



**ALANNA BARISHNIKOV SILVA**

**COMBUSTIBILIDADE DA MADEIRA DE *Eucalyptus* spp. E  
SUA RELAÇÃO COM AS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS**

**LAVRAS-MG  
2021**

**ALANNA BARISHINIKOV SILVA**

**COMBUSTIBILIDADE DA MADEIRA DE *Eucalyptus* spp. E SUA RELAÇÃO COM  
AS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Universidade Federal de Lavras, como parte  
das exigências do curso de Engenharia  
Florestal, para a obtenção do título de  
Bacharela.

Prof. Dr. Paulo Fernando Trugilho  
Orientador

Me. Jonas Zefanias Massuque  
Coorientador

**LAVRAS-MG  
2021**

**ALANNA BARISHNIKOV SILVA**

**COMBUSTIBILIDADE DA MADEIRA DE *Eucalyptus* spp. E SUA RELAÇÃO COM  
AS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS**

**COMBUSTIBILITY *Eucalyptus* spp. WOOD AND THEIR RELATIONSHIP WITH  
CHEMICAL CHARACTERISTICS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Universidade Federal de Lavras, como parte  
das exigências do curso de Engenharia  
Florestal, para a obtenção do título de  
Bacharela.

APROVADA em 24 de novembro de 2021.

Dr. Paulo Fernando Trugilho

Me. Breno Assis Loureiro

Me. Jonas Zefanias Massuque

Prof. Dr. Paulo Fernando Trugilho  
Orientador

Me. Jonas Zefanias Massuque  
Coorientador

**LAVRAS-MG  
2021**

*A minha filha, Manuela Vilela Lima.*

*Dedico*

## AGRADECIMENTOS

À Deus por atender minhas orações e sempre me guiar em todos os passos que eu resolvo trilhar na minha trajetória.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA), que através do Departamento de Ciências Florestais (DCF) me proporcionou a oportunidade de conclusão da graduação em Engenharia Florestal.

Ao professor Paulo Fernando Trugilho, pela dedicação, confiança, apoio e amizade. Obrigada por toda compreensão e ensinamento. Me sinto imensamente grata por tê-lo como orientador.

À Jonas Zefanias Massuque, principalmente pela paciência durante a elaboração deste trabalho, incentivo e apoio. Sua coorientação foi fundamental, obrigada por tudo.

Ao Laboratório de Biomateriais da UFLA, pelas inúmeras experiências vividas e pelas amizades construídas.

Aos membros da banca examinadora: Professor Dr. Paulo F. Trugilho, Breno Assis Loureiro e Jonas Zefanias Massuque por aceitarem participarem dessa banca.

Aos meus pais, saibam que devo tudo a vocês, que me ensinaram a mais linda lição, nunca desistir. Obrigada por fazerem parte da minha vida e não medir esforços para que eu realizasse esse sonho, o qual compartilho com vocês. E por me apoiarem em todo esse percurso. À vocês dedico este trabalho, com todo meu coração.

Ao meu esposo e companheiro Álvaro Resende Lima e a minha querida filha Manuela Vilela Lima onde encontrei meu maior apoio e força, e amor para a conclusão desse trabalho, e realização desse sonho.

À FAPEMIG, pela concessão da bolsa de iniciação científica.

## RESUMO

O objetivo do estudo foi avaliar a influência da composição química molecular e imediata, composição monomérica dos polissacarídeos, constituintes lipofílicos presentes no extrato em diclorometano e composição fenólica sobre a combustibilidade das madeiras em clones *Eucalyptus* spp. Dez clones foram avaliados, aos seis anos de idade, por meio das análises das composições químicas e análises termogravimétricas (TG/DTG) da madeira. Na avaliação da combustibilidade foram considerados os parâmetros: temperatura de ignição (Ti), temperatura correspondente ao final da combustão (Tf), índice característico da combustão (S), índice de ignição (Di), tempo correspondente à máxima taxa de combustão (tp) e tempo de ignição (tig). Os parâmetros taxa máxima da combustão, índice característico da combustão e índice de ignição apresentaram relações significativas e inversamente proporcionais com os teores de lignina, extrativos solúveis em etanol e xilose, além de relações significativas e diretamente proporcionais com os teores de holocelulose, extrativos solúveis em água fria, glucose.

**Palavras-chave:** Combustão da madeira; açúcares; lignina; extrativos.

## ABSTRACT

This research aimed to evaluate the influence of molecular and proximate chemical composition, monomeric composition of polysaccharides, lipophilic constituents present in the dichloromethane extract and phenolic composition on wood combustion in clones of *Eucalyptus* spp. Ten clones were evaluated at six years old through the analysis of chemical composition and thermogravimetric analysis (TG /DTG) of the wood. In the combustibility evaluation, the following parameters were considered: ignition temperature (Ti), burnout temperature (Tf), combustion characteristic index (S), ignition index (Di), time corresponding to the maximum combustion rate (tp) and ignition time (tig). The parameters maximum combustion rate, combustion index and ignition index, presented significant and inversely proportional relationships with the lignin, extractive soluble in ethanol and xylose content, in addition to significant and directly proportional relationships with the contents of holocellulose, extractives soluble in cold water, glucose.

**Keywords:** Wood combustion. Sugars. Lignin. Extractives.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Amostragem nas árvores dos clones avaliados.....	20
Figura 2 - Curvas termogravimétricas da combustão da madeira dos clones avaliados .....	25
Figura 3 - Derivada das curvas termogravimétricas da combustão da madeira dos clones avaliados .....	26



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação dos materiais genéticos avaliados e valores das características de crescimento da árvore .....	19
Tabela 2 - Composição química média das amostras da madeira de clones de <i>Eucalyptus</i> spp., composição monomérica dos polissacarídeos, porcentagem de ácidos urônicos e acetatos.....	22
Tabela 3 - Valores médios das características da química imediata e elementar da madeira dos clones de <i>Eucalyptus</i> spp. ....	22
Tabela 4 - Perda de massa e temperaturas dos picos, obtidas por TGA, nos estágios características da combustão da madeira dos clones .....	26
Tabela 5 - Parâmetros de combustão da madeira dos clones .....	28
Tabela 6 - Matriz de correlação entre as características químicas e os estágios de combustão da madeira .....	30
Tabela 7 - Matriz de correlação entre as características químicas e as de combustibilidade da madeira.....	31

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 - Caracterização química da madeira.....	20
---	----

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>2 OBJETIVO .....</b>	<b>13</b>
<b>3 REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>14</b>
<b>3.1 Combustão da biomassa.....</b>	<b>14</b>
<b>3.2 Propriedades da madeira que afetam a combustão (queima direta).....</b>	<b>15</b>
<b>4 MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>19</b>
<b>4.1 Área de estudo, amostragem e material genético .....</b>	<b>19</b>
<b>4.2 Propriedades da madeira .....</b>	<b>20</b>
<b>4.2.1 Composição química elementar e estrutural.....</b>	<b>21</b>
<b>4.3 Análise Termogravimétrica (TG/DTG).....</b>	<b>23</b>
<b>4.4 Delineamento Estatístico.....</b>	<b>24</b>
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>25</b>
<b>5.1 Combustão da biomassa via análise termogravimétrica .....</b>	<b>25</b>
<b>5.2 Correlação simples entre as características químicas com os estágios de combustão e combustibilidade da madeira .....</b>	<b>29</b>
<b>6 CONCLUSÃO.....</b>	<b>32</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>34</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de geração e consumo energéticos tem passado por grandes mudanças, muitas dessas estão sendo conduzidas por políticas governamentais, seja para conduzir os países a baixa emissão de carbono, reduzir a poluição do ar, diversificar a matriz energética, reduzir custos e melhorar a eficiência energética. Em 2020, a geração global de eletricidade renovável apresenta cerca de 84,8% da oferta interna de eletricidade no Brasil (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE, 2021). A energia hidrelétrica é a maior fonte de energia renovável (cerca de 65,2%), seguida de eólica (8,8%), biomassa (9,1%) e solar (1,7%) (INTERNACIONAL ENERGY AGENCY - IEA, 2021). Projeta-se que a participação da energia da biomassa vai variar cerca de 55 a 75% do consumo final de energia até 2050 (PAREDES-SANCHEZ *et al.*, 2019).

No Brasil se destaca se destaca com a maior parte da sua matriz energética baseada em combustíveis de biomassa de fontes sustentáveis lenha e o carvão vegetal representam 9,1% da oferta interna de energia (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE, 2021). A produção do país inclui várias espécies e clones de eucalipto plantados para suprir a demanda energética (GUERRA; OGURI; SPINELLI, 2016). Isso se deve pelo país possuir condições de solo e clima favoráveis combinados com o avanço do melhoramento genético da espécie. A oferta de biomassa em 2005 foi de 558 milhões de toneladas, tendo uma projeção para 1.402 milhões de toneladas para o ano de 2030 (MORAES *et al.*, 2017).

É notório que atualmente diversos empreendimentos industriais têm optado pelo uso de cavaco de madeira e de resíduos florestais para a geração de energia térmica (vapor) em detrimento da energia gerada por combustíveis fósseis, se atentando aos benefícios econômicos, sociais e ambientais do uso da biomassa como fonte energética (MIRANDA *et al.*, 2017; NASCIMENTO; BIAGGIONI, 2010).

A obtenção de energia por meio de biomassa pode ocorrer a partir de processos bioquímicos, termoquímicos e físico-químicos. Atualmente existem inúmeras tecnologias para esta conversão, resultando em diversidade de produtos que podem ser sólidos, líquidos e gasosos. Segundo Patel, Zhang e Kumar (2016), dentre os processos termoquímicos, as três principais tecnologias utilizadas são pirólise, gaseificação e combustão direta.

O comportamento intrínseco da biomassa utilizada em relação aos processos de conversão térmica é um critério utilizado para a medição dos potenciais de reatividade e combustibilidade. Nesse sentido as características pirolíticas e de combustão dos combustíveis da biomassa vem sendo determinados através de análises termogravimétricas

(DING *et al.*, 2017). As mais utilizadas são a análise termogravimétrica e a termogravimétrica variada (DTG) que monitoram em tempo real a relação entre as propriedades físico-químicas da matéria-prima e a temperatura durante o processo de combustão, pirólise ou torrefação (BALASUNDRAM *et al.*, 2017).

