Figura 19. Temperatura máxima alcançada e ICOM dos tratamentos analisados. Em que: 1 = 300 °C – 4h; 2 = 300 °C, 5h; 3 = 300 °C – 7h; 4 = 450 °C – 4h; 5 = 450 °C – 5h; 6 = 450 °C – 7h; 7 = 600 °C – 4h; 8 = 600 °C – 5h; 9 = 600 °C – 7h.

Juntamente com as demais propriedades energéticas avaliadas, o Índice de Combustibilidade (ICOM) reflete a eficiência da combustão do carvão vegetal e avalia a quantidade de energia liberada em relação à quantidade de massa consumida durante o processo de combustão (DIAS JÚNIOR *et al.*, 2017). Dessa forma, considerando uma mesma quantidade inicial de massa de carvão vegetal, quanto maior for o ICOM, maior é a geração de calor (DIAS JÚNIOR *et al.*, 2017).

O maior valor de ICOM (0,322) foi observado no carvão vegetal produzido a 300 °C e 5h (T2), bem como a maior temperatura atingida (234 °C). Em contrapartida, o carvão vegetal produzido a 600 °C por 7h (T9) apresentou o menor ICOM (0,008) e alcançou a menor temperatura máxima entre os tratamentos (165,1 °C).

Pesquisadores apontaram forte correlação entre a densidade aparente do combustível e o seu desempenho energético (DIAS JÚNIOR *et al.*, 2014; DIAS JÚNIOR *et al.*, 2015). Assim como observado nesse estudo, até certo ponto, houve uma correlação positiva entre essas variáveis: o carvão vegetal de maior densidade aparente tendeu a apresentar maior ICOM, uma vez que o mesmo demorou mais tempo para se degradar termicamente até a completa combustão (Figura 20).

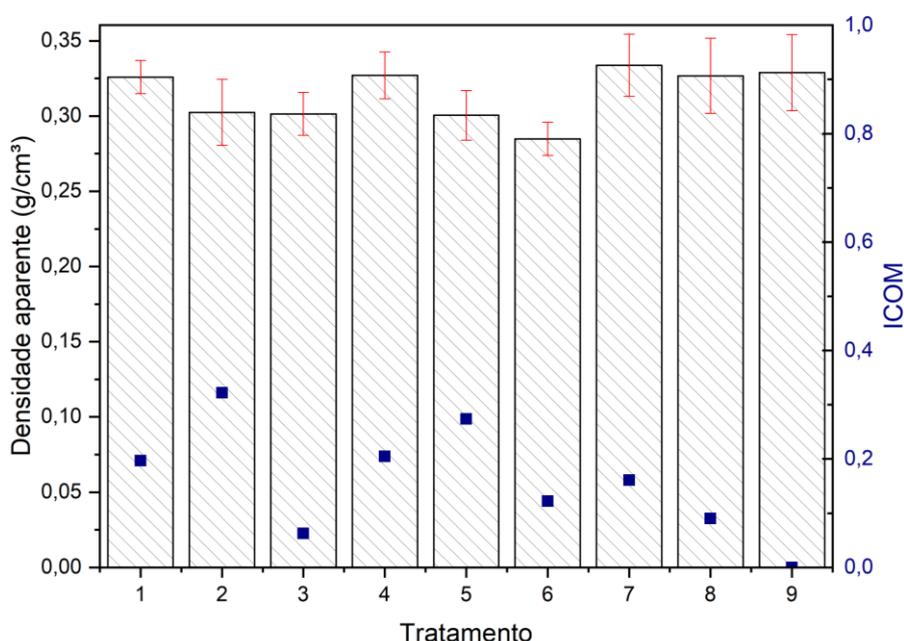


Figura 20. Densidade aparente do carvão vegetal e respectivo índice de combustibilidade dos diferentes tratamentos. Em que: 1 = 300 °C – 4h; 2 = 300 °C, 5h; 3 = 300 °C – 7h; 4 = 450 °C – 4h; 5 = 450 °C – 5h; 6 = 450 °C – 7h; 7 = 600 °C – 4h; 8 = 600 °C – 5h; 9 = 600 °C – 7h.

Conforme explicitado por Dias Júnior *et al.* (2014) e por Quirino e Brito (1991), dentre outras características, espera-se que o carvão vegetal consiga manter o fornecimento de calor durante o maior período de tempo possível, não sendo interessante a ocorrência de mudanças abruptas de temperatura. Portanto, quando produzido sob alta temperatura e baixo tempo de carbonização, a exemplo do Tratamento 4 (450 °C – 4h), a maior densidade aparente do carvão vegetal acarretou

em uma maior manutenção de altas temperaturas e, conseqüentemente, a um maior ICOM. Nesse sentido, é sugerido que a densidade aparente do carvão vegetal e a temperatura máxima alcançada sejam analisados em conjunto, pois, o comportamento mostrado pela Figuras 19 e 20 mostra que o ICOM está altamente relacionado com ambos parâmetros.

As Figuras 21, 22 e 23 apresentam as curvas termogravimétricas e sua derivada para os diferentes tratamentos analisados, 300°C, 450 °C e 600 °C respectivamente.

Diferente da madeira, cujas curvas TG/DTG apresentam três momentos bem distintos decorrentes da degradação dos seus principais componentes (Figura 9), o início da perda de massa do carvão vegetal ocorre na temperatura próxima ao início da segunda fase da carbonização da madeira, referente à perda acentuada de hemiceluloses (SOARES, 2011).

Nesse sentido, observou-se que os perfis de degradação térmica do carvão vegetal demonstraram-se semelhantes dentro de cada temperatura final analisada (300 °C, 450 °C e 600 °C), apresentando três fases de perdas de massa acentuadas em faixas de temperaturas bem próximas. Nesse sentido, à medida que a temperatura é elevada, as reações químicas vão tornando-se mais complexas e acima de 270°C essas reações de decomposição ocorrem mais intensamente, sendo caracterizadas como reações de liberação de calor (RAAD, 2004).

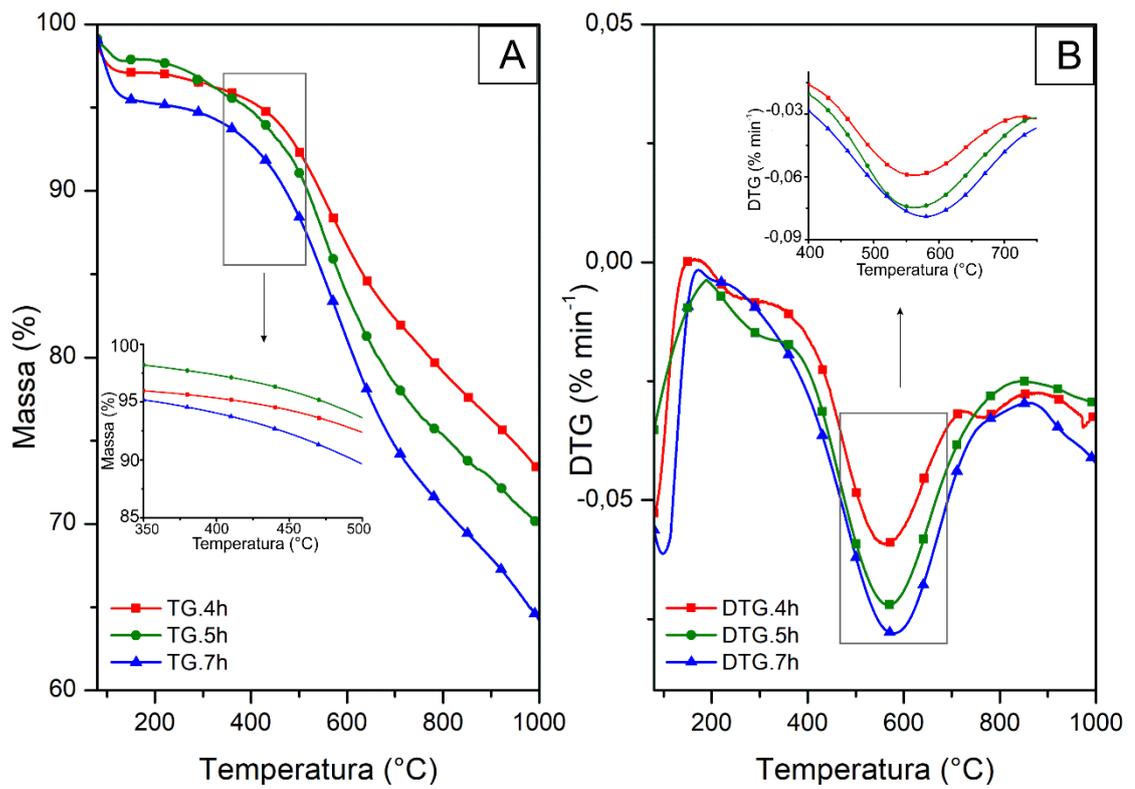


Figura 19. Curvas TG (A) e DTG (B) do carvão vegetal produzido a 300 °C em diferentes tempos de carbonização.

