

CARBONIZAÇÃO DA MADEIRA DE *EUCALYPTUS* SP. EM SISTEMA FORNOS- FORNALHA: UMA ABORDAGEM SOBRE O CONTROLE DE TEMPERATURA E RECUPERAÇÃO DE COPRODUTOS

Patrick da Cruz Silva¹

Talita Baldin²

Fernando Colen³

Edy Eime Pereira Barúna⁴

Marina Donaria Chaves Arantes⁵

¹Graduando do Curso de Engenharia Florestal, Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Minas Gerais (ICA/UFMG), Montes Claros, Minas Gerais, email: ps.cruzsilv2@gmail, ID Lattes: 7093274394010009.

²Professora do Departamento de Engenharia Florestal, Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Minas Gerais (ICA/UFMG), Montes Claros, Minas Gerais, email: talitabaldin@ica.ufmg.br., ID Lattes: 3775067422694277.

³Professor do Departamento de Engenharia Agrícola, Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Minas Gerais (ICA/UFMG), Montes Claros, Minas Gerais, email: fernandocolen@ica.ufmg.br., ID Lattes: 9378402755546184.

⁴Professor do Departamento Engenharia Florestal, Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Minas Gerais (ICA/UFMG), Montes Claros, Minas Gerais, email: ebarauna@ica.ufmg.br., ID Lattes: 3160416445274012.

⁵Professora do Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ - Campus de Sete Lagoas), Sete Lagoas, Minas Gerais, email: mdonaria@ufs.j.edu.br., ID Lattes: 4778014120675712

Carbonização da Madeira de *Eucalyptus* sp. em Sistema Fornos-Fornalha: Uma Abordagem sobre o Controle de Temperatura e Recuperação de Coprodutos

RESUMO

Este capítulo explora a otimização do processo de carbonização da madeira de *Eucalyptus* sp. em um sistema fornos-fornalha, com foco no controle da temperatura e na recuperação de coprodutos, diante dos desafios da produção empírica de carvão vegetal. A pesquisa busca melhorar a eficiência e a sustentabilidade do processo, detalha a metodologia de carbonização em quatro fases, controlando a temperatura interna do forno e analisando a emissão de gases condensáveis e não condensáveis. Os resultados evidenciam a transformação da madeira em carvão de qualidade, demonstrando a importância do controle térmico para o rendimento e a qualidade do carvão. A abordagem sustentável busca recuperar e aproveitar os coprodutos, como o licor pirolenhoso, contribuindo para a redução de emissões dos gases do efeito estufa e adotando princípios ecológicos, oferecer insights sobre a modernização da produção de carvão vegetal, destacando a importância do controle de temperatura e do aproveitamento de subprodutos para a eficiência do processo.

Palavras-chave: Carvão Vegetal, Fornos-Fornalhas, Subprodutos, Sustentabilidade, Carbonização.

Wood Carbonization of *Eucalyptus* sp. in Furnaces-Kiln System: An Approach to Temperature Control and Co-Product Recovery

ABSTRACT

This chapter explores the optimization of the wood carbonization process of *Eucalyptus* sp. in a furnaces-kiln system, with a focus on temperature control and co-product recovery, addressing the challenges of empirical charcoal production. The research aims to enhance the efficiency and sustainability of the process, detailing the carbonization methodology in four phases, by controlling the internal furnace temperature and analyzing the emission of condensable and non-condensable gases. The results underscore the conversion of wood into quality charcoal, highlighting the significance of thermal control for charcoal yield and quality. The sustainable approach seeks to recover and utilize co-products such as pyroligneous liquor, contributing to the reduction of greenhouse gas emissions and adopting ecological principles. Offering insights into the modernization of charcoal production, the chapter emphasizes the importance of temperature control and co-product utilization for process efficiency and environmental responsibility.

Key-words: Charcoal, Furnace-Kiln System, By-Products, Sustainability, Carbonization.

INTRODUÇÃO

Segundo Relatório Anual 2022 da Indústria Brasileira de Árvores (Ibá) a produção de carvão vegetal em cadeia nacional posiciona o Brasil como principal produtor no mundo, sendo importante matéria-prima. Minas Gerais possui a maior área de florestas plantadas, com 2,31 milhões de hectares (IBÁ, 2022), além disso, o estado se destaca por ser o maior

produtor de carvão vegetal, com participação em 87,5 do volume total nacional (IBGE, 2020). A região norte de Minas Gerais conta com uma elevada produção de carvão vegetal e, de acordo com dados levantados pelo IBGE, em 2019 foram produzidas cerca de 6.204 toneladas, das quais 916 foram provenientes da região Norte do Estado.