As análises termogravimétricas possibilitam uma ampla faixa de aplicação para medidas de propriedades físicas, estudo de reações químicas, avaliação da estabilidade térmica, determinação da composição de materiais e desenvolvimento de metodologias analíticas. Permitem a obtenção de parâmetros para a avaliação da combustão da madeira, como as temperaturas de ignição e final da combustão, os picos de máxima perda de massa, tempo de ignição, tempo da combustão, índices de ignição e de combustão (MAGDZIARZ; WILK, 2013; XIONG *et al.*, 2014).

A melhor compreensão do comportamento da madeira durante a combustão pode ajudar na seleção de clones, otimização dos processos e melhoria da qualidade do carvão vegetal.

## 2 OBJETIVO

O objetivo deste estudo foi investigar o comportamento da degradação térmica da madeira, em atmosfera oxidativa, de dez clones de *Eucalyptus* spp. e determinar os índices e estágios característicos da combustão. Também objetivou estabelecer a relação entre os componentes químicos e combustibilidade da madeira.

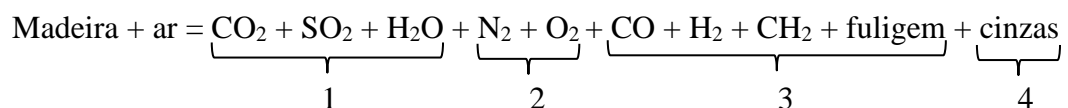
### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 Combustão da biomassa

Combustão é designada pela combinação química rápida do oxigênio com um material combustível, sendo, portanto, uma reação de oxidação (PINHO, 2014). Para fins energéticos, a combustão direta ocorre essencialmente em fogões (cocção de alimentos), fornos (metalurgia, por exemplo) e caldeiras (geração de vapor, por exemplo. Outros problemas são a elevada umidade do material combustível (20% ou mais, no caso da lenha) e a baixa densidade energética do combustível (lenha, palha, resíduos etc.) o que dificulta o seu armazenamento e transporte (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL, 2005). Embora muito prático e, às vezes, conveniente, o processo de combustão direta é normalmente muito ineficiente; por apresentarem rendimentos energéticos baixos (BEÇA, 2011).

A combustão da madeira é um processo complexo composto por uma sequência de reações homogêneas e heterogêneas. O processo de combustão da madeira transcorre em seis etapas consecutivas bem definidas, de secagem, emissão de voláteis, ignição dos voláteis, queima dos voláteis em chama, extinção da chama dos voláteis e combustão do resíduo de carbono (NOGUEIRA; LORA, 2003).

A reação de combustão da madeira com ar pode ser apresentada da seguinte forma:



em que, 1 – Produtos da oxidação completa: CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O. O conteúdo de enxofre da madeira é sempre baixo, sendo seu valor desprezível; 2 – Ar em excesso (N<sub>2</sub> + O<sub>2</sub>) e eventualmente a umidade do combustível e do ar; 3 – Produtos gasosos (CO + H<sub>2</sub> + CH<sub>4</sub>) e sólidos (fuligem) de combustão incompleta; 4 – Fração mineral não combustível da biomassa (cinzas).

De acordo com Brutti *et al.* (2009) dentre as principais reações químicas da combustão da madeira, tem-se a combustão do carbono e do hidrogênio, conforme as equações, a seguir.





Além do aproveitamento da biomassa como combustível sólido para a conversão energética por meio da queima direta, como técnica mais utilizada, a pirólise e a gaseificação também surgem como diferenciais para melhor manuseio e queima do combustível (DEMIRBAŞ, 2001). O gás de síntese resultante do processo de gaseificação flexibiliza o sistema energético pois pode ser utilizado como combustível para geração de energia elétrica, de calor para aquecimento de caldeiras e geração de vapor para turbinas a vapor, para refrigeração e biocombustíveis, sendo uma tecnologia chave para cumprir metas de sustentabilidade energética (SEGURADO *et al.*, 2019).

### **3.2 Propriedades da madeira que afetam a combustão (queima direta)**

Qualidade da madeira é a combinação de características físicas, químicas, anatômicas e mecânicas de uma árvore ou de suas partes que permite definir a sua melhor forma de utilização. Segundo Vital, Carneiro e Pereira (2013) as características do lenho tais como umidade, densidade básica, massa seca de biomassa e massa de lignina, a composição química estrutural e elementar, além do poder calorífico, teor de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo são propriedades geralmente utilizadas na determinação do seu potencial energético.

A avaliação energética é realizada com o objetivo de promover a classificação de genótipos superiores, pois são relevantes para a tomada de decisão na implementação de projetos de reflorestamentos, para a produção de carvão e celulose visando a utilização da biomassa como fonte energética. Os atributos da madeira servem para promover a diferenciação entre os materiais genéticos (LIMA; SILVA; LAVORANTI, 2011; TRUGILHO; SILVA, 2001).

Além do genótipo, são vários os fatores que afetam as propriedades das madeiras. Citam-se as condições do sítio, a idade, o espaçamento de plantio, a adubação, as práticas silviculturais. É necessário o conhecimento das inter-relações desses fatores para que esta matéria-prima possa ser aprimorada, pois esses fatores causam consideráveis mudanças fisiológicas na árvore e, conseqüentemente, alteram as propriedades energéticas da mesma (LATORRACA; ALBUQUERQUE, 2000).

Dessa forma, as principais propriedades da madeira almejadas para o uso energético são: elevada densidade básica, elevado poder calorífico; elevado teor de lignina; baixo teor de



cinzas e baixa umidade (PROTÁSIO *et al.*, 2011).

Dentre as propriedades da madeira, a densidade básica é considerada um dos parâmetros mais importantes entre as diversas propriedades físicas da madeira, pois afeta a maioria das propriedades. Seus efeitos, porém, são interativos e difíceis de serem avaliados isoladamente (PEREIRA *et al.*, 2016). A grande vantagem de utilizar madeiras com elevada densidade básica é estocar maior conteúdo energético em menor volume, que também contribuem para o aumento de sua densidade energética (PEREIRA *et al.*, 2000; TRUGILHO; SILVA, 2001) tendo em vista que a densidade básica da madeira é fortemente correlacionada com a sua densidade energética (LIMA *et al.*, 2020).

A outro fator relevante ao uso energético é a densidade energética, sendo definida como a quantidade de energia útil liberada por um combustível por unidade de volume, quando submetido à combustão. O conhecimento da densidade energética de determinada biomassa permite avaliar seu potencial para geração de energia, tendo em vista que cargas com maiores densidades energéticas contribuem positivamente para a otimização do transporte e redução de custos.

O poder calorífico é excelente parâmetro de avaliação da potencialidade energética dos combustíveis de biomassa (MARAFON *et al.*, 2016). Madeiras com elevado poder calorífico possuem maior quantidade de energia disponível na forma de calor. Contudo, é necessário que a madeira seja previamente seca, pois grande parte da energia produzida durante o processo termoquímico é direcionada para evaporar a água livre existente na mesma, diminuindo o potencial energético (PIMENTA; BARCELLOS; OLIVEIRA, 2010).

A umidade é um importante fator que deve ser levado em consideração em qualquer biomassa destinada à combustão, sendo preferível sempre o seu uso com menor umidade possível (VITAL; CARNEIRO; PEREIRA, 2013). O poder calorífico da biomassa é inversamente proporcional ao teor de umidade, ou seja, a umidade que permanece no processo gera alto consumo de energia específica e interfere na menor resistência mecânica (SILVA *et al.*, 2017).

A composição química do material também é muito relevante para o uso energético, pois quando degradada termicamente a madeira passa por um processo de transformação, no qual todos os seus componentes primários (celulose, hemicelulose e lignina) são drasticamente alterados, o que afeta as propriedades energéticas (YU *et al.*, 2017).

Para a produção energética é desejável que a madeira apresente altos teores de carbono e hidrogênio e baixos teores de oxigênio, devido às correlações existentes entre esses componentes elementares e o poder calorífico. Altas concentrações de oxigênio na biomassa

favorecem o decréscimo do poder calorífico (HUANG *et al.*, 2009), enquanto altos teores de carbono e hidrogênio contribuem para um aumento no poder calorífico dos combustíveis de biomassa (DEMIRBAS, 2002).

Segundo Bufalino *et al.* (2012) os extrativos podem ser determinantes na escolha do uso da madeira, pois, além de influenciar as propriedades organolépticas, podem afetar diversas outras propriedades, como a densidade, permeabilidade, retratibilidade e valor energético.

Os extrativos da madeira contêm diversos compostos químicos, mas que não constituem a estrutura essencial dessa madeira, por exemplo, os polifenóis, óleos, gorduras, resinas, amido e ceras. Como o próprio nome diz, refere-se ao que pode ser extraído por algum processo. A origem fenólica de alguns extrativos pode atuar no aumento do poder calorífico da madeira, em virtude da presença do alto teor de carbono (ROWELL *et al.*, 2005).

A análise química imediata de uma fonte energética fornece os teores de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas (material residual), que influenciam nas propriedades de queima do combustível, pois os constituintes voláteis se queimam rapidamente e o carbono fixo queima de forma mais lenta (FERNANDES *et al.*, 2013).

Quanto maior a relação materiais voláteis/carbono fixo maior será a intensidade da combustão. Os materiais voláteis se dissipam rapidamente durante a combustão: quanto maior o teor de materiais voláteis menor será a temperatura de ignição da biomassa. Apesar da biomassa entrar em ignição mais rapidamente, ela terá o tempo de queima reduzido, o que contribui para a redução da eficiência energética (GARCÍA *et al.*, 2013).

O teor de materiais voláteis e carbono fixo tem relação direta com o poder calorífico, aumentando o tempo de queima da fonte energética. Os teores de materiais voláteis e carbono fixo da madeira são dependentes entre si, uma vez que a percentagem de cinzas na sua constituição geralmente é baixa (CHAVES *et al.*, 2013; PEREIRA *et al.*, 2000).