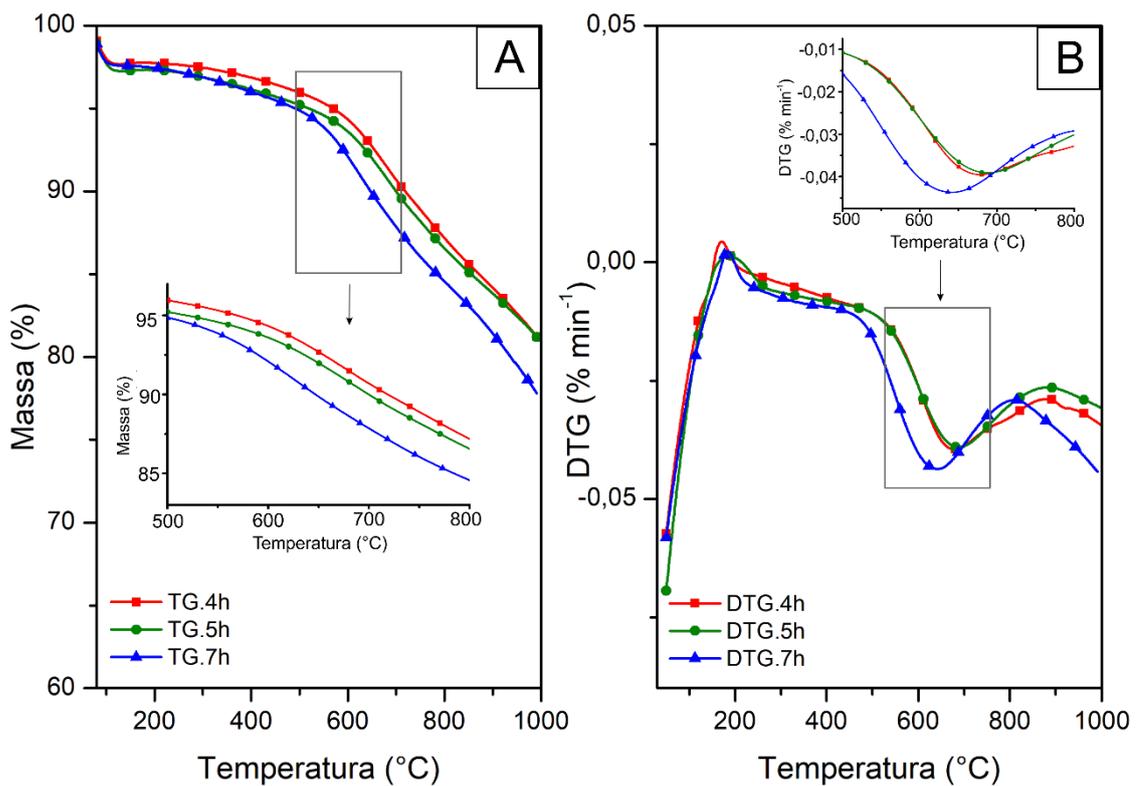


Figura 20. Curvas TG (A) e DTG (B) do carvão vegetal produzido a 450 °C em diferentes tempos de carbonização.

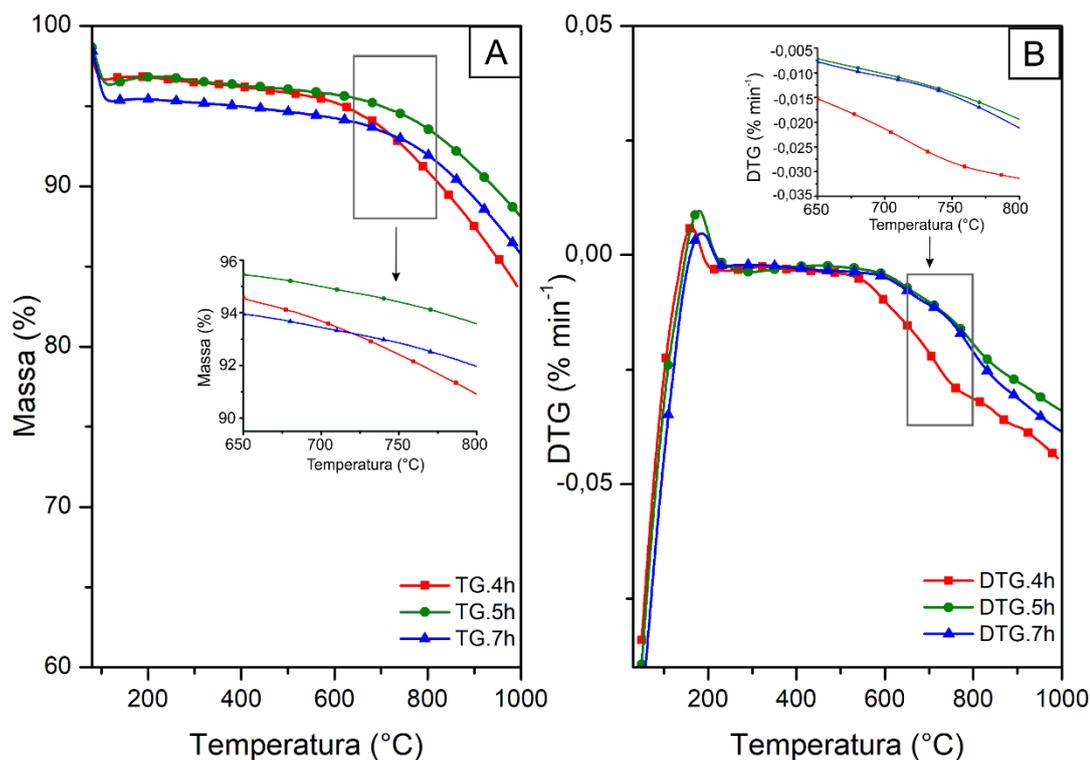


Figura 21. Curvas TG (A) e DTG (B) do carvão vegetal produzido à 600 °C em diferentes tempos de carbonização.

Observou-se que na fase inicial da combustão, compreendida pela secagem, os carvões vegetais produzidos sob temperaturas mais altas (450°C e 600 °C) apresentaram redução de perda de massa mais significativa do que o carvão produzido em temperaturas menores (300 °C). Isso pode ser justificado devido ao aumento da higroscopicidade, justificada pela maior umidade à medida em que houve aumento da temperatura final de carbonização (BOAS *et al.*, 2010; PROTÁSIO *et al.*, 2017).

Após a fase de secagem, observou-se um aumento na estabilidade térmica do carvão vegetal a partir do aumento da temperatura final de carbonização, que resultou em uma mudança do pico máximo de perda de massa para as regiões de alta temperatura, conforme corroborado por Protásio *et al.* (2017) e Qi *et al.* (2016). A segunda fase observada em todos os tratamentos analisados é caracterizada como uma fase de degradação oxidativa acentuada (MUNIR *et al.*, 2009; Qi *et al.*, 2016) e os resultados sugerem que um ambiente oxidativo melhora as características de ignição do carvão vegetal e leva a uma perda de massa mais rápida, sendo também chamada de combustão latente. Ademais, essa fase está associada à desvolatilização dos componentes da celulose e sua subsequente ignição, de modo que a porosidade

nas partículas de carvão da biomassa aumenta e o oxigênio se difunde nas partículas de carvão (GANI e NARUSE, 2007), sendo uma fase marcada pela liberação e queima dos materiais voláteis (HAYKIRI-AÇMA, 2003).

Nesta fase, as curvas DTG apresentaram temperaturas máximas de degradação entre 560 e 583 °C para o carvão vegetal produzido a 300 °C, entre 630 a 683 °C para os carvões produzidos a 450 °C e 700 a 743 °C para os carvões produzidos a 600 °C. A essa diferença de temperatura máxima alcançada se atribuem os fatos discutidos anteriormente: carvão vegetal produzido sob temperaturas mais elevadas apresentam maior teor de carbono fixo, menor teor de materiais voláteis e, conseqüentemente, maior poder calorífico, fatores que influenciam diretamente no desempenho energético do carvão vegetal.

Após a fase de secagem e da região de degradação oxidativa, a fase da verdadeira combustão do carvão vegetal se inicia (MUNIR *et al.*, 2009; Qi *et al.*, 2016). As curvas TG mostraram que o aumento da temperatura de 450 a 600 °C foi responsável pela completa degradação das hemiceluloses e de boa parte da celulose, haja vista que o carvão produzido a 600 °C não apresentou pico DTG como os demais tratamentos. Aliado a isso, observa-se que o mesmo apresenta comportamento mais estável, possivelmente devido ao fato do carvão produzido a 600 °C possuir menos teor de materiais voláteis e maior teor de carbono fixo, fazendo com que seja mais estável termicamente.

Os difratogramas presentes nas Figuras 24 a 26 apresentam os resultados obtidos na análise de Difração de Raios – X das amostras de carvão vegetal produzido sob diferentes tempos e temperaturas finais, 300 °C, 450 °C e 600 °C, respectivamente.