Apesar de sua posição como principal produtor mundial desse recurso energético, o Brasil ainda enfrenta desafios significativos na modernização de sua base produtiva. Visto que mais de 60% de toda a produção de carvão vegetal é atribuída a pequenos e médios produtores, cujas práticas frequentemente envolvem o uso de fornos de encosta e circulares. Nesse contexto, o processo de carbonização se desenrola de maneira empírica, carente de controles precisos de temperatura e destituído de mecanismos eficazes para a captura e utilização de gases resultantes (DONATO, 2017).

Essa abordagem rudimentar tem consequências substanciais, não somente para a eficiência da produção, mas também para as implicações ambientais. A ausência de técnicas avançadas, como o preciso controle de temperatura, pode resultar em variações na qualidade do carvão, afetando diretamente sua aplicabilidade em diversas indústrias. Além disso, a falta de sistemas de aproveitamento de gases e controle de emissões contribui para a poluição atmosférica e agrava as preocupações com as mudanças climáticas.

Para assegurar um carvão vegetal de qualidade e sustentável, é necessário que os produtores adotem uma série de práticas, como o uso de madeira de florestas plantadas, tecnologias avançadas de carbonização para otimizar a produtividade, recuperar os subprodutos gerados no processo, incorporar a utilização dos gases prejudiciais ao meio ambiente na geração de energia ou em coprodutos, tudo isso enquanto demonstram um compromisso efetivo com as dimensões sociais e trabalhistas.

O processo de carbonização da madeira, denominado pirólise lenta, produz, além da fração de carvão vegetal, porcentagens significativas de gases não condensáveis (GNC) e condensáveis (GC). Estatísticas mostram que uma tonelada de madeira é convertida em 250 kg de carvão e 750 kg de fumaça (VIEIRA, et al., 2018). No processo convencional de produção de carvão vegetal, comenta Donato (2017), aproximadamente 30% da madeira é convertida em carvão vegetal e o restante de sua massa (70%) é convertida em gases que na maior parte são lançados para atmosfera, sendo que aproximadamente 25% destes gases são compostos não condensáveis (O_2 , CO , CO_2 , H_2 e CH_4) e 45% são compostos orgânicos condensáveis.

Na fase líquida da etapa de carbonização é onde ocorre a condensação dos gases, que culmina na formação de duas fases distintas: uma líquida, denominada de licor pirolenhoso, extrato pirolenhoso, ácido pirolenhoso, vinagre de madeira, fumaça líquida e até mesmo bioóleo, e uma densa, conhecida como alcatrão. A composição química dos condensáveis é notavelmente complexa, apresentando uma gama diversificada de componentes, dos quais se destacam ácido acético (constituindo cerca de 5%), metanol (representando aproximadamente 2%), alcatrão solúvel (constituindo cerca de 5%), alcatrão insolúvel (com cerca de 6%), além de água e outros componentes (totalizando cerca de 23,5%).

Vinicius Leite de Campos Menegale (2013) ressalta que a produção de carvão vegetal proveniente de fontes renováveis e seu emprego na geração de bioenergia para variados processos industriais, existe uma lacuna em pesquisas destinadas a mitigar os impactos ambientais. A recuperação e a devida aplicação dos subprodutos resultantes da carbonização da madeira desempenham um papel fundamental na redução do impacto ambiental resultante da liberação de gases na atmosfera. Através do processo de condensação e recuperação dos gases voláteis, emerge o extrato pirolenhoso, uma substância líquida com matiz que varia entre o amarelo e o marrom-avermelhado, apresentando potencial para aplicação na agricultura e diversos outros setores.

No decorrer do processo de carbonização da madeira, o carvão emerge como apenas um dos elementos constituintes dos produtos que podem ser resultantes. Quando se empregam sistemas especialmente concebidos para a coleta, é possível aproveitar os condensados pirolenhosos (identificados como fração pirolenhosa ou líquido pirolenhoso), bem como os gases que não conseguem ser condensados. A abordagem mais abrangente e eficaz envolve a utilização não somente do carvão vegetal, mas também dos condensados e dos gases não condensáveis provenientes da madeira, e isso ocorre através do processo denominado "destilação seca". Essa abordagem pode ser estabelecida por meio da adoção de retortas, diferentemente dos tradicionais fornos convencionais (CAMPOS, 2007).

Dentre os produtos líquidos resultantes, destaca-se notavelmente o líquido pirolenhoso, que é identificado por diferentes termos, tais como licor, extrato pirolenhoso, ácido pirolenhoso, vinagre de madeira, licor pirolenhoso, fumaça líquida e bioóleo. De maneira particular, o líquido pirolenhoso demonstra grande promessa no âmbito agrícola para futuras utilizações. Esse líquido assume um papel de importância substancial e carrega várias denominações, todas aludindo à mesma substância com múltiplas possibilidades de aplicação.