As cinzas ou minerais são constituintes inorgânicos que não participam do processo de combustão da biomassa, representando cerca de 1% da massa seca da madeira. Alta percentagem de cinzas é prejudicial à finalidade energética. Os minerais são indesejáveis, pois, é formado resíduo, dado que essa propriedade não é degradada no processo termoquímico; por consequência, contribui para a redução do poder calorífico.

Uma das características importantes para selecionar biomassas que apresentem potencial energético é sua estabilidade térmica. Técnicas como a análise termogravimétrica (TGA) possibilitam compreender a decomposição da biomassa em função do aquecimento em processos de conversão termoquímica (CARNEIRO *et al.*, 2013). A análise

termogravimétrica consiste em analisar a variação da massa de amostras em sistema sob o controle da temperatura e atmosfera, o qual pode variar tanto com a temperatura quanto com o tempo, obtendo informações da composição e da estabilidade térmica, além de conhecer as faixas de temperaturas em que a decomposição é mais pronunciada (YEO *et al.*, 2019).

A avaliação das propriedades energéticas e eficiência do material, permite a obtenção de materiais mais competitivos frente a outras fontes de energia. A densidade energética é um importante parâmetro a ser determinado, visto que influencia no transporte do material, na quantidade de biomassa consumida no processo de queima e no tamanho do silo de armazenamento de biomassa de uma máquina, quando se associa a quantidade de energia necessária e as características do material (PEREIRA *et al.*, 2016).

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Área de estudo, amostragem e material genético

Neste estudo, foram avaliados 10 clones de clones de *Eucalyptus* spp. aos 6 anos de idade, provenientes de teste clonal instalado em espaçamento 6 m x 1 m, pertencente a empresa APERAM BioEnergia, localizada no município de Itamarandiba, Minas Gerais, Brasil (Tabela 1).

Tabela 1 - Relação dos materiais genéticos avaliados e valores das características de crescimento da árvore

Clone	Cruzamento		DAP (cm)	Altura (m)	
				Total	Comerc.
2042	<i>E. camaldulensis</i> x <i>E. grandis</i>	<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	13,39	23,07	21,40
2136	<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	<i>E. camaldulensis</i> x <i>E. grandis</i>	16,55	26,06	24,54
2037	<i>E. camaldulensis</i> x <i>E. grandis</i>	<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	15,25	25,40	23,72
2068	<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	<i>E. camaldulensis</i> x <i>E. grandis</i>	15,25	25,37	22,87
2115	<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	<i>E. camaldulensis</i> x <i>E. grandis</i>	15,39	23,63	21,03
2583	<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	<i>E. pelita</i>	14,67	22,60	21,37
2331	<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	<i>E. camaldulensis</i> x <i>E. grandis</i>	15,84	24,30	22,10
2630	<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	<i>E. pelita</i>	15,07	24,30	22,52
2034	<i>E. camaldulensis</i> x <i>E. grandis</i>	<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	13,20	23,03	21,23
1528	<i>E. grandis</i>	<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	14,92	22,70	20,64

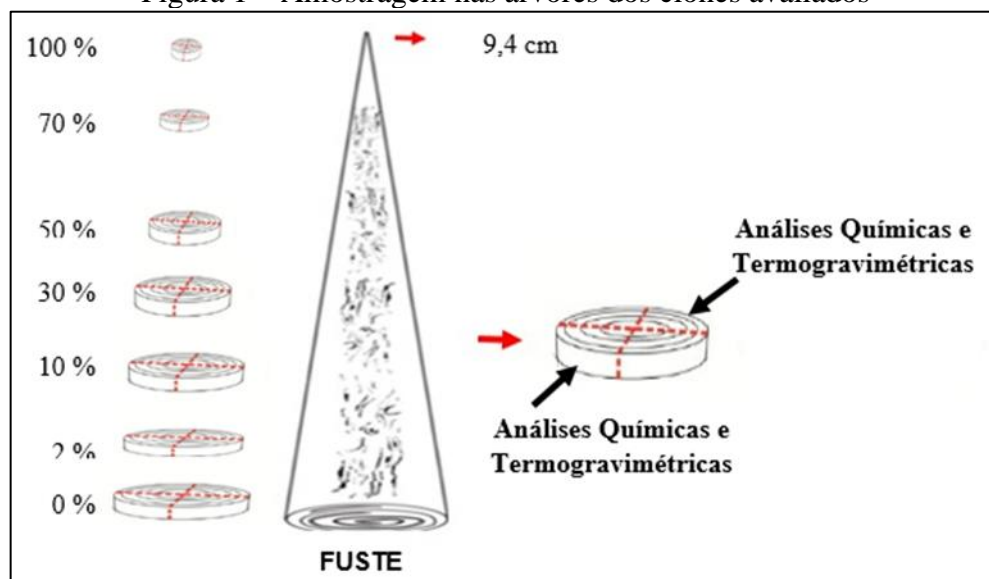
Fonte: Da autora (2021)

Legenda: DAP = diâmetro a altura do peito, Comerc. = comercial

Três árvores de diâmetro médio por clone, evitando-se o efeito de bordadura e escolhendo árvores sadias com o objetivo de representar da melhor forma os clones estudados. Para cada árvore selecionada retirou-se discos de aproximadamente de 2,5 cm de espessura em sete posições longitudinais, ou seja, a 0%, 2%, 10%, 30%, 50%, 70% e 100% da altura comercial de cada árvore. A altura comercial foi definida até a circunferência de 9,4 cm (Figura 1).

Os discos retirados das árvores foram seccionados em quatro cunhas passando pela medula, amostras retiradas de duas cunhas opostas foram destinadas para às análises químicas e termogravimétricas da madeira (Figura 1).

Figura 1 – Amostragem nas árvores dos clones avaliados



Fonte: Da autora (2021)

As análises das propriedades químicas, termogravimétricas e a caracterização química elementar foram realizadas no Laboratório de Análises Rede Química e Tecnologia (REQUIMTE) da Universidade Nova de Lisboa, Caparica, Portugal.

#### 4.2 Propriedades da madeira

A caracterização da composição química molecular, imediata e elementar dos clones de *Eucalyptus* spp. foi realizada de acordo com as diretrizes das seguintes normas e procedimentos descritos a seguir.

Quadro 1 - Caracterização química da madeira

Análises	Método	Referência
Extrativos solúveis em diclorometano, etanol e água	TAPPI 204 cm-97 (adaptado)	TAPPI (2001)
Lignina insolúvel	TAPPI 222 om-02	TAPPI (2002)
Lignina solúvel	TAPPI UM 250	TAPPI (1991)
Teor de materiais voláteis	D1762-84	ASTM (2007)
Teor de cinzas	D1762-84	ASTM (2007)
Teor de carbono fixo	Teor de carbono fixo (%) = $100 - (\text{Teor de materiais voláteis} + \text{Teor de Cinzas})$	-
Holocelulose	Holocelulose (%) = $100 - (\text{Teor de lignina total} + \text{Teor de extrativos} + \text{Teor de Cinzas})$	-

Fonte: Da autora (2021)

#### 4.2.1 Composição química elementar e estrutural

A análise química elementar foi realizada em analisador elementar Thermo Finnigan-CE Instruments Flash EA 1112 CHNS series, determinaram-se os componentes elementares (C, H, N, O) da madeira previamente seca em estufa a  $103\pm 2^\circ\text{C}$ . Amostras de 2 mg foram colocadas em cápsulas de estanho e incineradas a  $1200^\circ\text{C}$ .

O conteúdo dos monossacarídeos neutros (ramnose, arabinose, xilose, galactose, manose, glicose), ácidos urônicos (ácido galacturônico e ácido glucurônico) e acetatos foram quantificados por cromatografia iônica de alta performance com detecção amperométrica pulsada (HPLC-PAD). O sistema Dionex ICS-3000 (Dionex, Sunnyvale, CA) equipado com um detector eletroquímico Carbopac PA10 (250 x 4 mm) mais colunas Aminotrap foi utilizado. A separação foi realizada utilizando um gradiente linear de soluções de NaOH e  $\text{CH}_3\text{COONa}$  como eluente a um fluxo de  $1\text{ mL min}^{-1}$  ( $0 \pm 20$  min NaOH 18 mM;  $20 \pm 25$  min NaOH 50 mM +  $\text{CH}_3\text{COONa}$  170 mM;  $25 \pm 40$  min 50 mM NaOH +  $\text{CH}_3\text{COONa}$  170 mM); as colunas de temperatura foram mantidas a  $30^\circ\text{C}$ . O teor de acetatos também foi determinado no hidrolisado utilizando uma cromatografia de alta pressão de exclusão de Ion com detector UV / Visível (HIPCE-UV 210 nm) utilizando o Thermo Finnigan Surveyor equipado com coluna BioRad Aminex 87H (300 x 7,8 mm). A separação foi realizada usando a fase móvel de 10 mM de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  a um fluxo de  $0,6\text{ mL min}^{-1}$ . A temperatura da coluna foi de  $30^\circ\text{C}$ .

As Tabelas 2 e 3 apresentam os valores médios das características químicas determinadas na madeira dos clones avaliados.