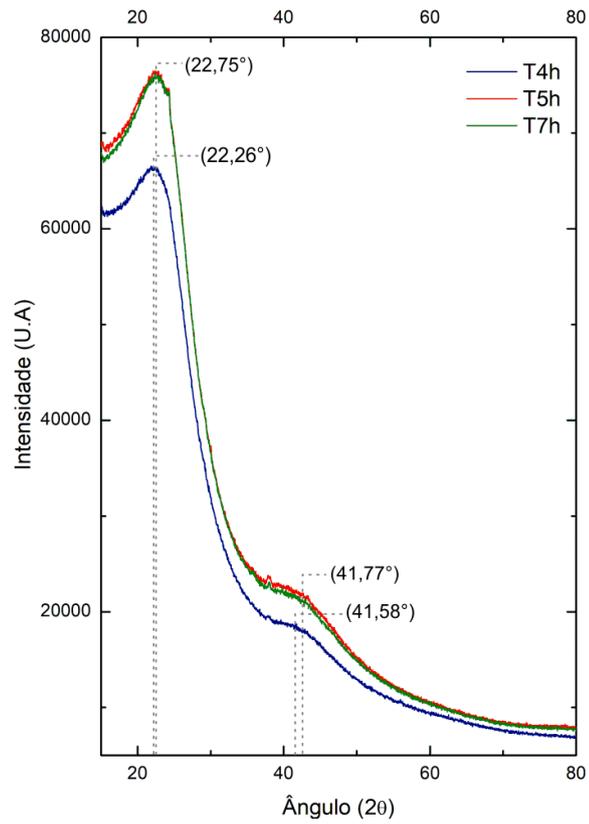


Figura 22. Padrões de difração de raios-X do carvão vegetal produzido a 300 °C em diferentes tempos totais de carbonização.

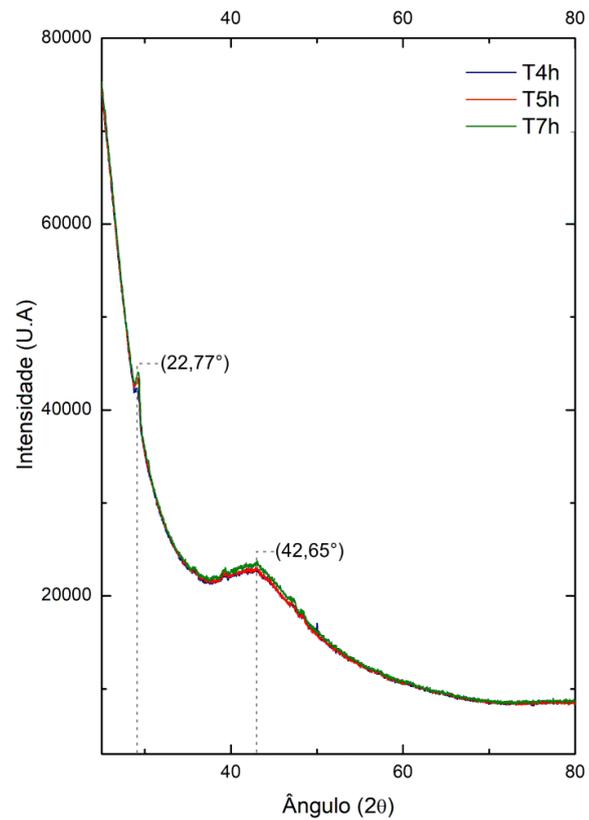


Figura 23. Padrões de difração de raios-X do carvão vegetal produzido a 450 °C em diferentes tempos totais de carbonização.

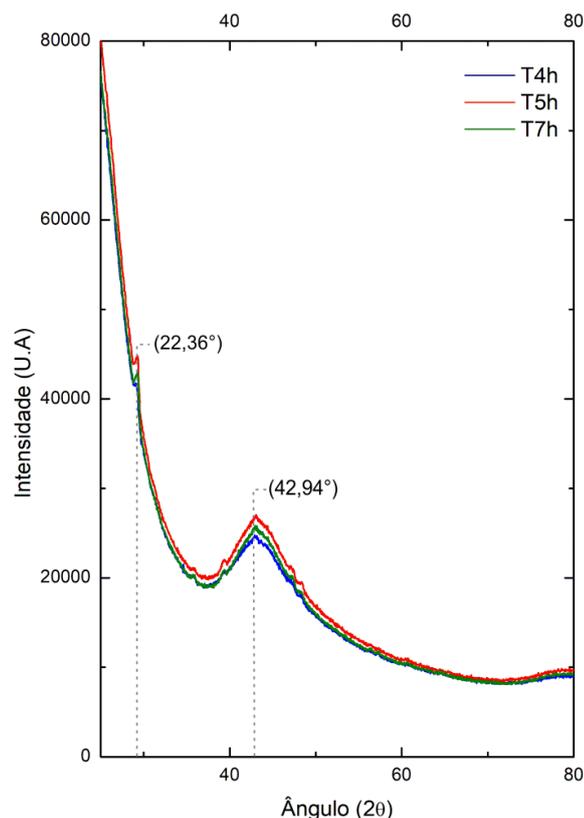


Figura 24. Padrões de difração de raios-X do carvão vegetal produzido a 600 °C em diferentes tempos totais de carbonização.

O padrão de DRX dos tratamentos do carvão vegetal mostraram dois picos principais: o primeiro entre 22 e 23° ( $2\theta$ ) e o segundo entre 41 e 43° ( $2\theta$ ). À medida que houve aumento da temperatura final de 300 °C para 600 °C, eles se tornaram menos intensos, indicando a decomposição contínua da celulose (AZARGOHAR *et al.*, 2014; ELYOUNSSI; HALIM, 2014).

O pico encontrado na madeira em 15,89° ( $2\theta$ ) (Figura 8) não foi mais encontrado no carvão vegetal, o que significa que parte da celulose originalmente presente na madeira foi decomposta pelo processo de carbonização, conforme explicitado por Elyounssi e Halim (2014). Ademais, os picos encontrados nas Figuras 24 a 26 apresentaram intensidades bem inferiores ao encontrado na madeira, comportamento comum de materiais lignocelulósicos submetidos à carbonização (BOURKE *et al.*, 2007; ELYOUNSSI; HALIM, 2014; PIJARN *et al.*, 2021).

De maneira geral, embora os tratamentos tenham apresentado padrões de difratogramas semelhantes, observou-se diferenças em relação à intensidade e largura dos picos de difração. Esta não é afetada apenas pelo grau de cristalinidade, mas também pelo tamanho do cristal, de tal maneira que, conforme há redução do

tamanho também se observa uma ampliação dos picos de difração (BOURKE *et al.*, 2007).

O aumento da temperatura de 300 °C para 450 °C aumentou o percentual de região amorfa, enquanto que de 450 °C a 600 °C ocorreu o inverso, conforme pode ser observado na Tabela 2.

Tabela 2. Percentual da região cristalina e amorfa da madeira e do carvão vegetal produzido a diferentes tempos e temperaturas.

<b>Tratamento</b>	<b>Cristalinidade (%)</b>	<b>Região amorfa (%)</b>
Madeira	28,93	71,07
300 °C – 4h	10,22	89,78
300 °C – 5h	12,32	87,68
300 °C – 7h	12,77	87,23
450 °C – 4h	10,50	89,50
450 °C – 5h	10,98	89,02
450 °C – 7h	10,02	89,98
600 °C – 4h	11,00	89,00
600 °C – 5h	12,66	87,34
600 °C – 7h	12,22	87,78

A friabilidade do carvão vegetal foi determinada quantitativamente pela quantidade de carvão vegetal produzida em partículas inferiores a 8 mm. As peças de carvão vegetal de menor tamanho, resultantes da quebra, oferecem maior contato de superfície para choque e abrasão dentro do tambor utilizado no teste, aumentando o número de finos produzidos e, portanto, o índice de friabilidade (DUFURNY *et al.*, 2019). Em termos absolutos, este estudo observou redução da friabilidade na ordem de 7,4% entre o carvão vegetal oriundo das carbonizações com temperatura final de 300 e 450 °C e posterior aumento de 8,3% entre o carvão vegetal oriundo das carbonizações com temperatura final de 450 e 600 °C. Esse comportamento é contrastante com outras pesquisas que indicam aumento da friabilidade entre 300 e 500 °C e posterior redução até 700 °C (OLIVEIRA; GOMES; ALMEIDA, 1982) e redução de finos entre 500 e 800 °C (DUFURNY *et al.*, 2019).

Dessa forma, entende-se que a relação entre as variáveis da carbonização, tempo e temperatura final, e a friabilidade do carvão vegetal necessita de maiores estudos, embora se reconheça que a temperatura de carbonização é uma variável que afeta significativamente a estrutura física do carvão. A promoção de fissuras externas podem resultar na diminuição da resistência mecânica e no aumento da friabilidade (DIAS JUNIOR *et al.*, 2020) e refletir diretamente na capacidade do carvão

vegetal em produzir partículas finas (finos), principalmente durante o manuseio e transporte (OLIVEIRA; GOMES; ALMEIDA, 1982).