A carbonização da madeira, com seu conjunto de processos intrincados, se destaca como a principal matriz desses produtos e suas valiosas aplicações (CAMPOS, 2007)

A riqueza química do licor pirolenhoso é ainda mais acentuada devido à presença de uma ampla variedade de outros compostos. Diferentes estudos têm se dedicado a elucidar essa complexidade (Goos (1952) e Campos (2007).

Através das investigações, identificaram-se mais de 213 compostos distintos presentes neste licor. Esse elenco abrangente de compostos contribui para a diversidade e a particularidade das suas propriedades, que despertou interesse em uma série de aplicações industriais e científicas.

Dentre às inúmeras possibilidades de uso, o licor pirolenhoso se destaca como repelente orgânico natural, uso energético em combustível via gás de síntese e motor a diesel, na produção de químicos como resinas, fertilizantes, flavorizantes e adesivos. Miyasaka et al. (2001), encontrou sucesso no combate a determinados tipos de pragas e na prevenção de doenças de cultivos, como pulgões, moscas de frutas, ácaros etc. É na indústria florestal, porém, que o líquido pirolenhoso tem a sua mais antiga aplicação, na proteção da madeira contra agentes deterioradores. A porção densa, escura, conhecida como alcatrão ou creosoto vegetal, em virtude de seu caráter fenólico, é eficiente contra fungos e insetos xilófagos (PAES et al., 2002).

Para a condensação dos gases da carbonização e o seu correto aproveitamento algumas medidas devem ser cautelosamente avaliadas, como a eficiência do condensador, a temperatura de condensação, a condução da carbonização e a qualidade da matéria-prima. Nesse sentido, o presente capítulo trata sobre a confecção, instalação e funcionamento de um condensador para aproveitamento dos gases da produção de carvão vegetal de *Eucalyptus* sp. em sistemas fornos-fornalha, com controle da temperatura por fase da carbonização.

METODOLOGIAS

Instalação da unidade demonstrativa de carbonização

O sistema fornos-fornalha desempenha um papel crucial no processo de carbonização, permitindo a otimização das condições para a obtenção de carvão vegetal de alta qualidade. Em nossa pesquisa, utilizamos um sistema instalado na unidade demonstrativa do Instituto de Ciências Agrárias da UFMG, Montes Claros – MG, para conduzir o processo de carbonização da madeira proveniente de *Eucalyptus* sp.

A estrutura permite o controle de temperatura em cada etapa do processo, proporcionando o ambiente adequado para as reações termoquímicas ocorrerem com eficiência.

Para controlar a temperatura durante as diferentes fases da carbonização, adotamos a abordagem de regulação da entrada de ar pelos "tatus" dos fornos. Essa manipulação cuidadosa dos tatus permitiu aumentar ou diminuir o fluxo de ar, garantindo a temperatura necessária para cada etapa da carbonização. Além disso, a temperatura dos gases nos dutos foi monitorada constantemente por meio de um pirômetro, contribuindo para a precisão do controle térmico.

O sistema fornos-fornalha não apenas possibilitou a condução do processo de carbonização de maneira controlada, mas também viabilizou a coleta e aproveitamento dos produtos condensáveis e dos finos de carvão, contribuindo para a eficiência energética e a minimização dos impactos ambientais. A metodologia adotada seguiu as orientações do manual de operação do sistema fornos-fornalha (2019), assegurando a conformidade e a qualidade dos resultados obtidos.

Para a implementação do sistema produtivo com tecnologia para recuperação dos gases condensáveis e mitigação dos aspectos ambientalmente negativos do processo produtivo do carvão vegetal e aumento da eficiência da carbonização, foi confeccionado um sistema de recuperação de coprodutos na unidade demonstrativa composta por quatro fornos e uma fornalha, instalados no Instituto de Ciências Agrárias da UFMG, na cidade de Montes Claros, MG.

Figura 1: Sistema Fornos-Fornalha.



A instalação da unidade demonstrativa de produção sustentável de carvão vegetal, ocorreu no período de 16 a 21 de dezembro de 2019 pela empresa CLA Empreendimentos Florestais e Equipe Técnica da UFV, formada por Sálvio Teixeira Rodrigues, Humberto Fauller

de Siqueira e Artur Queiroz Lana. Foram construídos 4 fornos circulares de superfície com diâmetro de 3 m, interligados a uma fornalha central. O sistema tem capacidade de produção anual de até 1.040,76 mdc de carvão a partir de um ciclo de 144 carbonizações anuais.