Tabela 2 - Composição química média das amostras da madeira de clones de *Eucalyptus* spp., composição monomérica dos polissacarídeos, porcentagem de ácidos urônicos e acetatos

	2042	2136	2037	2068	2115	2583	2331	2630	2034	1528
Solubilidade										
	% da madeira									
Diclorometano	0,45	0,65	0,61	0,49	0,50	0,40	0,99	0,60	0,17	0,86
Etanol	1,31	1,01	1,19	1,94	1,14	1,89	1,05	1,18	1,62	0,98
Água	1,25	1,21	1,16	0,53	0,63	0,74	0,80	0,56	1,04	0,53
Total	3,01	2,87	2,96	2,96	2,27	3,03	2,84	2,34	2,83	2,37
Teor										
	% da madeira									
Lignina Klason	24,20	24,80	23,90	24,70	24,40	26,80	22,70	25,40	24,70	24,70
Lignina Solúvel	3,10	2,80	3,00	3,40	3,00	2,70	3,20	2,70	3,30	3,30
Total	27,30	27,60	26,90	28,20	27,50	29,4	25,90	28,10	28,00	28,0
Holocelulose	69,43	69,25	69,78	68,46	69,84	67,15	71,00	69,26	68,83	69,28
Teor										
	% da madeira									
Cinzas	0,26	0,28	0,36	0,38	0,39	0,42	0,26	0,30	0,34	0,35
Monossacarídeos										
	% do total de açúcares									
Ramnose	0,14	0,37	0,24	0,19	0,25	0,27	0,20	0,24	0,19	0,11
Arabinose	0,04	0,34	0,14	0,10	0,18	0,16	0,15	0,15	0,13	0,11
Xilose	17,90	16,20	16,80	22,30	18,00	26,70	18,30	22,80	16,80	17,30
Manose	2,20	1,40	1,90	2,00	2,00	1,60	2,00	1,70	1,30	1,60
Galactose	1,10	2,90	1,80	1,20	1,70	1,30	1,10	1,80	2,00	1,70
Glucose	65,30	70,70	64,30	57,20	64,10	59,10	67,40	63,70	64,40	65,40
Teor										
	% da madeira									
Ácido Galacturônico	1,81	2,30	2,11	2,15	2,10	1,74	1,58	1,70	1,92	1,88
Ácido Glucurônico	1,10	1,11	1,08	1,10	1,13	1,04	1,02	1,04	1,08	1,08
Total	2,91	3,41	3,19	3,25	3,23	2,78	2,6	2,74	3,00	2,96
Teor										
	% da madeira									
Acetatos	4,16	2,24	4,55	5,25	4,15	3,33	3,37	2,92	4,75	4,29

Fonte: Da autora (2021)

Tabela 3 – Valores médios das características da química imediata e elementar da madeira dos clones de *Eucalyptus* spp.

Clone	Teor de (%)						
	TMV	TCZ	TCF	C	H	O	N
2042	82,84	0,12	17,04	46,62	6,04	47,10	0,12
2136	83,88	0,20	15,92	46,54	6,08	47,06	0,13
2037	82,71	0,20	17,09	45,90	5,91	47,78	0,21
2068	82,63	0,17	17,20	46,52	6,12	47,05	0,15
2115	83,46	0,19	16,35	46,58	6,38	46,76	0,10
2583	82,05	0,21	17,74	46,57	6,23	46,88	0,11
2331	84,47	0,11	15,42	45,99	6,26	47,50	0,13
2630	83,73	0,16	16,11	46,44	6,03	47,20	0,18
2034	82,65	0,16	17,19	46,30	5,72	47,62	0,18
1528	82,78	0,12	17,10	46,44	5,78	47,46	0,21

Fonte: Da autora (2021)

Legenda: EXT = extrativos totais; LIGTotal = lignina total; HOLO = holocelulose; TMV = teor de materiais voláteis; TCZ = teor de cinzas; TCF = teor de carbono fixo; C = teor de carbono (%); H = teor de hidrogênio; O = teor de oxigênio e N = teor de nitrogênio.

### 4.3 Análise Termogravimétrica (TG/DTG)

A análise termogravimétrica da madeira, foi realizada em atmosfera oxidativa, utilizando-se o aparelho termogravimétrico Setaram Labsys, da marca Evo. O fluxo considerado foi de 50 mL min<sup>-1</sup> e a amostra moída de, aproximadamente, 4 mg, previamente seca em estufa a 103°C ± 5°C, foi submetida a um gradiente de temperatura, variando da temperatura ambiente até 550°C, com taxa de aquecimento de 5°C min<sup>-1</sup>.

Utilizando-se a primeira derivada da curva TGA, que estabelece a perda de massa em função da temperatura, foi possível identificar a taxa de perda de massa por minuto e os estágios característicos da combustão.

Para a avaliação da combustibilidade das madeiras dos clones de *Eucalyptus* spp. foram considerados os seguintes parâmetros:

- a) Temperatura de ignição (Ti);
- b) Temperatura correspondente ao final da combustão (Tf);
- c) Índice característico da combustão (S);
- d) Índice de ignição (Di);
- e) Tempo correspondente à máxima taxa de combustão (t<sub>p</sub>);
- f) Tempo de ignição (t<sub>ig</sub>);
- g) Taxa máxima de combustão - (dm/dt)<sub>máx</sub>;

A temperatura de ignição da madeira foi definida como a temperatura na qual a taxa de combustão aumentou a 1% min<sup>-1</sup>, iniciando-se o maior processo de combustão. A temperatura final da combustão foi definida como a temperatura na qual a taxa de combustão diminuiu a 1% min<sup>-1</sup> e refere-se ao final do processo de combustão (SAHU *et al.*, 2010; WANG *et al.*, 2011; MOON *et al.*, 2013; PROTÁSIO, 2016).

O índice característico da combustão (S) foi obtido por meio da equação 1 e o índice de ignição pela equação 2, conforme proposição de Moon *et al.* (2013).

$$S = \frac{\left(\frac{dm}{dt}\right)_{\text{máx}} \times \left(\frac{dm}{dt}\right)_{\text{médio}}}{(T_i^2 \times T_f)} \quad (1)$$

em que (dm/dt)<sub>máx</sub>: Taxa de combustão máxima (% min<sup>-1</sup>); (dm/dt)<sub>médio</sub>: Taxa de combustão média; Ti: Temperatura de ignição (°C) e Tf: Temperatura final da combustão (°C).

$$D_i = \frac{\left(\frac{dm}{dt}\right)_{\text{máx}}}{t_p \times t_{ig}} \quad (2)$$



em que,  $(dm/dt)_{\text{máx}}$ : Taxa de combustão máxima ( $\% \text{ min}^{-1}$ );  $t_p$ : Tempo correspondente à máxima taxa de combustão (min) e  $t_{ig}$ : Tempo de ignição (min).

Para a elaboração dos gráficos das curvas TG e DTG foram selecionadas as repetições que se apresentaram mais próxima dos valores médios dos parâmetros da combustão.

#### **4.4 Delineamento Estatístico**

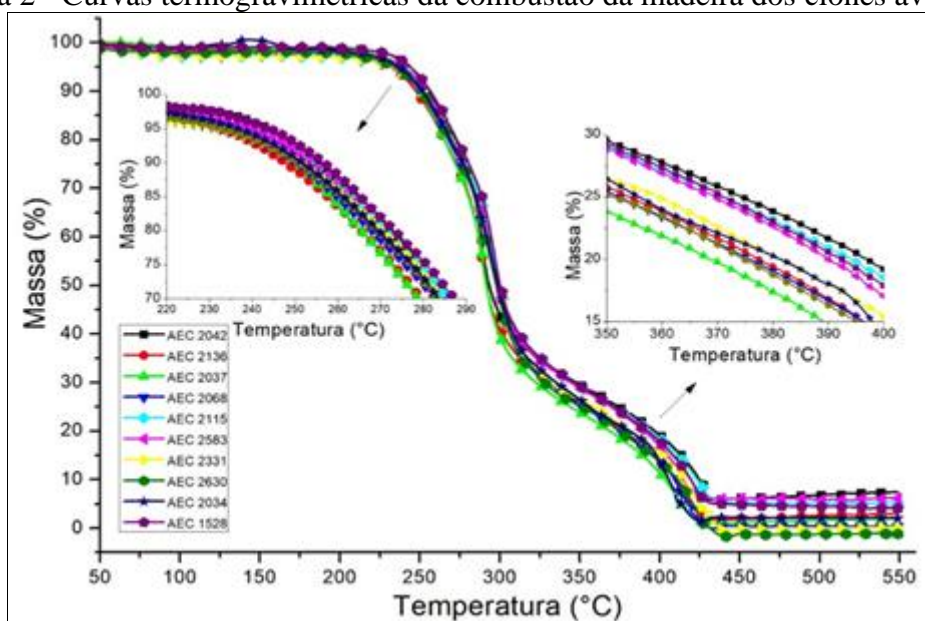
O delineamento adotado na pesquisa foi o inteiramente casualizado, com 10 tratamentos (dez clones de *Eucalyptus* spp.) e 3 repetições (árvores), totalizando 30 unidades amostrais. Para a comparação múltipla das médias e o agrupamento univariado dos clones de *Eucalyptus* spp. utilizou-se o teste Scott-Knott a 5% de significância (SCOTT; KNOTT, 1974). A análise de correlação simples também foi realizada e análise estatística foi realizada com auxílio do software Statistica versão 10 (STATSOFT, 2012).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Combustão da biomassa via análise termogravimétrica

De forma geral, o comportamento da madeira dos diferentes clones durante a degradação térmica foi semelhante, com perdas de massa mais acentuadas em determinadas faixas de temperaturas. Neste estudo, as curvas TG e DTG (Figuras 2 e 3) indicam que a combustão da madeira ocorreu em dois estágios principais: desvolatilização e combustão (LÓPEZ-GONZÁLEZ *et al.*, 2013; HAI *et al.* 2019; PROTÁSIO *et al.*, 2019). No presente estudo foi verificado comportamento semelhante para combustão da madeira de *Eucalyptus*.