#### 4.4 Análise multivariada

Para esse estudo foram apontadas oito componentes principais (Apêndice C), sendo que duas delas foram escolhidas por explicarem 73,9% da variabilidade das propriedades analisadas do carvão vegetal, sendo 50,3% correspondente à componente principal 1, conforme mostrado na Tabela 3. Os autovetores, bem como a correlação e a contribuição de cada variável nas componentes principais podem ser observados no Apêndice D.

Tabela 3. Autovetores, variância explicada e acumulada em cada um dos componentes principais para os tratamentos do carvão vegetal analisados.

Tratamento	Escore	
	CP 1	CP 2
1 (300°C - 4h)	-2,3578	-2,2746
2 (300°C - 5h)	-3,0906	-0,7489
3 (300°C - 7h)	-4,5777	1,6185
4 (450°C - 4h)	1,0563	-2,3443
5 (450°C - 5h)	0,24489	-0,6642
6 (450°C - 7h)	-0,07942	2,4014
7 (600°C - 4h)	3,7233	-1,5379
8 (600°C - 5h)	2,9653	0,91327
9 (600°C - 7h)	2,1158	2,6367
Autovalores	8,048	3,776
Variância explicada (%)	50,30	23,60
Variância acumulada (%)	50,30	73,90

A análise da distribuição gráfica dos tratamentos através da Figura 25, considerados em relação às duas primeiras componentes principais, pode-se perceber que houve formação de três grupos distintos baseados na temperatura final do carvão vegetal: o grupo formado pelo carvão vegetal produzido a 300 °C (1, 2 e 3); a 450 °C (4, 5 e 6) e à 600 °C (7, 8 e 9). Os autovetores, bem como a correlação e a contribuição de cada variável nas componentes principais podem ser observados no Apêndice D.

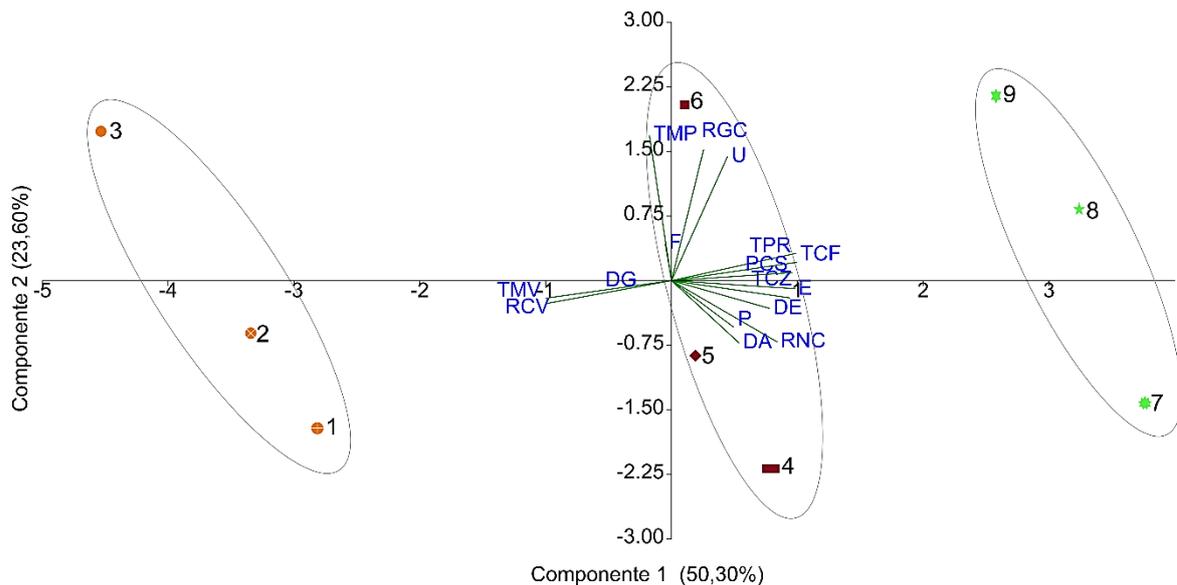


Figura 25. Dispersão dos tratamentos do carvão vegetal em função dos escores e diagrama de ordenação dos autovetores das duas primeiras componentes principais. Em que: 1 = 300 °C – 4h; 2 = 300 °C, 5h; 3 = 300 °C – 7h; 4 = 450 °C – 4h; 5 = 450 °C – 5h; 6 = 450 °C – 7h; 7 = 600 °C – 4h; 8 = 600 °C – 5h; 9 = 600 °C – 7h.

A primeira componente principal apresenta os maiores autovetores positivos relacionados ao teor de carbono fixo (TCF), poder calorífico superior (PCS) e estoque de carbono fixo (ECF). Já os autovetores negativos mais significativos referem-se ao rendimento em carvão vegetal (RCV) e ao teor de materiais voláteis (TMV). Os sinais positivos (+) e negativos (-) indicam as correlações entre as variáveis originais. Dessa forma, o comportamento encontrado reforça as tendências detectadas e discutidas anteriormente: carvão vegetal com maiores teores de carbono fixo, tendem a apresentar menor teor de materiais voláteis, maior poder calorífico superior e, conseqüentemente, maior estoque de carbono fixo. Em contrapartida, o aumento da temperatura final tende a reduzir o rendimento em carvão vegetal.

Dessa forma, o grupo 1 foi formado pelo carvão vegetal produzido sob a menor temperatura estudada (300 °C) e que apresentou maior rendimento em carvão vegetal e em materiais voláteis. O grupo 2 pode ser considerado um grupo intermediário e o grupo 3 foi o oposto do grupo 1, representado pelo carvão vegetal produzido sob maior temperatura final (600 °C) e, conseqüentemente, com maior teor de carbono fixo e poder calorífico.

A segunda componente principal se apresentou altamente correlacionada com a temperatura final, tempo total, rendimento de gases condensáveis e umidade

(Apêndice D e Apêndice E). Esses resultados corroboram com as discussões anteriores acerca da influência da temperatura final e do tempo total utilizados na produção de carvão vegetal sob os rendimentos do processo e umidade do material.

Os grupos formados podem ser mais claramente evidenciados através do dendrograma da análise de agrupamento por *cluster*, apresentado pela Figura 26. Para minimizar a quantidade de grupos e objetivando homogeneização, optou-se como ponto de corte 48% de Distância de Manhattan.

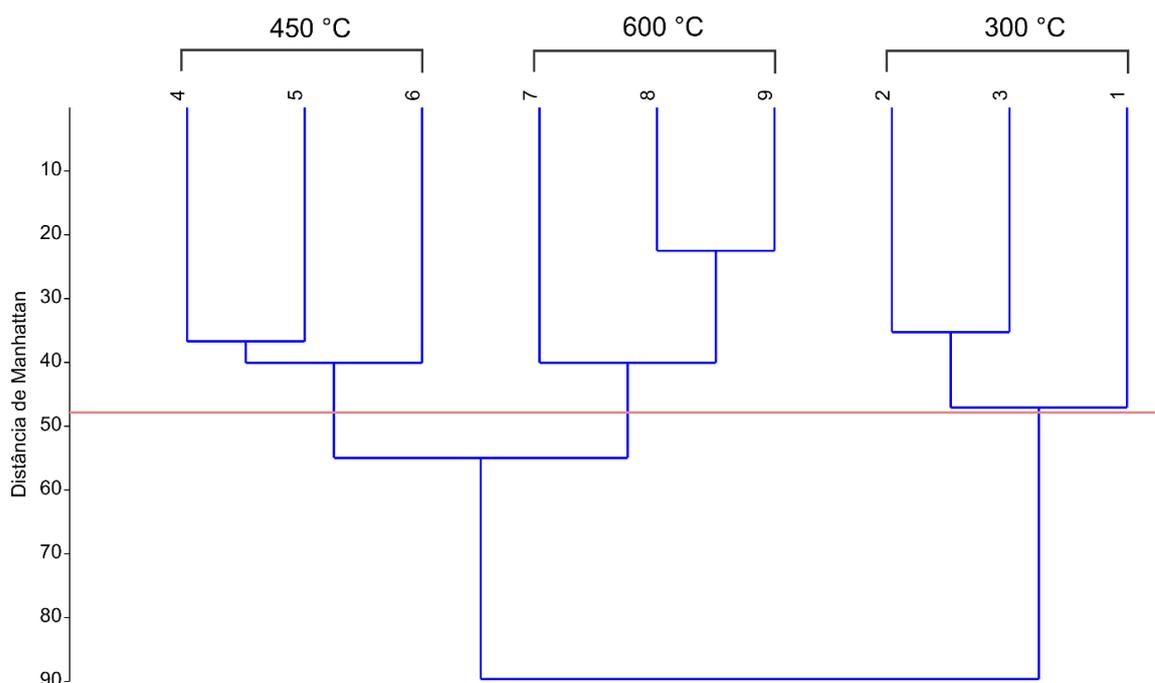


Figura 26. Dendrograma obtido pelo método de agrupamento hierárquico da ligação média entre grupos (UPGMA), utilizando a distância de Manhattan entre os diferentes tratamentos analisados. Coeficiente de correlação cofenética = 0,8401, significativo a 5% de probabilidade.

As novas médias dos grupos formados com base no *cluster* estão dispostas na Tabela 4.