Figura 2: Imagem superior, do Sistema Fornos-Fornalha, obtida a partir de drone.



Além dos fornos, a área conta com galpão de apoio aos trabalhadores, pesquisadores e participantes de atividades de capacitação. A estrutura dispõe de local abrigado do sol e da chuva (sala, com porta e tranca para armazenamento de material e equipamentos necessários à operação do sistema fornos-fornalha); banheiro completo com sanitário e chuveiro; pia para lavagem de louça; mesas e cadeiras para refeições, reuniões e descanso, sistema de esgotamento e tratamento de resíduos gerados.

Para a validação estrutural da Unidade Produtiva instalada no ICA por meio do projeto BRA/14/G31 – Siderurgia Sustentável, foram realizadas em março de 2020 um ciclo completo de carbonização da madeira (Figuras 4, 5 e 6).

Confecção e instalação do condensador

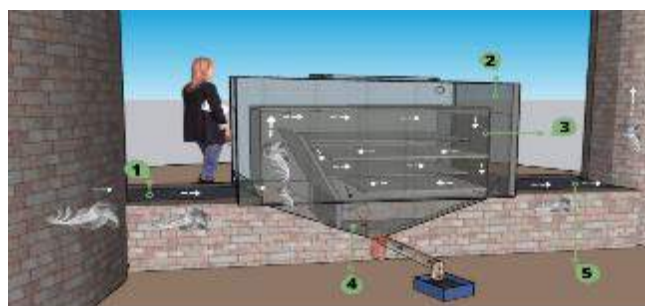
Nesse processo busca-se a recuperação dos coprodutos condensáveis (licor e alcatrão). Para tal, foi elaborado um condensador em fluxo ascendente-descendente de vapores (Figura 1). O sistema consiste em uma estrutura compacta provida de defletores que geram o movimento oscilatório dos fluidos gasosos e condensáveis, com a finalidade de aumentar o tempo de residência interna em ambiente de superfície específica favorável à condensação com consequente recuperação dos coprodutos.

Figura 3: Vista posterior do condensador em fluxo ascendente-descendente de vapores com camisa para troca de calor e liquefação dos gases condensáveis.



O condensador possui os seguintes componentes.

Figura 3: Vista frontal do condensador em fluxo ascendente-descendente de vapores.



1. duto com passagem dos gases provenientes do processo de carbonização; 2. sistema de “camisas” preenchido com fluido dietileno-glicol com recipiente acoplado para armazenamento do refrigerante; 3. estrutura retangular galvanizada em Zinco constituída por bandejas horizontais inclinadas ao longo do eixo principal. As bandejas constituem parte integrante do sistema, e são removíveis para facilitar a limpeza e coleta do material condensado; 4. precipitação dos condensáveis com duto e recipiente para coleta; 5. passagem dos gases não condensáveis para combustão na fornalha pré-existente. A parte superior do condensador é provida de um dispositivo para vedação e acesso interno ao sistema.

Carbonização da madeira

O processo de carbonização da madeira é uma transformação térmica complexa que envolve a decomposição da matéria orgânica presente na estrutura da madeira em condições de ausência ou escassez de oxigênio. Esse processo é fundamental para a obtenção de carvão vegetal.

Uma das etapas cruciais desse processo é o controle da temperatura por faixa de pirólise, o fenômeno no qual a madeira é submetida a altas temperaturas na ausência de oxigênio, levando à quebra das suas moléculas complexas em compostos mais simples.

A temperatura é um fator determinante para o tipo de reações químicas que ocorrem durante a pirólise e, conseqüentemente, para as características finais do carvão produzido. O controle rigoroso da temperatura em cada faixa é essencial para garantir que as reações químicas ocorram de forma adequada e para obter carvão vegetal de alta qualidade. A variação nas temperaturas pode afetar tanto o rendimento gravimétrico da carbonização quanto as propriedades do carvão produzido.