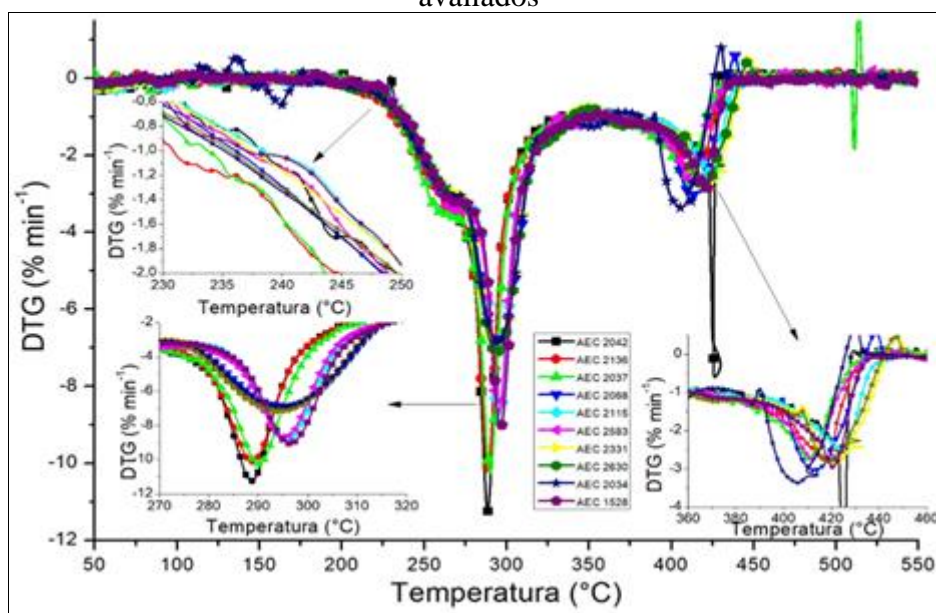
Figura 2 - Curvas termogravimétricas da combustão da madeira dos clones avaliados



Fonte: Da autora (2021)

Pode se inferir que as diferentes etapas da combustão observadas por meio da análise termogravimétrica (Figuras 2 e 3, e Tabela 4) estão associadas às diferenças estruturais e ligações químicas que ocorrem nos componentes químicos da madeira, ocasionando assim diferenças no comportamento térmico na madeira de *Eucalyptus* (PROTÁSIO *et al.*, 2019).

Figura 3 – Derivada das curvas termogravimétricas da combustão da madeira dos clones avaliados



Fonte: Da autora (2021)

Tabela 4 - Perda de massa e temperaturas dos picos, obtidas por TGA, nos estágios característicos da combustão da madeira dos clones

Clone	1º estágio		2º estágio	
	Perda de massa (%)	T Máx (°C)	Perda de massa (%)	T Máx (°C)
2042	72,80 a	288,59 b	22,28 a	434,82 b
2136	71,88 a	289,06 b	21,81 a	430,74 b
2037	73,76 a	289,72 b	21,24 a	437,57 b
2068	73,64 a	295,12 a	22,62 a	434,02 b
2115	72,22 a	293,64 a	21,76 a	434,77 b
2583	69,93 a	295,07 a	22,60 a	451,38 a
2331	74,62 a	291,25 b	22,45 a	437,97 b
2630	75,05 a	294,23 a	24,74 a	456,03 a
2034	74,27 a	295,32 a	23,81 a	427,10 b
1528	73,27 a	295,98 a	21,83 a	438,01 b
Média	73,14	292,80	22,52	438,24
Cve(%)	2,69	0,39	4,83	2,00

Fonte: Da autora (2021)

Legenda: Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si a 5% de significância pelo Teste de Scott-Knott. Cve = coeficiente de variação experimental.

A baixa variabilidade observada para os parâmetros de combustibilidade pode ser atribuída à pequena variação estrutural apresentada pelos clones, especialmente em relação à composição química imediata e elemental (Tabela 3). Segundo Silva *et al.* (2019) a proporção entre os componentes voláteis e carbono fixo influencia as características de queima do combustível.

A derivada primeira da curva TG (curva DTG) (Figura 3) exibe dois picos de intensa decomposição térmica e possibilita a divisão dos estágios característicos da oxidação da madeira dos clones de *Eucalyptus*. O primeiro estágio considera a volatilização das

hemiceluloses, celulose e parte da lignina (LI *et al.*, 2013). No presente estudo, foi verificado o primeiro estágio da combustão, na faixa de temperaturas de 200 °C a 350 °C, semelhante ao que foi verificado por diversos outros autores para o mesmo estágio da combustão (PROTÁSIO *et al.*, 2019; MASSUQUE *et al.*, 2020; COSTA *et al.*, 2020).

Não foi observado efeito clonal significativo para a perda de massa tanto no primeiro estágio quanto para o segundo estágio da combustão (Tabela 4), em que todos os clones apresentaram valores médios de perda de massa semelhantes. Esses resultados podem ser atribuídos à pequena diferença entre os materiais genéticos avaliados, no que se refere à composição química imediata e elementar da madeira (Tabela 2).

Foi observada, para o primeiro estágio da combustão, a máxima perda da massa média de 73,14% na temperatura média de 292,80°C (Tabela 4). Nessa etapa ocorre a degradação térmica dos compostos voláteis, decorrente da decomposição da celulose, hemicelulose e parte da lignina. Sher *et al.* (2020), destacam que esta etapa representa a emissão de materiais voláteis e sua ignição levando à formação do carbono fixo residual que, por sua vez, irá sofrer combustão na segunda etapa.

A temperatura de máxima degradação térmica, no primeiro estágio da combustão (Tabela 2), apresentou efeito clonal significativo, classificando os clones em dois grupos distintos e a variação entre os materiais genéticos avaliados foi baixa, apenas 0,39%. A temperatura média da taxa máxima de perda de massa no primeiro estágio (292,80°C) ficou bem próxima da observada por Protásio *et al.* (2019), que estudando a madeira de eucalipto, verificaram a degradação máxima na temperatura média de 297,5°C. Tenorio e Moya (2013) atribuíram essa taxa máxima de perda de massa à degradação da celulose.

O segundo estágio da combustão da madeira ocorreu na faixa de temperatura entre 350 a 460°C, em que a máxima perda de massa média foi de 22,52% e ocorreu sob a temperatura média de 438,24°C (Tabela 4). Nesta etapa, ocorre a decomposição da lignina e a combustão do carbono fixo gerado no estágio anterior. De acordo com Costa *et al.* (2020) a lignina apresenta relação com o carbono fixo no segundo estágio da combustão pois é o componente de maior estabilidade térmica o que resulta em maior liberação de energia nessa fase.

Para a temperatura de máxima perda de massa no segundo estágio, os clones estudados foram classificados também em dois grupos distintos, a média observada foi de 438,24°C. Protásio *et al.* (2019) que avaliaram 14 clones de *Eucalyptus* spp., observaram picos de degradação para o segundo estágio de combustão variando entre 360° a 460°.

Os parâmetros de combustibilidade da madeira estão apresentados na Tabela 5. Pela análise de variância verificou-se que a temperatura de ignição (Ti), o tempo correspondente à

máxima taxa de combustão ( $T_p$ ) e o tempo de ignição ( $T_{ig}$ ) não apresentaram efeito clonal significativo. Valores menores de temperatura de ignição e final da combustão e de perda máxima de massa, indicam que os materiais apresentam maior facilidade de queima (XIONG *et al.*, 2014) enquanto elevada temperatura correspondente ao final da combustão ( $T_f$ ) prolonga o tempo de combustão (MASSUQUE *et al.*, 2020).

Tabela 5 - Parâmetros de combustão da madeira dos clones

Clone	Ti (°C)	Tf (°C)	(dm/dt) <sub>máx</sub> (%min <sup>-1</sup> )	Tp (min)	Tig (min)	S x 10 <sup>7</sup> (% <sup>2</sup> min <sup>-2</sup> °C <sup>-3</sup> )	Di x 10 <sup>3</sup> (%min <sup>-3</sup> )
2042	234,31 a	434,82 b	10,78 a	52,92 a	42,08 a	4,15 a	4,84 a
2136	232,21 a	430,74 b	10,36 a	52,79 a	41,66 a	4,19 a	4,71 a
2037	232,22 a	437,57 b	10,14 a	53,16 a	41,66 a	4,04 a	4,58 a
2068	236,26 a	434,02 b	6,67 b	53,24 a	41,47 a	2,62 b	3,02 b
2115	235,90 a	434,77 b	9,23 a	53,28 a	41,73 a	3,60 a	4,15 a
2583	239,35 a	451,38 a	8,47 b	53,23 a	42,09 a	2,98 b	3,78 b
2331	232,14 a	437,97 b	9,92 a	53,15 a	41,31 a	4,07 a	4,53 a
2630	237,07 a	456,03 a	7,86 b	53,06 a	41,63 a	2,99 b	3,56 b
2034	234,44 a	427,10 b	8,37 b	53,28 a	41,11 a	3,44 b	3,82 b
1528	236,53 a	438,01 b	8,89 b	53,42 a	41,52 a	3,36 b	4,00 b
Média	235,04	438,24	9,07	53,15	41,63	3,54	4,10
Cve	1,07	2,00	9,58	0,30	0,99	11,72	9,28

Fonte: Da autora (2021)

Legenda: Ti = temperatura de ignição; Tf = temperatura correspondente ao final da combustão; (dm/dt)<sub>máx</sub> = taxa máxima de perda de massa; Tp = tempo correspondente à máxima taxa de combustão; Tig = tempo de ignição; S = índice característico da combustão; Di = índice de ignição; Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si a 5% de significância pelo Teste de Scott-Knott. Cve = coeficiente de variação experimental (%).

De modo geral, as madeiras dos clones de *Eucalyptus* spp. avaliadas, apresentaram baixa variabilidade quanto a composição química imediata e elementar da madeira (Tabela 2), sendo constatado comportamento similar para a temperatura e o tempo de ignição. Silva *et al.* (2021), relataram que a facilidade de ignição está diretamente relacionada com a quantidade de gases voláteis emitidos pela decomposição térmica do combustível, ressaltaram que quanto menor for a temperatura de ignição, maior será a facilidade de queima do combustível.

Para a taxa máxima de perda de massa, índice característico da combustão e índice de ignição, observaram-se dois grupos distintos, em que os clones 2042, 2136, 2037, 2115 e 2331, foram considerados similares e apresentaram estatisticamente, maiores valores médios para esses parâmetros (Tabela 5).

O valor médio observado para a taxa máxima de perda de massa foi de 9,07% min<sup>-1</sup>, que foi alcançada à temperatura de 234,31°C. Protásio (2016), observou um valor médio para a taxa máxima de perda de massa de 7,8% min<sup>-1</sup>.