Tabela 4. Média e desvio padrão dos grupos formados pela análise de agrupamentos UPGMA.

	GRUPOS		
	300 °C	450 °C	600 °C
<b>RCV</b>	34,75 ± 0,89	29,57 ± 0,98	28,03 ± 0,47
<b>RGC</b>	36,13 ± 3,41	33,61 ± 3,79	37,76 ± 3,98
<b>RNC</b>	29,12 ± 3,69	33,61 ± 4,19	34,22 ± 4,06
<b>DA</b>	0,310 ± 0,02	0,304 ± 0,02	0,330 ± 0,02

<b>P</b>	73,34 ± 13,28	76,82 ± 2,94	76,20 ± 3,20
<b>F</b>	9,04 ± 1,29	8,41 ± 0,85	9,11 ± 1,42
<b>TMV</b>	30,80 ± 1,53	16,84 ± 1,11	9,44 ± 1,12
<b>TCF</b>	68,23 ± 1,47	81,96 ± 1,09	89,09 ± 1,05
<b>TCZ</b>	0,98 ± 0,14	1,19 ± 0,11	1,47 ± 0,18
<b>U</b>	4,77 ± 1,20	4,85 ± 0,84	6,40 ± 1,68
<b>ECF</b>	211,5 ± 15,2	249,3 ± 19,2	293,8 ± 20,5
<b>PCS</b>	28,98 ± 0,55	32,20 ± 0,98	33,00 ± 0,47
<b>DE</b>	3,19 ± 0,24	3,44 ± 0,07	3,52 ± 0,05
<b>DG</b>	123,34 ± 3,05	122,04 ± 1,22	112,93 ± 11,54

Em que: RCV = rendimento em carvão vegetal (%); RGC = rendimento de gases condensáveis (%); RNC = rendimento de gases não condensáveis (%); DA = densidade aparente (g/cm<sup>3</sup>); P = porosidade; F = friabilidade; TMV = teor de materiais voláteis (%); TCF = teor de carbono fixo (%); TCZ = Teor de cinzas (%); U = umidade (%); ECF = estoque de carbono fixo (g/cm<sup>3</sup>); PCS = poder calorífico superior (MJ/Kg); DE = densidade energética (Gcal/m<sup>3</sup>); DG = densidade a granel (g/cm<sup>3</sup>); ± Desvio padrão da média.

Ao analisar o dendrograma presente na Figura 28, observou-se a formação de três grupos distintos pautados em características semelhantes: carvão vegetal produzido a 4h, 5h e 7h, respectivamente, de modo a corroborar com as análises feitas e discutidas ao longo desse estudo que apontaram a temperatura como a variável que exerceu maior influência sob todas as propriedades do carvão vegetal analisadas.

## 5. CONCLUSÃO

As madeiras utilizadas nesse estudo e cultivadas na região Sudoeste da Bahia apresentaram potencial para serem utilizadas na produção de carvão vegetal.

As variáveis do processo de carbonização, temperatura final e tempo total, influenciaram significativamente as propriedades do carvão vegetal sem, contudo, interferirem no seu potencial de uso para fins domésticos, principalmente.

As variáveis temperatura final e tempo total devem ser consideradas em conjunto quando analisadas as propriedades densidade aparente, umidade, estoque de carbono fixo e densidade energética do carvão vegetal.

A temperatura final foi a variável que expressou maior influência nas propriedades do carvão vegetal.

Os modelos estatísticos ajustados possibilitaram estimar com eficiência as propriedades do carvão vegetal. A partir da análise de componentes principais, as propriedades do carvão vegetal foram agrupadas pela variável temperatura final de carbonização.

O estudo evidenciou a importância de se analisar a correlação existente entre as propriedades do carvão vegetal sob efeitos das variáveis da carbonização e forneceu dados importantes para o controle operacional do processo. Dessa forma, principalmente os pequenos produtores de carvão vegetal poderão melhor direcionar sua produção no mercado.

É de suma importância que se realizem outros estudos que contemplem a estrutura morfológica e a área superficial do carvão vegetal, para permitir mais discussões sobre o efeito das variáveis do processo da carbonização nos poros, em termos qualitativos.

## 6. REFERÊNCIAS

ABAF, Associação Baiana das Empresas de Base Florestal. Relatório ABAF 2019. **Bahia Florestal**, [s. l.], p. 90, 2019.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6922**: Carvão vegetal - Ensaio físico determinação da massa específica (densidade à granel), 1981.

\_\_\_\_\_. **NBR 11941**: Madeira - determinação da densidade básica, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR 6923**: Carvão vegetal - amostragem e preparação da amostra. Rio de Janeiro, 1981.

\_\_\_\_\_. **NBR 9165**. Carvão vegetal - determinação da densidade relativa aparente, relativa verdadeira e porosidade, Rio de Janeiro, 1985.

ABREU NETO, R.; ASSIS, A. A.; BALLARIN, A. W.; HEIN, P. R. G. Effect of final temperature on charcoal stiffness and its correlation with wood density and hardness. **SN Applied Sciences**, [s. l.], v. 2, n. 6, p. 1–9, 2020.

AHVENAINEN, P.; KONTRO, I.; SVEDSTRÖM, K. Comparison of sample crystallinity determination methods by X-ray diffraction for challenging cellulose I materials. **Cellulose**, v. 23, n. 2, p. 1073–1086, 2016.

ALMEIDA, T. H.; SARDELA, M.; LAHR, F. A. R. X-ray diffraction on aged Brazilian wood species. **Materials Science and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology**, v. 246, n. April, p. 96–103, 2019.

ASTM, American Society for Testing and Material. **D5057-17**. Standard Test Method for Screening Apparent Specific Gravity and Bulk Density of Waste, 2017.

\_\_\_\_\_. **D 1762-84**: Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal, 2021.

ANATER, M. J. do N. **Qualidade Do Carvão Vegetal Para Uso Doméstico Comercializado Em Curitiba**. 2017. 75 f. Dissertação (Mestrado em Bioenergia) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

ANDRADE, C. R. **Tratamento térmico da madeira contida nos resíduos sólidos urbanos visando sua adequação para uso energético Piracicaba**. 2017. 86 f. Tese (Doutorado em Ciências) - Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2017.

ASSIS, M. R.; BRANCHERIAU, L.; NAPOLI, A.; TRUGILHO, P. F. Factors affecting the mechanics of carbonized wood: literature review. **Wood Science and Technology**, v. 50, n. 3, p. 519–536, 2016.

AZARGOHAR, R.; NANDA, S.; KOZINSKI, J. A.; DALAI, A. K.; SUTARTO, R. Effects of temperature on the physicochemical characteristics of fast pyrolysis bio-chars

derived from Canadian waste biomass. **Fuel**, v. 125, p. 90–100, 2014.

BARCELLOS, D. C. **Caracterização do carvão vegetal através do uso de espectroscopia no infravermelho próximo**. 2007. 163 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007.

BASCH, A.; LEWIN, M. Influence of fine structure on the pyrolysis of cellulose. III. The influence of orientation. **Journal of Polymer Science: Polymer Chemistry Edition**, v. 12, n. 9, p. 2053–2063, 1974.

BIAGINI, E.; BARONTINI, F.; TOGNOTTI, L. Devolatilization of biomass fuels and biomass components studied by TG/FTIR technique. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 45, n. 13, p. 4486–4493, 2006.

BOAS, M. A. V.; DE CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; CARVALHO, A. M. M. L.; MARTINS, M. A. Efeito da temperatura de carbonização e dos resíduos de macaúba na produção de carvão vegetal. **Scientia Forestalis**, v. 38, n. 87, p. 481–490, 2010.

BOURKE, J.; MANLEY-HARRIS, M.; FUSHIMI, C.; DOWAKI, K.; NUNOURA, T.; ANTAL, M. J. Do all carbonized charcoals have the same chemical structure? 2. A model of the chemical structure of carbonized charcoal. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 46, n. 18, p. 5954–5967, 2007.

BRASIL, Ministério de Minas e Energia. **Plano Nacional de Energia 2030: Projeções**. 2007. 372 p.

BRASIL, Secretaria de Agricultura e Abastecimento. Resolução SAA - 40. **Diário Oficial**, Brazil, 2015.

BRASIL, Ministério de Minas e Energia. Fontes renováveis sobem 0,6 ponto percentual na Matriz Energética. **Notícias**, [s. l.], p. 11–12, 2020. Disponível em: <[http://www.mme.gov.br/todas-as-noticias/-/asset\\_publisher/pdAS9lCdBICN/content/fontes-renovaveis-sobem-0-6-ponto-percentual-na-matriz-energetica](http://www.mme.gov.br/todas-as-noticias/-/asset_publisher/pdAS9lCdBICN/content/fontes-renovaveis-sobem-0-6-ponto-percentual-na-matriz-energetica)>

BRITO, J. O. Carvão vegetal no Brasil: gestões econômicas e ambientais. **Estudos Avançados**, v. 4, n. 9, p. 221–227, 1990.