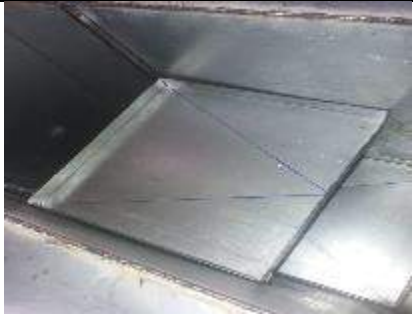
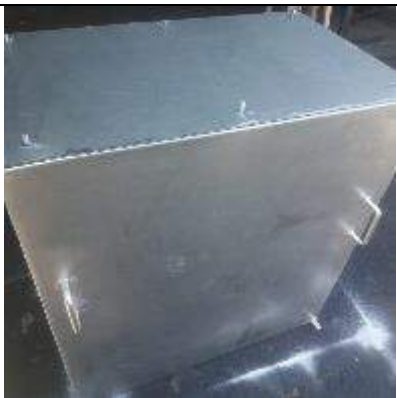
Uma etapa central nesse procedimento é o controle da temperatura por faixa de pirólise, onde a madeira é submetida a altas temperaturas na ausência de oxigênio, resultando na quebra das complexas moléculas da madeira em compostos mais simples. A temperatura desempenha um papel determinante nas reações químicas durante a pirólise, influenciando diretamente nas características finais do carvão produzido. O rigoroso controle de temperatura por faixa é vital para garantir a adequada ocorrência das reações químicas e a obtenção de carvão vegetal de qualidade. Flutuações nas temperaturas podem impactar tanto o rendimento gravimétrico da carbonização quanto as propriedades do carvão resultante. MG. Utilizou-se madeira de *Eucalyptus sp.*, totalizando 4.462,7 kg, com densidade de 500 kg/m³ e diâmetros variando de 6,3 a 15,9 cm. O procedimento seguiu a metodologia e orientações do manual de operação de sistema fornos-fornalha (2019).

A carbonização da madeira foi executada em um dos fornos do sistema fornos-fornalha, situado na unidade demonstrativa do Instituto de Ciências Agrárias da UFMG, Montes Claros –

Iniciou-se com a ignição da fornalha para a remoção inicial dos gases internos dos fornos, seguida da ignição destes. A carbonização ocorreu ao longo de aproximadamente 3 dias, dividida em quatro fases definidas pelas faixas de temperatura e fenômenos observados na madeira. A primeira fase (160°C a 170°C por 12 horas) foi endotérmica, com vapor de água liberado e secagem da madeira. A segunda fase (250°C a 270°C por 12 horas) também foi endotérmica, com degradação das hemiceluloses e eliminação de gases. A terceira fase (340°C a 350°C por 24 horas) foi exotérmica, marcada por degradação da celulose, intensa produção de gases e formação de carvão vegetal. A quarta fase (350°C a 360°C por 18 horas) foi também exotérmica, com redução da emissão de gases e aumento da concentração de carbono no carvão vegetal.

Para controlar a temperatura, adotou-se o uso estratégico de tijolos para regular a entrada de ar pelos “tatus” do forno, alinhados com os parâmetros de tempo e temperatura de cada fase da carbonização. O processo foi monitorado com um pirômetro, acompanhando a temperatura dos gases nos dutos. Após o fechamento da entrada de oxigênio, o resfriamento natural ocorreu ao longo de 4 dias.

Tabela 1 – Descritivo dos materiais utilizados na confecção do condensador.

Figura	Descrição
	Figura 3 – Sistema de camisa do condensador.
	Figura 4 – Sistema de camisa do condensador.
	Figura 5 – Bandejas horizontais inclinadas
	Figura 6 – Detalhe da tampa de fechamento do condensador.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A carbonização da madeira teve início no dia 25 de novembro de 2021 às 20:30 horas em um dos fornos do sistema fornos-fornalha, instalado na unidade demonstrativa do Instituto de Ciências

Agrárias da UFMG, Montes Claros–MG. Utilizou-se 4.462,7 kg de madeira de *Eucalyptus* sp. com densidade de 500 kg/m³ e classes de diâmetro variando entre 6,3 e 15,9 cm para encher o forno. O ciclo de carbonização e monitoramento do sistema seguiu a metodologia e orientações do manual de operação de sistema fornos fornalha (2019), apresentando leves alterações na primeira carbonização. O processo não se iniciou com a ignição da fornalha que apresenta a função inicial de aumentar a retirada de gases de dentro dos fornos, para que depois houvesse a ignição destes. O start da ignição se deu com a fornalha desligada, para que pudesse ser possível visualizar a condição real do primeiro modelo proposto do condensador.

Arruda et al. (2011) ressaltaram que com o controle da temperatura interna do forno é possível realizar a obtenção do perfil térmico da carbonização e do resfriamento condizentes com os fenômenos que realmente ocorrem. Essas informações são importantes manter o controle do processo, resultando em maior rendimento gravimétrico da carbonização e melhoria da qualidade do carvão vegetal. 4 O processo de carbonização levou 83 horas (determinou-se que o término do processo de carbonização aconteceu a partir do momento em que o forno foi selado) e foi realizado em quatro fases, que foram classificadas pela faixa de temperatura e fenômeno que ocorria na madeira.