O índice característico da combustão médio observado foi de 3,54 %<sup>2</sup> min<sup>-2</sup> °C<sup>-3</sup>. Protásio (2016) obteve índice característico da combustão médio de 2,8 %<sup>2</sup> min<sup>-2</sup> °C<sup>-3</sup> para

clones de *Eucalyptus*, valor menor que o observado neste trabalho. Vale ressaltar que o índice característico da combustão (S) reflete a reatividade durante todo o processo de combustão, ou seja, a madeira com maior valor de S tem melhor desempenho na combustão (QIAN *et al.*, 2012; XIONG *et al.*, 2014; PROTÁSIO, 2016).

Os índices de ignição e característico de combustão representam o desempenho de combustão durante a ignição e a reatividade da biomassa, portanto, quanto maior forem estes índices melhor será o desempenho durante o processo de combustão da biomassa (QIAN *et al.*, 2012; XIONG *et al.*, 2014; PROTÁSIO, 2016).

## **5.2 Correlação simples entre as características químicas com os estágios de combustão e combustibilidade da madeira**

As Tabelas 6 e 7 apresentam as correlações entre as características químicas com as de combustão da madeira dos clones avaliados. Na Tabela 6 verifica-se que a perda de massa no primeiro estágio (PMAS1) foi influenciada significativa e positivamente pelos teores de holocelulose (HOLO), oxigênio (O) e nitrogênio (N) elementares. Elevados teores de holocelulose reduzem a estabilidade térmica da madeira (PROTÁSIO *et al.*, 2019; MASSUQUE *et al.*, 2020). O oxigênio e o nitrogênio são elementos químicos pouco energéticos (LIMA *et al.*, 2020), sendo liberados durante a desvolatilização.

A temperatura máxima no primeiro estágio (TMax1) apresentou correlação significativa e positiva com os teores de lignina insolúvel (LIGI), lignina total (LIGT) e cinzas (TCZ), além de correlação negativa com os teores de extrativos solúveis em água (AGU) e o monossacarídeo glucose (GLUCO). A lignina é componente químico com maior estabilidade térmica, necessitando de elevadas temperaturas para a sua desvolatilização em relação aos demais componentes da madeira (PROTÁSIO *et al.*, 2019; COSTA *et al.*, 2020). A perda de massa no segundo estágio (PMAS2) não foi influenciada significativamente por nenhuma das características avaliadas na madeira.

A temperatura máxima no segundo estágio (TMax2) foi afetada significativa e positivamente pelos teores LIGI e monossacarídeo xilose (XILO), enquanto os teores de lignina solúvel (LIGS), ácido galacturônico (AGALA), glucurônico (AGLUC) e total (ATOT) afetaram negativamente. Quanto maior o teor de lignina e xiloses maiores será a temperatura de pico no segundo estágio, corroborando com Sher *et al.* (2020), que informaram ser a lignina o componente químico responsável pela formação do carvão (fração sólida).

Tabela 6 – Matriz de correlação entre as características químicas e os estágios de combustão da madeira

Característica	PMAS1	TMax1	PMAS2	TMax2
DCL	0,2531	-0,2084	-0,3324	0,1584
ETA	-0,2900	0,4435	0,2859	0,0790
AGU	-0,1143	<b>-0,8011</b>	-0,2884	-0,4602
TET	-0,2626	-0,4166	-0,1984	-0,2336
LIGI	-0,5428	<b>0,5568</b>	0,3612	<b>0,5657</b>
LIGS	0,3375	0,0690	-0,2545	<b>-0,8103</b>
LIGT	-0,5077	<b>0,6546</b>	0,3365	0,4054
HOLO	<b>0,5869</b>	-0,5002	-0,2347	-0,3036
TCZ	-0,4186	<b>0,6539</b>	-0,1222	0,1862
RAMN	-0,3966	-0,3124	-0,0756	0,0922
ARAB	-0,3045	-0,2328	-0,1659	-0,0924
XILO	-0,3433	0,4718	0,4194	<b>0,7606</b>
MANO	0,1254	-0,3525	-0,3000	0,0502
GALAC	-0,0767	-0,1795	-0,0525	-0,2655
GLUCO	0,1663	<b>-0,5977</b>	-0,2215	-0,3347
AGALA	-0,2317	-0,2002	-0,4855	<b>-0,5642</b>
AGLUC	-0,2468	-0,1818	-0,4562	<b>-0,6346</b>
ATOT	-0,2386	-0,2019	-0,4917	<b>-0,5856</b>
ACET	0,2430	0,3379	-0,1304	-0,4057
TMV	0,4345	-0,3797	0,0791	-0,0313
TCZIM	-0,5465	0,0083	-0,1625	0,1163
TCF	-0,4132	0,3850	-0,0720	0,0258
C	-0,5383	0,2271	0,1416	0,0773
H	-0,3876	-0,1555	-0,1866	0,2484
O	<b>0,6323</b>	-0,1009	0,0059	-0,2195
N	<b>0,5735</b>	0,2151	0,1174	0,0159

Fonte: Da autora (2021)

Legenda: PMAS1 e PMAS2 = Perda de massa no primeiro e segundo estágio; TMax1 e TMax2 = Temperatura máxima no primeiro e segundo estágio. DCL, ETA, AGU e TET = teor de extrativos em diclorometano, etanol, água e totais; LIGI, LIGS e LIGT = teor de lignina insolúvel, solúvel e total; HOLO e TCZ = teor de holocelulose e cinzas (525 °C); RAMN, ARAB, XILO, MANO, GALC e GLUCO = teor de monossacarídeos ramnose, arabinose, xilose, manose, galactose e glucose; AGALA, AGLUC, ATOT = ácido galacturônico, glucurônico e total, ACET = acetato; TMV, TCZIM e TCF = teor de materiais voláteis, cinzas (950 °C) e carbono fixo; C, H, O, N = teor de carbono, hidrogênio, oxigênio e nitrogênio elementares. Correlações em destaque negrito são significativas pelo teste t, em nível de 5%.

Na Tabela 7 observa-se que a temperatura de ignição (Ti) apresentou correlação positiva e significativa com os teores de LIGI, LIGT, TCZ, XILO e carbono (C) elementar, além da correlação negativa com os teores de extrativos em água (AGU), HOLO, GLUCO e materiais voláteis (TMV). De acordo com Costa *et al.* (2020) quanto maior o TMV e AGU menor será a temperatura de ignição da biomassa.

A temperatura correspondente ao final da combustão (Tf) foi influenciada positiva e significativa pelos teores de LIGI e XILO, e negativamente com LIGS, AGALA, AGLUC e ATOT. A LIGI e XILO prolongam o tempo de combustão enquanto as hemiceluloses afetam negativamente a temperatura final de combustão.

Tabela 7 – Matriz de correlação entre as características químicas e as de combustibilidade da madeira

Característica	Ti	Tf	$(dm/dt)_{\max}$	Tp	Tig	S	Di
DCL	-0,3231	0,1584	0,2906	-0,0184	-0,1274	0,3050	0,3027
ETA	0,5305	0,0790	<b>-0,6401</b>	0,2504	0,0974	<b>-0,6689</b>	<b>-0,6526</b>
AGU	<b>-0,6707</b>	-0,4602	<b>0,7478</b>	<b>-0,6588</b>	0,1628	<b>0,7752</b>	<b>0,7554</b>
TET	-0,2737	-0,2336	0,1926	-0,3536	0,1771	0,1962	0,1945
LIGI	<b>0,8773</b>	<b>0,5657</b>	-0,5154	0,2025	0,4528	<b>-0,6896</b>	-0,5474
LIGS	-0,4010	<b>-0,8103</b>	-0,0766	0,2433	<b>-0,6136</b>	0,0908	-0,0533
LIGT	<b>0,8827</b>	0,4054	<b>-0,6213</b>	0,3021	0,3354	<b>-0,7670</b>	<b>-0,6509</b>
HOLO	<b>-0,7554</b>	-0,3036	0,5352	-0,1857	-0,3737	<b>0,6720</b>	<b>0,5629</b>
TCZ	<b>0,6499</b>	0,1862	<b>-0,5578</b>	<b>0,7222</b>	0,1349	<b>-0,6437</b>	<b>-0,5854</b>
RAMN	-0,1682	0,0922	0,1497	-0,5396	0,1708	0,1673	0,1589
ARAB	-0,2792	-0,0924	0,2103	-0,4355	-0,0646	0,2633	0,2285
XILO	<b>0,7990</b>	<b>0,7606</b>	<b>-0,6054</b>	0,1604	0,4060	<b>-0,7443</b>	<b>-0,6283</b>
MANO	-0,1044	0,0502	0,1848	-0,0569	0,3512	0,1494	0,1687
GALAC	-0,3224	-0,2655	0,1969	-0,3717	-0,2014	0,2717	0,2154
GLUCO	<b>-0,7097</b>	-0,3347	<b>0,7608</b>	-0,5091	-0,1728	<b>0,8308</b>	<b>0,7845</b>
AGALA	-0,2789	<b>-0,5642</b>	0,0284	-0,1849	-0,0324	0,1056	0,0306
AGLUC	-0,1473	<b>-0,6346</b>	0,1358	-0,1136	0,1297	0,1644	0,1248
ATOT	-0,2670	<b>-0,5856</b>	0,0434	-0,1792	-0,0113	0,1157	0,0440
ACET	0,0853	-0,4057	-0,3605	<b>0,6288</b>	-0,2709	-0,3023	-0,3674
TMV	<b>-0,5835</b>	-0,0313	0,3250	-0,4117	-0,3203	0,4520	0,3584
TCZIM	0,1773	0,1163	-0,1383	-0,1120	0,2902	-0,1786	-0,1504
TCF	0,5386	0,0258	-0,3227	0,4236	0,3103	-0,4497	-0,3561
C	<b>0,5982</b>	0,0773	-0,2328	-0,1506	0,4959	-0,3573	-0,2603
H	0,1340	0,2484	0,0547	-0,1727	0,4032	0,0016	0,0439
O	-0,5304	-0,2195	0,1740	0,1905	<b>-0,5893</b>	0,2952	0,2008
N	-0,1317	0,0159	-0,1767	0,3293	-0,4628	-0,1119	-0,1642

Fonte: Da autora (2021)

Ti = temperatura de ignição; Tf = temperatura correspondente ao final da combustão;  $(dm/dt)_{\max}$  = taxa máxima de perda de massa; Tp = tempo correspondente à máxima taxa de combustão; Tig = tempo de ignição; S = índice característico da combustão; Di = índice de ignição. DCL, ETA, AGU e TET = teor de extrativos em diclorometano, etanol, água e totais; LIGI, LIGS e LIGT = teor de lignina insolúvel, solúvel e total; HOLO e TCZ = teor de holocelulose e cinzas (600 °C); RAMN, ARAB, XILO, MANO, GALC e GLUCO = teor de monossacarídeos ramnose, arabinose, xilose, manose, galactose e glucose; AGALA, AGLUC, ATOT = ácido galacturônico, glucurônico e total, ACET = acetato; TMV, TCZIM e TCF = teor de materiais voláteis, cinzas (950 °C) e carbono fixo; C, H, O, N = teor de carbono, hidrogênio, oxigênio e nitrogênio elementares.