BRITO, J. O. Reflexões sobre qualidade do carvão vegetal para uso siderúrgico. Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais: **Circular Técnica**, n. 181, p. 6, 1993a.

BRITO, J. O. Congresso Florestal Pan-americano. In: EXPRESSÃO DA PRODUÇÃO FLORESTAL EM UNIDADES ENERGÉTICAS 1993b, Curitiba. **Anais...** Curitiba

BRITO, J. O. Bioenergia e biorrefinaria: cana-de-açúcar e espécies florestais. In: SANTOS, F.; COLODETTE, J.; QUEIROZ, J. H. (Eds.). **Bioenergia e biorrefinaria: cana-de-açúcar e espécies florestais**. Viçosa. p. 271–295.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Considerações sobre a produção de carvão vegetal com madeiras da Amazônia. **IPEF**, Circular Técnica, 1981.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G.; MURAMOTO, M. C.; COUTO, H. T. Z. Do.



DONATO, D. B.; CARNEIRO, A. de C. O.; CARVALHO, A. M. L. M.; VITAL, B. R.; MILAGRES, E. G.; CANAL, W. D. Influência do diâmetro da madeira de eucalipto na produtividade e propriedades do carvão vegetal. **Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**, v. 11, n. 2, p. 63–73, 2020.

DUFOUR, A.; OUARTASSI, B.; BOUNACEUR, R.; ZOULALIAN, A. Chemical Engineering Research and Design Modelling intra-particle phenomena of biomass pyrolysis. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 89, n. 10, p. 2136–2146, 2011.

DUFOURNY, A.; VAN DE STEENE, L.; HUMBERT, G.; GUIBAL, D.; MARTIN, L.; BLIN, J. Influence of pyrolysis conditions and the nature of the wood on the quality of charcoal as a reducing agent. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, n. 137, p. 1–13, 2019.

ELOY, E.; CARON, B. O.; DA SILVA, D. A.; DE SOUZA, V. Q.; TREVISAN, R.; BEHLING, A.; ELLI, E. F. Produtividade energética de espécies florestais em plantios de curta rotação. **Ciencia Rural**, v. 45, n. 8, p. 1424–1431, 2015.

ELYOUNSSI, K.; HALIM, M. An investigation on the texture and microstructure of carbonized charcoals produced by two-step pyrolysis. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 109, p. 258–265, 2014.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. Relatório síntese ano base 2019. Empresa de Pesquisa Energética, p. 73, 2020. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2020>>. Acesso em: 10 mar. 2021.

ERNSTING, A. **Biomass gasification & pyrolysis**: [s. l.], p. 41, 2015.

FARIA, W. L. F. **A jurema preta (*Mimosa hostilis*, Benth) como fonte energética do semi-árido do nordeste-carvão**. 1984. 128 f. Dissertação (Mestre em Ciências) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1984.

FAO, Food and Agriculture Organization. **Wood Energy**. Disponível em: <http://www.fao.org/forestry/energy/en/>. Acesso em 05 abr. 2021.

\_\_\_\_\_. **The charcoal transition** - Green the charcoal value chain to mitigate climate change and improve local livelihoods. Rome, 184 p., 2017.

\_\_\_\_\_. **The state of the world's forests 2018** - Forest pathways to sustainable development. Rome, 139 p., 2019.

FRIEDL, A.; PADOUVAS, E.; ROTTER, H.; VARMUZA, K. Prediction of heating values of biomass fuel from elemental composition. **Analytica Chimica Acta**, v. 544, p. 191–198, 2005.

GANI, A.; NARUSE, I. Effect of cellulose and lignin content on pyrolysis and combustion characteristics for several types of biomass. **Renewable Energy**, v. 32, n. 4, p. 649–661, 2007.

GARCÍA, R.; PIZARRO, C.; LAVÍN, A. G.; BUENO, J. L. Biomass proximate analysis

using thermogravimetry. **Bioresource Technology**, v. 139, p. 1–4, 2013.

HAYKIRI-AÇMA, H. Combustion characteristics of different biomass materials. **Energy Conversion and Management**, v. 44, n. 1, p. 155–162, 2003.

HONGYU, K.; SANDANIELO, V. L. M.; OLIVEIRA JUNIOR, G. J. Principal Component Analysis: theory, interpretations and applications Kuang. **E&S - Engineering and Science**, v. 5, n. 1, p. 83–90, 2016.

Ibá, Indústria brasileira de Árvores. **Relatório 2019**. Brasília; São Paulo, [s.l: s.n.], 80 p., 2019. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/iba-relatorioanual2019.pdf>. Acesso em: 12 mar. 2021.

\_\_\_\_\_. **Relatório anual - 2020**. Brasília; São Paulo, [s.l: s.n.], 66 p., 2020. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-iba-2020.pdf>. Acesso em 15 mar. 2021.

ISBAEX, C. **Influência da densidade do carvão vegetal na produção de silício metálico**. 2014. 58 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014.

KANURY, A. M.; BLACKSHEAR JÚNIOR, P. L. Some considerations pertaining to the problem of wood-burning. **Combustion Science and Technology**, v. 1, p. 339–355, 1970.

KIM, U. J.; EOM, S. H.; WADA, M. Thermal decomposition of native cellulose: Influence on crystallite size. **Polymer Degradation and Stability**, v. 95, n. 5, p. 778–781, 2010.

KLINGENBERG, D.; NOLASCO, A. M.; DIAS JÚNIOR, A. F.; CANDATEN, L.; CAVALCANTE, A. K. L.; SOUZA, E. C. De. Energy potential of wood waste from a tropical urban forest. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 9, 2020.

LEITE, E. R. da S.; PROTÁSIO, T. de P.; ROSADO, S. C. da S.; TRUGILHO, P. F.; DE MELO, I. C. N. A. Qualidade do carvão vegetal produzido a partir da madeira do cafeeiro, para uso bioenergético. **Coffee Science**, v. 10, n. 2, p. 251–261, 2015.

LINDNER, B.; PETRIDIS, L.; LANGAN, P.; SMITH, J. C. Determination of cellulose crystallinity from powder diffraction diagrams. **Biopolymers**, v. 103, n. 2, p. 67–73, 2015.

LOUREIRO, B. A.; DE ASSIS, M. R.; DE MELO, I. C. N. A.; DE OLIVEIRA, A. F. F.; TRUGILHO, P. F. Carbonization gravimetric yield and qualitative characterization of charcoal from hybrid *Corymbia* spp clones for industrial use. **Ciencia Florestal**, v. 31, n. 1, p. 214–232, 2021.

MACHADO, G. de O.; VOGEL, F.; SILVA, M. M. e. Influence of temperature carbonization in physical, chemical and energy of charcoal from cinamomo (*Melia azedarach* L.). **Ambiência**, v. 10, n. 1, p. 83–96, 2014.

MAJOR, W. D. The degradation of cellulose in oxygen and nitrogen at high temperatures. **TAPPI**, v. 41, p. 530–537, 1958.

MCKENDRY, P. Energy production from biomass (part 1): Overview of biomass. **Bioresource Technology**, v. 83, n. 1, p. 37–46, 2002.

MENUCELLI, J. R.; AMORIM, E. P.; FREITAS, M. L. M.; ZANATA, M.; CAMBUIM, J.; DE MORAES, M. L. T.; YAMAJI, F. M.; DA SILVA JÚNIOR, F. G.; LONGUI, E. L. Potential of *Hevea brasiliensis* Clones, *Eucalyptus pellita* and *Eucalyptus tereticornis* Wood as Raw Materials for Bioenergy Based on Higher Heating Value. **Bioenergy Research**, v. 12, n. 4, p. 992–999, 2019.

MÉSZÁROS, E.; JAKAB, E.; VÁRHEGYI, G. TG/MS, Py-GC/MS and THM-GC/MS study of the composition and thermal behavior of extractive components of *Robinia pseudoacacia*. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 79, n. 1- 2 SPEC. ISS., p. 61–70, 2007.

MORA, A. L.; GARCIA, A. H. **A cultura do eucalipto no Brasil**. [s.l: s.n.]. 114 p. 2000.

MOUTINHO, V. H. P.; TOMAZELLO FILHO, M.; BRITO, J. O.; BALLARIN, Ad. W.; ANDRADE, F. W. C.; CARDOSO, C. da C. Characterization and statistical correlation between chachcoal's physical and mechanical properties of Eucalyptus and Corymbia clones. **Ciência Florestal**, v. 27, n. 3, p. 1095–1103, 2017.

MÜLLER - HAGEDORN, M.; BOCKHORN, H.; KREBS, L.; MÜLLER, U. A comparative kinetic study on the pyrolysis of three different wood species. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 69, p. 231–249, 2003.

MUNIR, H.; MUMTAZ, A.; RASHID, R.; NAJEEB, J.; ZUBAIR, M. T.; MUNIR, S.; BILAL, M.; CHENG, H. *Eucalyptus camaldulensis* gum as a green matrix to fabrication of zinc and silver nanoparticles: Characterization and novel prospects as antimicrobial and dye-degrading agents. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 9, n. 6, p. 15513–15524, 2020.