A Tabela 01 lista a faixa de temperatura teórica obtida pelo controle da carbonização da madeira neste sistema de forno. Essas faixas são obtidas após a carbonização inicial sem controle de temperatura suficiente, o que indica que o rendimento do carvão vegetal é baixo devido à má condução da carbonização, o tempo ideal para carbonização em forno de superfície de 70 horas, a composição química do eucalipto (PEREIRA, 2012); e a degradação térmica de seus principais componentes (RAAD et al., 2006; SANTOS et al., 2012).

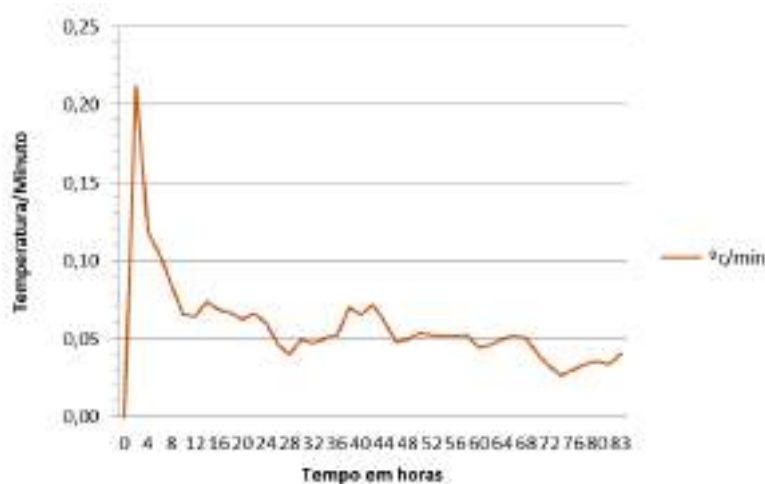
Tabela 2 - Faixas teóricas de temperatura para controle da carbonização no sistema forno-fornalha, a serem mensuradas na cúpula do forno.

Fase	Faixa de temperatura (°C)	Tempo de manutenção (horas)	Fenômeno
I	100-150	15-16	Liberção de vapor de água - secagem da madeira, fase endotérmica.
II	150-275	11-12	Degradação das hemiceluloses, eliminação de gases, fase endotérmica.
III	275-400	23-24	Degradação da celulose, grande produção de gases, fase exotérmica Formação do carvão vegetal.
IV	400-470	17-18	Redução da emissão de gases, fase exotérmica. Aumento da concentração de carbono no carvão vegetal.

Canal et. all. (2016) concluíram em seus estudos que a emissão de gases condensáveis e não condensáveis podem ser em faixas específicas de temperatura durante o processo de carbonização, passando por um ponto de máximo entre as temperaturas de 300 °C e 350 °C, a qual se relaciona com o ponto de degradação máxima das hemiceluloses e celulose, e que durante o processo de carbonização são observadas três fases: aquecimento da madeira sem perda de massa e emissões significativas até temperaturas próximas a 200 °C; picos máximos de degradação e emissão dos gases CO₂, CO e licor pirolenhoso na faixa de temperatura que corresponde a 300 °C e 450°C; e incrementos na produção dos gases CH₄ e H₂ de acordo com aumentos em temperatura a partir de 300° C

Durante a carbonização obteve-se como maior temperatura de 341,9 até o selamento total do forno (fechada dos tatus), e nesta temperatura é possível observar a presença de licor e de um material mais denso que visualmente aparenta ser o alcatrão. A presente produção estimada em Litros dos condensáveis está em torno de 70L para uma massa de madeira de 4.462,7 KG e umidade % de 12,6. No Gráfico 1 observam-se as variações da temperatura ao longo de todo processo de carbonização.

Figura 4: Curva de ganho de temperatura em °C/MIN.