Correlações em destaque negrito são significativas pelo teste t, em nível de 5%.

A taxa máxima de perda de massa  $((dm/dt)_{\max})$  foi afetada positiva e significativamente pelos teores de AGU e GLUCO, e negativamente pelo teor de extrativos solúveis em etanol (ETA), LIGT, TCZ e XILO. Os ETA, LIGT e XILO, são mais estáveis termicamente que relação aos AGU e GLUCO.

O tempo correspondente à máxima taxa de combustão (Tp) foi influenciado positivamente pelo TCZ e acetato (ACET) e negativamente pelo AGU. O tempo de ignição (Tig) foi afetado negativamente pelo LIGS e O elementar. Os índices característicos da combustão (S) e ignição (Di) da biomassa foram influenciados significativamente e negativamente por ETA, LIGT e TCZ, e positivamente por AGU, HOLO e GLUCO. O LIGI afetou de forma significativa e negativamente somente o S.



## 6 CONCLUSÃO

O efeito clonal influenciou as propriedades térmicas madeira, exceto para a temperatura de ignição, tempo correspondente à máxima taxa de combustão e tempo de ignição.

Foi possível estabelecer dois estágios principais de combustão da madeira para os clones de *Eucalyptus* spp., sendo o primeiro estágio na faixa de temperatura de 200 a 350°C, e o segundo estágio na faixa de 350 a 460°C.

Madeiras que apresentem maiores conteúdos de oxigênio elementar proporcionaram maior perda de massa no primeiro estágio da combustão, enquanto aquelas de maior teor de lignina total e de menor teor de extrativos solúveis em água favorecem a temperatura máxima no primeiro estágio. Madeira com maiores teores de monossacarídeo xilose e menores teores de lignina solúvel e ácido glucurônico favorecem a temperatura máxima do segundo estágio da combustão.

A temperatura de ignição foi afetada positivamente pelos teores de lignina total e monossacarídeo xilose e negativamente pelos teores de holocelulose e monossacarídeo glucose.

Os teores de monossacarídeo xilose e lignina solúvel afetaram positiva e negativamente, respectivamente, a temperatura correspondente ao final da combustão.

A taxa máxima de perda de massa foi afetada positivamente pelos teores de monossacarídeo glucose e extrativos solúveis em água e negativamente pelos conteúdos de lignina total e extrativos solúveis em etanol.

O tempo correspondente a taxa máxima de combustão foi afetada positivamente pelos teores de extrativos em água e acetato e negativamente pelo teor de extrativos solúveis em água.

O tempo de ignição foi afetado negativamente pelo teor de lignina solúvel.

Madeiras que apresentem maiores teores de monossacarídeo glucose e extrativos solúveis em água e menores teores de lignina total e monossacarídeo xilose apresentaram maior índice característico de combustão.

Madeira com maiores teores de monossacarídeo glucose e extrativos solúveis em água e menores teores de lignina total e extrativos solúveis em etanol apresentaram maiores índices de ignição da madeira.

Dentre os materiais genéticos avaliados, os que apresentaram os melhores índices de combustão e ignição foram os clones: 2042, 2136, 2037, 2115 e 2331, os quais demonstraram

as melhores performances de combustão e facilidade de queima. Logo, estes são os mais recomendados à geração de energia térmica.

Os clones 2068, 2583, 2630, 2034, 1528 apresentaram os piores índices de combustibilidade, sendo assim classificados como os menos recomendados à geração de energia térmica.

## REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas energia elétrica do Brasil**. 2. ed. Brasília: ANEEL, 2005. Disponível em: [https://www.aneel.gov.br/livros/-/asset\\_publisher/eZ674TKh9oF0/content/atlas-de-energia-eletrica-do-brasil/656835](https://www.aneel.gov.br/livros/-/asset_publisher/eZ674TKh9oF0/content/atlas-de-energia-eletrica-do-brasil/656835). Acesso em: 1 set. 2021.
- BALASUNDRAM, Vekes *et al.* Thermogravimetric catalytic pyrolysis and kinetic studies of coconut copra and rice husk for possible maximum production of pyrolysis oil. **Journal of Cleaner Production**, v. 167, p. 218-228, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.173>. Acesso em: 1 set. 2021.
- BEÇA, António Manuel da Silva. **Estudo prévio da queima de cortiça em leito fluidizado e obtenção de dados cinéticos**. Mestrado (Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2011. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/59669/1/000146698.pdf>. Acesso em: 1 set. 2021.
- BUFALINO, Lina *et al.* Caracterização química e energética para aproveitamento da madeira de costaneira e desbaste de cedro australiano. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 32, n. 70, p. 129-137, 2012. Disponível em: <https://pfb.cnpf.embrapa.br/pfb/index.php/pfb/article/view/356>. Acesso em: 1 set. 2021.
- BRUTTI, R. C. *et al.* **Estudo da viabilidade técnica do aproveitamento dos gases da combustão de biomassa na secagem de serragem para a geração de energia**. Relatório de Pesquisa: Adequação do uso de resíduos de madeira de pequena granulometria para a geração de energia. 2009.
- CARNEIRO, Angélica de Cássia Oliveira *et al.* Estudo da decomposição térmica da madeira de oito espécies da região do Seridó, Rio Grande do Norte. **Revista Árvore**, v. 37, n. 6, p. 1153-1163, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622013000600017>. Acesso em: 1 set. 2021.
- CHAVES, Antonio *et al.* Características energéticas da madeira e carvão vegetal de clones de *Eucalyptus* spp.. **Enciclopédia Biosfera**, v. 9, n. 17, p. 533-542, 2013. Disponível em: <https://www.conhecer.org.br/ojs/index.php/biosfera/article/view/3042>. Acesso em: 1 set. 2021.
- COSTA, Jéssica Saraiva da *et al.* Relating features and combustion behavior of biomasses from the Amazonian agroforestry chain. **Biomass Conversion and Biorefinery**, p. 1-21, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13399-020-01121-1>. Acesso em: 1 set. 2021.
- DEMIRBAŞ, Ayhan. Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals. **Energy Conversion and Management**, v. 42, n. 11, p. 1357-1378, 2001. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(00\)00137-0](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(00)00137-0). Acesso em: 1 set. 2021.
- DEMIRBAS, Ayhan. Relationships between Heating Value and Lignin, Moisture, Ash and Extractive Contents of Biomass Fuels. **Energy Exploration & Exploitation**, v. 20, n. 1, p. 105-111, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.1260/014459802760170420>. Acesso em: 1 set. 2021.

DING, Yanming *et al.* Comparative pyrolysis behaviors and reaction mechanisms of hardwood and softwood. **Energy Conversion and Management**, v. 132, p. 102-109, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.11.016>. Acesso em: 1 set. 2021.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2016**: Ano base 2020. Rio de Janeiro: EPE, 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Balanco-Energetico-Nacional-2021>. Acesso em: 1 dez. 2021.

FERNANDES, Eveline Ribas Kasper *et al.* Thermochemical characterization of banana leaves as a potential energy source. **Energy Conversion and Management**, v. 75, p. 603-608, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.08.008>. Acesso em: 1 set. 2021.

GARCÍA, Roberto *et al.* Biomass proximate analysis using thermogravimetry. **Bioresource Technology**, v. 139, p. 1-4, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.03.197>. Acesso em: 1 set. 2021.

GUERRA, Saulo Philipe Sebastião; OGURI, Guilherme; SPINELLI, Raffaele. Harvesting *eucalyptus* energy plantations in Brazil with a modified New Holland forage harvester. **Biomass and Bioenergy**, v. 86, p. 21-27, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.01.003>. Acesso em: 1 set. 2021.

HUANG, C. *et al.* Ultimate analysis and heating value prediction of straw by near infrared spectroscopy. **Waste Management**, v. 29, n. 6, p. 1793-1797, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.11.027>. Acesso em: 1 set. 2021.

INTERNACIONAL ENERGY AGENCY. **Tracking Clean Energy Progress 2021**. Paris: IEA, 2017. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/tracking-clean-energy-progress-2021>. Acesso em: 1 dez. 2021.

LATORRACA, João Vicente de F.; ALBUQUERQUE, Carlos Eduardo C. de. Efeito do rápido Crescimento sobre as propriedades da madeira. **Floresta e Ambiente**, v. 7, n. 1, p. 279-291, jan./dez. 2000. Disponível em: <https://www.floram.org/journal/floram/article/588e21f4e710ab87018b45b5>. Acesso em: 1 set. 2021.

LI, Lili *et al.* Thermogravimetric and kinetic analysis of *Spirulina* wastes under nitrogen and air atmospheres. **Bioresource Technology**, v. 140, p. 152-157, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.04.121>. Acesso em: 1 set. 2021.