MUNIR, S.; DAOOD, S. S.; NIMMO, W.; CUNLIFFE, A. M.; GIBBS, B. M. Thermal analysis and devolatilization kinetics of cotton stalk, sugar cane bagasse and shea meal under nitrogen and air atmospheres. **Bioresource Technology**, v. 100, n. 3, p. 1413–1418, 2009.

NEVES, T. A.; PROTÁSIO, T. de P.; COUTO, A. M.; TRUGILHO, P. F.; SILVA, V. O.; VIEIRA, C. M. M. Avaliação de clones de Eucalyptus em diferentes locais visando à produção de carvão vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 31, n. 68, p. 319–330, 2011.

OLIVEIRA, A. C.; DE CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; ALMEIDA, W.; PEREIRA, B. L. C.; CARDOSO, M. T. Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus pellita* F. Muell. **Scientia Forestalis**, v. 38, n. 87, p. 431–439, 2010.

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, p. 102–111, 2015.

OLIVEIRA, A. M.; BARRETO-GARCIA, P. A. B.; ALVES, B. J. R.; CONCEIÇÃO

JÚNIOR, V.; GAMA-RODRIGUES, E. F. Efeito de rotações sucessivas de eucalipto na mineralização de nitrogênio e carbono do solo e suprimento de nitrogênio, no Sudoeste da Bahia, Brasil. **Scientia Forestalis**, v. 48, 2020.

OLIVEIRA, E. **Características anatômicas, químicas e térmicas da madeira de três espécies de maior ocorrência no semi-árido nordestino**. 2003. 149 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2003.

OLIVEIRA, J. B.; GOMES, P. A.; ALMEIDA, M. R. Carvão vegetal: Destilação, Carvoejamento, Propriedades, Controle de qualidade. **CETEC**, Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais, Belo Horizonte, v. 1, n. 6, p. 170, 1982.

PARIKH, J.; CHANNIWALA, S. A.; GHOSAL, G. K. A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels. **Fuel**, v. 84, n. 5, p. 487–494, 2005.

PEREIRA, B. L. C. **Qualidade da madeira de eucalyptus para a produção de carvão vegetal**. 2012. 103 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.

PEREIRA, B. L. C.; CARNEIRO, A. D. C. O.; CARVALHO, A. M. M. L.; COLODETTE, J. L.; OLIVEIRA, A. C.; FONTES, M. P. F. Influence of Chemical Composition of Eucalyptus Wood on Gravimetric Yield and Charcoal Properties. **BioResources**, v. 8, n. 3, p. 4574–4592, 2013. a.

PEREIRA, B. L. C.; CARNEIRO, A. de C. O.; CARVALHO, A. M. M. L.; TRUGILHO, P. F.; MELO, I. C. N. A.; OLIVEIRA, A. C. Estudo da degradação térmica da madeira de Eucalyptus através de termogravimetria e calorimetria. **Revista Arvore**, v. 37, n. 3, p. 567–576, 2013. b.

PEREIRA, B. L. C.; OLIVEIRA, A. C.; CARVALHO, A. M. M. L.; CARNEIRO, A. de C. O.; SANTOS, L. C.; VITAL, B. R. Quality of Wood and Charcoal from Eucalyptus Clones for Ironmaster Use. **International Journal of Forestry Research**, v. 2012, p. 1–8, 2012.

PIJARN, N.; INTARAPRASERT, J.; OPHAP, S.; UMA, T.; DEEKARNKOL, S.; BOWORNKIETKEAW, W. Microstructural characterization of white charcoal for rapid reduction of chemical oxygen demand and automatically adjust pH to neutral in wastewater treatment. **Journal of Materials Research and Technology**, 2021. <<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.04.082>>

PROTÁSIO, T. D. P.; JUNIOR, M. G.; MIRMEHDI, S.; TRUGILHO, F.; NAPOLI, A.; KNOVACK, K. M. Combustion of biomass and charcoal made from babassu nutshell. **Cerne**, v. 23, n. 1, p. 1–10, 2017. a.

PROTÁSIO, T. D. P.; TRUGILHO, P. F.; ARAÚJO, A. C. C.; BASTOS, T. A.; ROSADO, S. C. da S.; PINTO, J. F. N. Classification of Eucalyptus clones by the ratio syringyl / guaiacyl and growth characteristics for energy use. **Scientia Forestalis**, v. 45, n. 114, p. 327–341, 2017. b.

PROTÁSIO, T. de P.; COUTO, A. M.; REIS, A. A. Dos; TRUGILHO, P. F.; GODINHO, T. P. Potencial siderúrgico e energético do carvão vegetal de clones de Eucalyptus

spp aos 42 meses de idade. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 33, n. 74, p. 137–149, 2013.

PROTÁSIO, T. de P.; LIMA, M. D. R.; TEIXEIRA, R. A. C.; ROSÁRIO, F. S.; ARAÚJO, A. C. C.; ASSIS, M. R.; HEIN, P. R. G.; TRUGILHO, P. F. Influence of Extractives Content and Lignin Quality of Eucalyptus Wood in the Mass Balance of Pyrolysis Process. **Bioenergy Research**, v. 14, n. 1, p. 175–189, 2021. a.

PROTÁSIO, T. de P.; NEVES, T. A.; REIS, A. A. Dos; TRUGILHO, P. F. Effect of age and clone on the quality of *Eucalyptus* spp. wood aimin bioenergy production. **Ciência Florestal**, v. 24, n. 2, p. 465–477, 2014. a.

PROTÁSIO, T. de P.; ROQUE, M. D. L.; SCATOLINO, M. V.; SILVA, A. B.; FIGUEIREDO, I. C. R.; HEIN, P. R. G.; TRUGILHO, P. F. Charcoal productivity and quality parameters for reliable classification of Eucalyptus clones from Brazilian energy forests. **Renewable Energy**, v. 164, p. 34–45, 2021. b.

PROTÁSIO, T. de P.; SCATOLINO, M. V.; LIMA, M. D. R.; DE ARAÚJO, A. C. C.; DE FIGUEIREDO, I. C. R.; BUFALINO, L.; HEIN, P. R. G.; TRUGILHO, P. F. Insights in quantitative indexes for better grouping and classification of Eucalyptus clones used in combustion and energy cogeneration processes in Brazil. **Biomass and Bioenergy**, v. 143, n. October, 2020.

PROTÁSIO, T. de P.; TRUGILHO, P. F.; MIRMEHDI, S.; SILVA, M. G. Da. Quality and energetic evaluation of the charcoal made of babassu nut residues used in the steel industry. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 38, n. 5, p. 435–444, 2014. b.

Qi, Y.; JANG, J. H.; HIDAYAT, W.; LEE, A. H.; LEE, S. H.; CHAE, H. M.; KIM, N. H. Carbonization of reaction wood from *Paulownia tomentosa* and *Pinus densiflora* branch woods. **Wood Science and Technology**, v. 50, n. 5, p. 973–987, 2016.

QUIRINO, W. F.; BRITO, J. O. Características e índice de combustão de briquetes de carvão vegetal. **IPEF**, Brasília, 1991.

R CORE TEAM, A. L. A. E. F. S. C. **R Foundation for Statistical Computing**. Vienna, Austria.

RAAD, T. J. **Simulação do processo de secagem e carbonização do *Eucalyptus* spp.** 2004. 115 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Minas Gerais, 2004.

RAAD, T. J.; PINHEIRO, P. C.; YOSHIDA, M. I. Equação geral de mecanismos cinéticos da carbonização do *Eucalyptus* spp. **Cerne**, v. 12, n. 2, p. 93–106, 2006.

RIBEIRO, G. B. de D.; ISBAEX, C.; VALVERDE, S. R. Produção de biomassa florestal para energia em sistemas agroflorestais. **Pesquisa Florestal**, v. 37, n. 92, p. 605–618, 2017.

ROUSSET, P.; FIGUEIREDO, C.; DE SOUZA, M.; QUIRINO, W. Pressure effect on the quality of eucalyptus wood charcoal for the steel industry: A statistical analysis approach. **Fuel Processing Technology**, v. 92, n. 10, p. 1890–1897, 2011.

SANTOS, R. C. Dos; CARNEIRO, A. D. C. O.; CASTRO, A. F. M.; CASTRO, R. V. O.; BIANCHE, J. J.; SOUZA, M. M. De; CARDOS, M. T. Correlações entre os parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto. **Scientia Forestalis**, n. 90, p. 221–230, 2011.

SANTOS, R. C. **Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto**. 2010. 175 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.

SBS, Sociedade Brasileira de Silvicultura. **Fatos e números do Brasil Florestal**. [s.l.], p. 93, 2008.

SHAFIZADEH, F. The Chemistry of Pyrolysis and Combustion. In: **The chemistry of solid wood, advances in chemistry series**. [s.l.: s.n.]. p. 489–530.

SHAFIZADEH, F. Pyrolytic reactions and products of biomass. In: ELSEVIER (Ed.). **Fundamentals of Biomass Thermochemical Conversion**. London. p. 183–217.