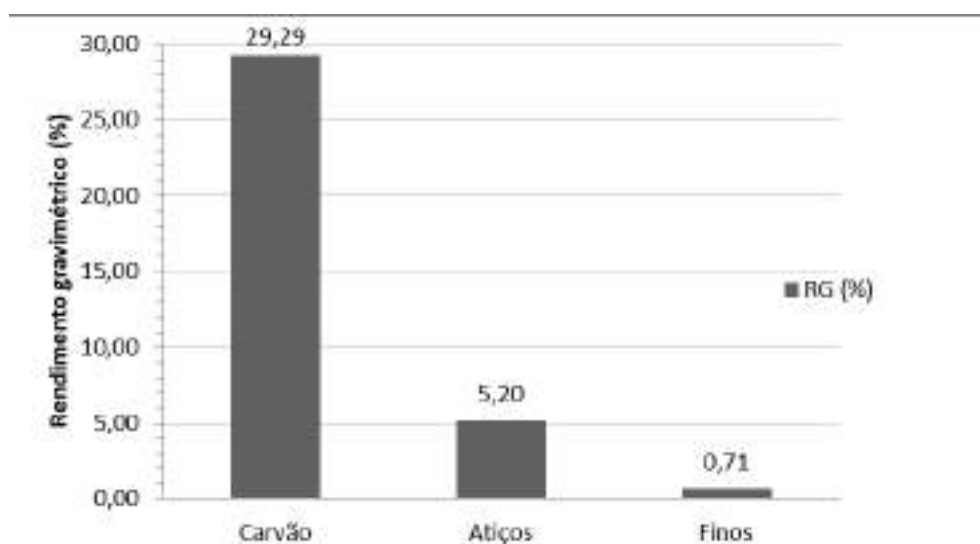


Para realizar o controle da temperatura do sistema, utilizaram-se tijolos buscando regular a entrada de ar pelos “tatus” do forno, respeitando o tempo e a temperatura de cada fase da carbonização. Durante o processo também foi realizado o abastecimento da fornalha e o monitoramento da temperatura dos gases nos dutos utilizando o pirômetro. Após o fechamento da entrada de oxigênio para dentro do forno, ocorreu o processo de resfriamento, de forma natural, pelos 4 dias seguintes. Finalizado o processo de carbonização, cerca de 66 horas até o resfriamento total, foi realizado o descarregamento do forno. Todo o material foi

classificado e pesado: atijos (232,20 Kg), carvão vegetal (1307,6 Kg) e finos (31,5 Kg). Posteriormente, determinou-se a densidade a granel ($161,9 \text{ kg/m}^3$) do carvão vegetal. Ao observarmos os dados, nota-se que a primeira carbonização cuja madeira estava em uma umidade média de 12,6, a produção de licor condensáveis obtida foi de 70 L, a densidade média do líquido obtido através do processo de condensação, foi determinado em função das alíquotas de 50ML retiradas ao longo do processo foi de $1,10 \text{ G/cm}^3$.

Do ponto de vista ecológico ambiental é importante frisar que esta quantidade de gases deixa de ser emitida e passa a ser passível de reutilização, reduzindo assim gases direcionados a camada de ozônio e corroborando com o não agravamento do efeito estufa além de contribuir com os 4R's: Reciclar, Reduzir, Reutilizar e Repensar.

Figura 5: Rendimento gravimétrico, em porcentagem, da carbonização.



Madeira

O material genético utilizado para a carbonização foi o 144, com teor de umidade de 12,6% e densidade básica de 500 kg/m^3 . Foram enforcada $9 \text{ m}^3/\text{forno}$ ($4,5 \text{ t/forno}$) de madeira por ciclo.

Carvão Vegetal

Para a produção de carvão vegetal foi considerado 4 ciclos/mês, sendo 7 meses na estação seca com produção de $6,5 \text{ mdc/forno}$ por ciclo, e 5 meses na estação chuvosa com produção de $4,9 \text{ mdc/forno}$. Foram gerados 5,2% de atijo e 0,7% de finos. De acordo com o software, o carvão vegetal apresentou $161,9 \text{ kg/mdc}$ de densidade a granel, 75,3% de carbono fixo, $1,1 \text{ m}^3/\text{mdc}$ de rendimento volumétrico, e 161,9 de rendimento gravimétrico.

CONCLUSÕES

O capítulo apresentou um detalhado relato sobre o processo de carbonização da madeira de *Eucalyptus sp.* realizado no sistema forno-fornalha, instalado na unidade demonstrativa do Instituto de Ciências Agrárias da UFMG, Montes Claros–MG. O processo foi conduzido com base em uma metodologia que buscou controlar a temperatura interna do forno, permitindo a obtenção de um perfil térmico adequado para a carbonização.

Através das quatro fases distintas, com faixas de temperatura e fenômenos bem definidos, o processo de carbonização revelou a transformação da madeira em carvão vegetal. A importância de se alcançar as temperaturas corretas em cada fase foi ressaltada, pois isso influencia diretamente no rendimento gravimétrico da carbonização e na qualidade do carvão produzido. A análise da emissão de gases condensáveis e não condensáveis, realizada em faixas específicas de temperatura, contribuiu para compreender os pontos críticos do processo. A capacidade de controlar a entrada de ar e a temperatura do sistema usando tijolos permitiu uma carbonização mais eficiente e controlada.

O resultado do processo de carbonização foi a produção de carvão vegetal de alta qualidade, com densidade a granel, teor de carbono fixo e rendimentos satisfatórios. Além dos benefícios econômicos, o processo trouxe implicações positivas do ponto de vista ambiental, contribuindo para a redução de emissões de gases nocivos e apoiando princípios de sustentabilidade.