LIMA, Edson Alves de; SILVA, Helton Damini da; LAVORANTI, Osmir José. Caracterização dendroenergética de árvores de *Eucalyptus benthamii*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 31, n. 65, p. 9-17, 2011. Disponível em: <https://pfb.cnpf.embrapa.br/pfb/index.php/pfb/article/view/192>. Acesso em: 1 set. 2021.

LIMA, Michael Douglas Roque *et al.* Variabilidade das densidades básica e energética e estoque de carbono na madeira no fuste de clones de *Eucalyptus*. **Scientia Forestalis**, v. 48, n. 128, p. 1-17, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.18671/scifor.v48n128.04>. Acesso em: 1 set. 2021.

LÓPEZ-GONZÁLEZ, D. *et al.* Thermogravimetric-mass spectrometric analysis on combustion of lignocellulosic biomass. **Bioresource Technology**, v. 143, p. 562-574, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.06.052>. Acesso em: 1 set. 2021.

MAGDZIARZ, Aneta; WILK, Małgorzata. Thermal characteristics of the combustion process of biomass and sewage sludge. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 114, n. 2, p. 519-529, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10973-012-2933-y>. Acesso em: 1 set. 2021.

MARAFON, Anderson Carlos *et al.* **Poder Calorífico do Capim-Elefante para a Geração de Energia Térmica**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2016.

MASSUQUE, Jonas *et al.* Characterization of Miombo species used by rural communities as fuelwood in northern Mozambique. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, p. 1-10, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1815910>. Acesso em: 1 set. 2021.

MIRANDA, Marcos Antonio da Silva *et al.* *Eucalyptus* sp. woodchip potential for industrial thermal energy production. **Revista Árvore**, v. 41, n. 6, p. 1-8, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1806-90882017000600004>. Acesso em: 1 set. 2021.

MOON, Cheoreon *et al.* Effect of blending ratio on combustion performance in blends of biomass and coals of different ranks. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 47, p. 232-240, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2013.01.019>. Acesso em: 1 set. 2021.

MORAES, Sandra Lúcia de *et al.* Cenário brasileiro da geração e uso de biomassa adensada. **Revista IPT: Tecnologia e Inovação**, v. 1, n. 4, p. 58-73, 2017. Disponível em: <http://revista.ipt.br/index.php/revistaIPT/article/view/37>. Acesso em: 1 set. 2021.

MÜLLER, Marcelo Dias. **Produção de madeira para Geração de Energia Elétrica numa Plantação Clonal de Eucalipto em Itamarandiba, MG**. 2005. 94 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005. Disponível em: <https://locus.ufv.br/handle/123456789/9472>. Acesso em: 1 set. 2021.

NASCIMENTO, M. D. do; BIAGGIONI, M. A. M. Avaliação energética do uso de lenha e cavaco de madeira para produção de energia em agroindústria seropédica. **Energia na Agricultura**, v. 25, n. 3, p. 104-117, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.17224/EnergAgric.2010v25n3p104-117>. Acesso em: 1 set. 2021.

NOGUEIRA, Luiz Augusto Horta; LORA, Electo Eduardo Silva. **Dendroenergia: fundamentos e aplicações**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2003.

PAREDES-SÁNCHEZ, José P. *et al.* Evolution and perspectives of the bioenergy applications in Spain. **Journal of Cleaner Production**, v. 213, p. 553-568, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.112>. Acesso em: 1 set. 2021.

PATEL, Madhumita; ZHANG, Xiaolei; KUMAR, Amit. Techno-economic and life cycle assessment on lignocellulosic biomass thermochemical conversion technologies: a review.

**Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 53, p. 1486-1499, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.070>. Acesso em: 1 set. 2021.

PEREIRA, José Carlos Duarte *et al.* **Características da madeira de algumas espécies de eucalipto plantadas no Brasil**. Colombo: Embrapa Florestas, 2000. (Embrapa Florestas. Documentos, 38). Disponível em: <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/recursos/doc38ID-Mw8eMekWla.pdf>. Acesso em: 1 set. 2021.

PEREIRA, Matheus Perdigão de Castro Freitas *et al.* Torrefação de cavacos de eucalipto para fins energéticos. Torrefação de cavacos de eucalipto para fins energéticos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 36, n. 87, p. 269-275, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.4336/2016.pfb.36.87.1093>. Acesso em: 1 set. 2021.

PIMENTA, A. S.; BARCELLOS, D. C.; OLIVEIRA, E. **Carbonização**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2010.

PINHO, Carlos Manuel Coutinho Tavares de. **Sistemas Térmicos**. Porto: Departamento de Engenharia Mecânica da FEUP-UP, 2014.

PROTÁSIO, Thiago de Paula *et al.* Relação entre o poder calorífico superior e os componentes elementares e minerais da biomassa vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 31, n. 66, p. 113-122, 2011. Disponível em: <https://pfb.cnpf.embrapa.br/pfb/index.php/pfb/article/view/200>. Acesso em: 1 set. 2021.

PROTÁSIO, T. P. **Características de crescimento, madeira e carvão para a classificação de clones de *Eucalyptus* spp. visando o uso energético**. 2016. 163 f. Tese (Doutorado em Ciência e tecnologia da madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2016.

PROTÁSIO, Thiago de Paula *et al.* Assessing Proximate Composition, Extractive Concentration, and Lignin Quality to Determine Appropriate Parameters for Selection of Superior *Eucalyptus* Firewood. **BioEnergy Research**, v. 12, p. 626-641, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12155-019-10004-x>. Acesso em: 1 set. 2021.

QIAN, Wei *et al.* Combustion characteristics of semicokes derived from pyrolysis of low rank bituminous coal. **International Journal of Mining Science and Technology**, v. 22, n. 5, p. 645-650, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2012.08.009>. Acesso em: 1 set. 2021.

ROWELL, Roger M. *et al.* (Eds.). **Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites**. Boca Raton: CRC Press, 2005.

SAHU, S. G. *et al.* Thermogravimetric assessment of combustion characteristics of blends of a coal with different biomass chars. **Fuel Processing Technology**, v. 91, n. 3, p. 369-378, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2009.12.001>. Acesso em: 1 set. 2021.

SCOTT, A. J.; KNOTT, M. A cluster analysis method for grouping means in the analysis of variance. **Biometrics**, v. 30, n. 3, p. 507-512, 1974. Disponível em: <https://doi.org/10.2307/2529204>. Acesso em: 1 set. 2021.

SEGURADO, Raquel *et al.* Techno-economic analysis of a trigeneration system based on

biomass gasification. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 103, p. 501-514, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.008>. Acesso em: 1 set. 2021.

SHER, Farooq *et al.* Thermal and kinetic analysis of diverse biomass fuels under different reaction environment: A way forward to renewable energy sources. **Energy Conversion and Management**, v. 203, p. 1-12, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112266>. Acesso em: 1 set. 2021.

SILVA, Diego A. da *et al.* A Influência da Umidade em Propriedades Mecânicas de Briquetes Produzidos com Resíduos de Madeira (*Eucalyptus* sp. e *Pinus* sp.). **Revista Virtual de Química**, v. 9, n. 3, p. 1078-1086, 2017. Disponível em: [http://rvq.sbq.org.br/detalhe\\_artigo.asp?id=764](http://rvq.sbq.org.br/detalhe_artigo.asp?id=764). Acesso em: 1 set. 2021.

SILVA, F. T. M. *et al.* Valorization of *Eucalyptus* urograndis wood via carbonization: product yields and characterization. **Energy**, v. 172, p. 509-516, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.01.159>. Acesso em: 1 set. 2021.

SILVA, Simão Pereira da *et al.* A IMPORTÂNCIA DA BIOMASSA NA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA. **Revista Pensar Acadêmico**, v. 19, n. 2, p. 557-583, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.21576/pa.2021v19i2.2306>. Acesso em: 1 set. 2021.

STATSOFT. **STATISTICA (Data Analysis Software System), version 8**. TIBCO Software Inc. 2012.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **Test Method Um 250 - Acid-soluble lignin in wood and pulp**. Atlanta: TAPPI, 1991.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **Test methods T204 om-88: solvent extractives of wood and pulp**. Atlanta: TAPPI, 2001.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **Tappi Test Method T222 om-02 - Acid-insoluble lignin in wood and pulp**. Atlanta: TAPPI; 2002.

TENORIO, Carolina; MOYA, Róger. Thermogravimetric characteristics, its relation with extractives and chemical properties and combustion characteristics of ten fast-growth species in Costa Rica. **Thermochemica Acta**, v. 563, p. 12-21, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2013.04.005>. Acesso em: 1 set. 2021.

TRUGILHO, Paulo Fernando; SILVA, Dimas Agostinho da. 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, p. 45-53, dez. 2001. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5380/rsa.v2i1.976>. Acesso em: 1 set. 2021.

VITAL, B. R.; CARNEIRO A. C.; PEREIRA, B. L. Qualidade da madeira para fins energéticos. In: SANTOS, Fernando; COLODETTE, Jorge; QUEIROZ, José Humberto de. (Ed.). **Bioenergia e Biorrefinaria: Cana-de-açúcar e espécies florestais**. Viçosa: O Editor, 2013, p. 321-354.

WANG, Chang'an *et al.* A Study on Coal Properties and Combustion Characteristics of Blended Coals in Northwestern China. **Energy & Fuels**, v. 25, n. 8, p. 3634-3645, 2011.

Disponível em: <https://doi.org/10.1021/ef200686d>. Acesso em: 1 set. 2021.

XIONG, Shaowu *et al.* Investigation on cotton stalk and bamboo sawdust carbonization for barbecue charcoal preparation. **Bioresource Technology**, v. 152, p. 86-92, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.11.005>. Acesso em: 1 set. 2021.

YEO, Jun Yi *et al.* Comparative studies on the pyrolysis of cellulose, hemicellulose, and lignin based on combined kinetics. **Journal of the Energy Institute**, v. 92, n. 1, p. 27-37, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.joei.2017.12.003>. Acesso em: 1 set. 2021.

YU, Jie *et al.* Cellulose, xylan and lignin interactions during pyrolysis of lignocellulosic biomass. **Fuel**, v. 191, p. 140-149, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.11.057>. Acesso em: 1 set. 2021.