SIEBENEICHLER, E. A.; COSTA, L. M. Da; FIGUEREDO, N. A.; TRONTO, J.; ROCHA, P. A. Influência de temperatura e taxas de aquecimento na resistência mecânica, densidade e rendimento do carvão da madeira de *Eucalyptus cloeziana*. **Revista Ciência da Madeira**, v. 8, n. 2, p. 82–94, 2017.

SILVA, D. A. Da. Qualidade do carvão vegetal produzido com madeiras da região de Manaus em fornos de alvenaria. **Acta Amazonica**, v. 18, p. 163–178, 1988.

SILVA, F. T. M.; ATAÍDE, C. H. Valorization of eucalyptus urograndis wood via carbonization: Product yields and characterization. **Energy**, v. 172, p. 509–516, 2019.

SILVA, M. F.; FORTES, M. M.; SETE JUNIOR, C. R. Characteristics of Wood and Charcoal from Eucalyptus clones. **Floresta e Ambiente**, v. 25, n. 3, 2018.

SMITH, L. I. **A tutorial on Principal Components Analysis**. 27 p. v. 37. 2002.

SOARES, V. C. **Comportamento térmico, químico e físico da madeira e do carvão de *Eucalyptus urophylla* X *Eucalyptus grandis* em diferentes idades**. 2011. 108 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

TAPPI, Technical Association of the Pulp and Paper Industry. **T 222 om-02**. [s.l.] : Acid-insoluble lignin in wood and pulp, 2002.

\_\_\_\_\_. **T 264 cm-97**. [s.l.] : Preparation of wood for chemical analysis, 1997.

THOMAZ, D. T.; MAGALHÃES, W. L. E.; LIMA, E. A.; SILVA, H. D. Poder calorífico da madeira e do carvão vegetal: lignina e carbono fixo como determinantes. **Embrapa Florestas**, 2007.

TOLMASQUIM, M. T.; GUERREIRO, A.; GORINI, R. Matriz energética Brasileira: Uma prospectiva. **Novos Estudos CEBRAP**, n. 79, p. 47–69, 2007.

TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; MORI, F. A.; LINO, A. L. Avaliação de Clones de

Eucalyptus para Produção de Carvão Vegetal. **Cerne**, v. 7, n. 2, p. 104–114, 2001.

TRUGILHO, P. F.; SILVA, D. A. Influência da temperatura final de carbonização nas características físicas e químicas do carvão vegetal de jatobá (*Himenea courbaril* L.). **Scientia Agraria**, v. 2, n. 1, 2001.

VALE, A. T.; DIAS, Í. S.; SANTANA, M. A. E. Relações entre propriedades químicas, físicas e energéticas da madeira de cinco espécies do Cerrado. **Ciência Florestal**, v. 20, n. 1, p. 137–145, 2010.

VALE, A. T. Do; BRASIL, M. A. M.; CARVALHO, C. M. De; VEIGA, R. A. de A. Produção de energia do fuse de *Eucalyptus grandis* HILL EX-MAIDEN e *Acacia mangium* WILLD AND *Acacia mangium* Willd em diferentes níveis de adubação. **Cerne**, v. 6, n. 1, p. 83–88, 2000.

VELLA, M. M. C. F.; VALENTE, O. F.; VITAL, B. R.; LELLES, J. G. Influência da Velocidade de carbonização da madeira nos rendimentos e nas propriedades do carvão produzido. **IPEF**, n. 41/42, p. 64–76, 1989.

VIEIRA, T. A. S. **Qualidade e combustibilidade da madeira de clones de *Eucalyptus* spp.** 2019. 124 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2019.

VILELA, A. de O. **Desenvolvimento e validação técnica, de um forno industrial de carbonização, modelo container 2ª geração.** 2014. 372 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

WEBER, K.; QUICKER, P. Properties of biochar. **Fuel**, v. 217, p. 240–261, 2018.

XIAO, M. Z.; CHEN, W. J.; CAO, X. F.; CHEN, Y. Y.; ZHAO, B. C.; JIANG, Z. H.; YUAN, T. Q.; SUN, R. C. Unmasking the heterogeneity of carbohydrates in heartwood, sapwood, and bark of Eucalyptus. **Carbohydrate Polymers**, v. 238, n. March, p. 116212, 2020.

YANG, H.; YAN, R.; CHEN, H.; LEE, D. H.; ZHENG, C. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. **Fuel**, v. 86, n. 12–13, p. 1781–1788, 2007.

YU, J.; WANG, D.; SUN, L. The pyrolysis of lignin : Pathway and interaction studies. **Fuel**, v. 290, 2021.

YU, X. Y.; YING, G. G.; KOOKANA, R. S. Sorption and desorption behaviors of diuron in soils amended with charcoal. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, [s. l.], v. 54, n. 22, p. 8545–8550, 2006.

## 7. APÊNDICES

### APÊNDICE A – DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE APARENTE DO CARVÃO VEGETAL



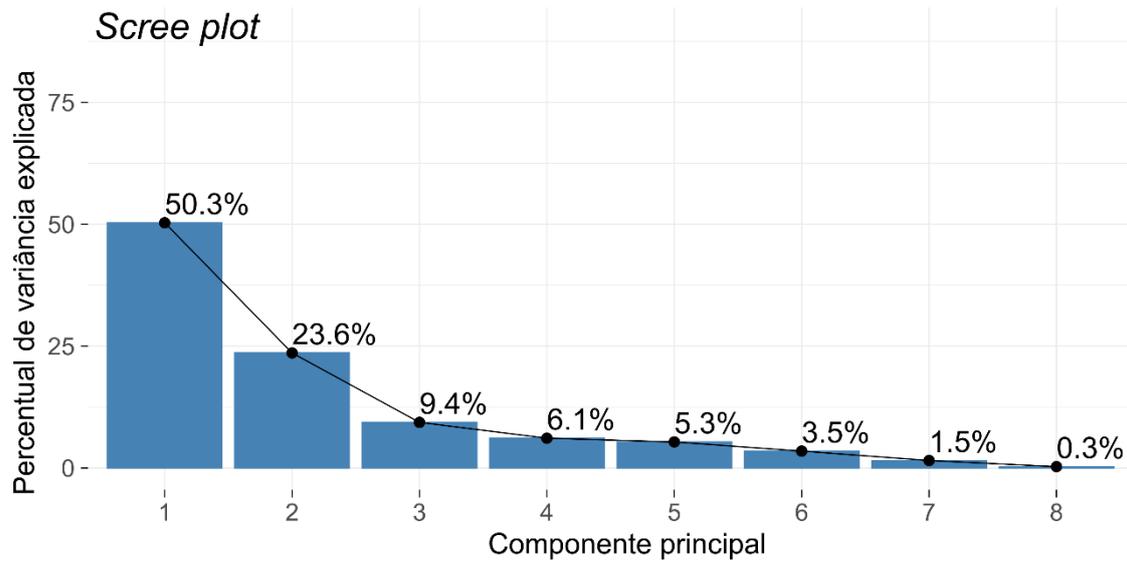
Fonte: a autora (2021).

**APÊNDICE B – FRIABILÔMETRO UTILIZADO PARA TESTE DE  
TAMBORAMENTO DO CARVÃO VEGETAL**



Fonte: a autora (2021).

**APÊNDICE C – SCREE PLOT DO PERCENTUAL DE VARIÂNCIA EXPLICADA POR CADA COMPONENTE PRINCIPAL**



**APÊNDICE D – COEFICIENTES, CORRELAÇÃO E CONTRIBUIÇÃO DAS VARIÁVEIS EM CADA COMPONENTE PRINCIPAL**

Variável	CP 1			CP 2		
	$\hat{e}_1$	r	Cont (%)	$\hat{e}_2$	r	Cont (%)
TMP	-0.0881	-0.25	0.78	0.4872	0.95	23.74
TPR	-0.089	-0.25	0.79	0.4898	0.95	23.99
RCV	-0.337	-0.96	11.36	-0.123	-0.24	1.51
RGC	0.0662	0.19	0.44	0.4411	0.86	19.46
RNC	0.3017	0.86	9.1	-0.1593	-0.31	2.54
DA	0.1975	0.56	3.9	-0.2097	-0.41	4.4
P	0.1809	0.51	3.27	-0.1108	-0.22	1.23
F	-0.025	-0.07	0.06	0.1068	0.21	1.14
TMV	-0.3433	-0.97	11.78	-0.1035	-0.2	1.07
TCZ	0.3293	0.93	10.84	-0.023	-0.04	0.05
TCF	0.3427	0.97	11.74	0.1065	0.21	1.13
U	0.1302	0.37	1.7	0.4333	0.84	18.77
ECF	0.3417	0.97	11.68	0.0077	0.02	0.01
PCS	0.333	0.94	11.09	0.0701	0.14	0.49
DE	0.2788	0.79	7.77	-0.0689	-0.13	0.47
DG	-0.1924	-0.55	3.7	-0.0025	0	0

$\hat{e}$ : autovetores; r: correlação entre as variáveis e as componentes principais

**APÊNDICE E – CORRELAÇÃO LINEAR DAS VARIÁVEIS NA COMPONENTE PRINCIPAL 1 (A) E NA COMPONENTE PRINCIPAL 2 (B)**