Com isso, o capítulo proporcionou uma visão abrangente e detalhada do processo de carbonização da madeira, enfatizando a importância do controle da temperatura, a análise das diferentes fases e a valorização dos produtos resultantes.

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de expressar nossa profunda gratidão a todas as pessoas e instituições que contribuíram de forma significativa para a realização deste capítulo. Suas valiosas contribuições e apoio foram fundamentais para o sucesso desta pesquisa. Aos professores Talita Baldin, Fernando Collen, Edy Barúana e Marina Donária nossa sincera apreciação por sua orientação, conhecimento e incentivo ao longo deste projeto. Suas ideias inspiradoras e orientações especializadas foram essenciais para moldar e enriquecer este capítulo. À mestranda Vaniele Bento, expressamos nossa gratidão pela sua colaboração inestimável. Sua dedicação, compromisso e insights forneceram uma perspectiva valiosa que contribuiu de maneira

significativa para a qualidade deste trabalho. Ao Grupo de Estudos em Tecnologia da Madeira (GETEM), nosso agradecimento especial por criarem um ambiente colaborativo e estimulante que fomentou o crescimento acadêmico e o compartilhamento de conhecimento. Agradecemos ao Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD) pelo financiamento concedido a este projeto. Seu apoio financeiro foi crucial para possibilitar a realização deste estudo e sua contribuição para o avanço da pesquisa é imensurável. Por fim, expressamos nossa profunda gratidão ao Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Minas Gerais (ICA/UFGM) por fornecerem o ambiente e os recursos necessários para conduzir esta pesquisa. Cada um dos mencionados desempenhou um papel vital na concretização deste capítulo, e estamos profundamente gratos por suas contribuições.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARRUDA, T. P. M. et al. Avaliação de duas rotinas de carbonização em fornos retangulares. *Revista Árvore*, v.35, n.4, p.949-955, 2011.
- CANAL, W. D.; CARVALHO, A. M. M. L.; OLIVEIRA, A. C.; DE MAGALHÃES, M. A.; CÂNDIDO, W. L.; FIALHO, L. de F. Comportamento térmico, emissão de gases condensáveis e não condensáveis no processo de carbonização da madeira. *Pesquisa Florestal Brasileira*, [S. l.], v. 36, n. 87, p. 261–267, 2016. DOI: 10.4336/2016.pfb.36.87.1083. Disponível em: <https://pfb.cnpf.embrapa.br/pfb/index.php/pfb/article/view/1083>.
- CAMPOS, A. D. Técnicas para a produção de extrato pirolenhoso para uso agrícola. Circular Técnica, n. 65, Pelotas, dez. 2007.
- DONATO, D. B. Desenvolvimento e avaliação de fornalha para combustão dos gases da carbonização da madeira. 2017. 89f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2017.
- GOOS, A.W. "The Thermal Decomposition of Wood," in "Wood Chemistry," 2nd Ed., Vol. 2, ed. L. E. Wise and E. C. Jahn, Reinhold Pub. Co., New York, 1952, p. 826.
- PEREIRA, B. L. C. Qualidade da madeira de Eucalyptus para a produção de carvão vegetal. 2012. 102f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2012.
- IBÁ – Indústria Brasileira de Árvores. Relatório IBA 2022. São Paulo. 2022
- PEVS 2020: Com Crescimento De 17,9%, Valor Da Produção De Silvicultura E Extração Vegetal Chega A R\$ 23,6 Bilhões | Agência De Notícias". Agência De Notícias - IBGE, 2021, <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/31802-pevs-2020-com-crescimento-de-17-9-valor-da-producao-de-silvicultura-e-extracao-vegetal-chega-a-r-23-6-bilhoes>. Acesso em: 05/07/23.
- MENEGALE, Vinicius Leite de Campos. Estudo do potencial do licor pirolenhoso como aditivo em condicionador de solo e no crescimento inicial de eucalipto. 2013. xiii, 84 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho", Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu, 2013. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/90636>.
- RAAD, T. J.; PINHEIRO, P. C. C.; YOSHIDA, M. I. Equação geral de mecanismos cinéticos da carbonização do Eucalyptus spp. *Cerne*, v.12, n.2, p.93-106, 2006.
- VIEIRA, L. A.; TEIXEIRA, E. P.; SILVA, A. M. B.; BUCEK, E. U.; TOLEDO R. N. Utilização dos gases da carbonização da madeira proveniente de um forno industrial por micro-ondas para obtenção de energia elétrica. II Encontro de Desenvolvimento de Processos Agroindustriais, UNIUBE, Uberaba, 2018. 8p.