

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

CARLOS MIGUEL SIMÕES DA SILVA

**EFEITO DA TEMPERATURA DE TORREFAÇÃO NAS PROPRIEDADES
ENERGÉTICAS DA MADEIRA DE EUCALIPTO**

VIÇOSA
MINAS GERAIS-BRASIL
JANEIRO – 2014

CARLOS MIGUEL SIMÕES DA SILVA

**EFEITO DA TEMPERATURA DE TORREFAÇÃO NAS PROPRIEDADES
ENERGÉTICAS DA MADEIRA DE EUCALIPTO**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do curso de Engenharia Florestal.

VIÇOSA
MINAS GERAIS-BRASIL
JANEIRO - 2014

CARLOS MIGUEL SIMÕES DA SILVA

**EFEITO DA TEMPERATURA DE TORREFAÇÃO NAS PROPRIEDADES
ENERGÉTICAS DA MADEIRA DE EUCALIPTO**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do curso de graduação em Engenharia Florestal.

APROVADA: 17 de Janeiro de 2014.

Angélica de Cássia Oliveira Carneiro
(Coorientadora)

Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho

Benedito Rocha Vital
(Orientador)

AGRADECIMENTOS

A todos que contribuíram de maneira direta ou indireta, não só para o desenvolvimento dessa monografia, mas também para a minha formação acadêmica em geral. Agradeço a Deus, à N. S. Aparecida, aos meus pais e aos meus irmãos que nunca deixaram de me ajudar, mesmo quando eu fiz tudo errado, eles sempre deram um jeitinho para que tudo terminasse bem. Agradeço à Escola Estadual de Bueno Brandão e à Universidade Federal de Viçosa, em especial aos professores Benedito, Cassinha e Ana Márcia, que contribuíram de maneira mais efetiva para a minha formação. Aos amigos do curso de Engenharia Florestal, do “Albergue 2211” e do LAPEM pelos quase cinco anos de convívio, ajuda mútua e muitas piadas ruins. Ao pessoal da Pós-Graduação (Solange, Tito, Babi...), da Graduação (Mateus, Tiago, Emylle, Juliana, Bráulio, Yurie, Welliton...), aos funcionários (Moiado, Seu Maninho, Jaqueline) e à tantos outros que me ajudaram em momentos importantes da minha formação. Aos demais funcionários e professores do DEF e de outros departamentos pelas importantes contribuições acadêmicas. A Isabel Cristina, da Universidade Federal de Lavras, pela ajuda nas análises. A Suzano pela doação das madeiras utilizadas no experimento. Ao CNPq, à SIF e à Embrapa Florestas pelas bolsas a mim concedidas. A Votorantim Siderurgia e a ArcelorMittal Bioflorestas pelas oportunidades de estágio e aprendizado.

BIOGRAFIA

Carlos Miguel Simões da Silva, filho de José Custódio da Silva e Dirce Antunes Simões da Silva, nasceu em 26 de Dezembro de 1990, no município de Bueno Brandão, Minas Gerais.

Em 2008, concluiu o ensino médio na Escola Estadual de Bueno Brandão.

Em 2009, ingressou no curso de Engenharia Florestal, na Universidade Federal de Viçosa.

CONTEÚDO

EXTRATO.....	v
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1. Biomassa Energética.....	3
2.2. Produção e Uso de Madeira no Brasil.....	5
2.3. Composição Química da Madeira.....	6
2.4. Torrefação da Madeira.....	8
3. OBJETIVO.....	12
3.1. Objetivo Geral.....	12
3.2. Objetivos Específicos.....	12
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	13
4.1. Torrefação das Amostras.....	14
4.2. Propriedades da Biomassa.....	15
4.2.1. Distribuição Granulométrica.....	15
4.2.2. Densidade a Granel.....	15
4.2.3. Umidade de Equilíbrio Higroscópico.....	15
4.2.4. Composição Química Imediata.....	15
4.2.5. Composição Química Estrutural.....	15
4.2.6. Composição Química Elementar.....	15
4.2.7. Degradação Térmica.....	15
4.2.8. Poder Calorífico Superior.....	16
4.2.9. Densidade Energética.....	16
4.3. Balanço de Massa e de Energia.....	17
4.4. Delineamento Experimental.....	18
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	19
6. CONCLUSÕES.....	30
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	31

EXTRATO

SILVA, Carlos Miguel Simões da. Monografia de graduação. Universidade Federal de Viçosa, Janeiro de 2014. **Efeito da temperatura de torrefação nas propriedades energéticas da madeira de eucalipto.** Orientador: Benedito Rocha Vital. Coorientadora: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro.

Torrefação é um tratamento térmico da madeira aplicado entre as temperaturas de 200 e 300 °C em ambiente com concentrações reduzidas de oxigênio. Essa técnica degrada os constituintes menos energéticos do material, elevando a densidade energética e homogeneizando suas as propriedades físicas, químicas e térmicas. O objetivo do presente estudo foi avaliar o efeito da temperatura torrefação nas propriedades da madeira de eucalipto. No procedimento experimental utilizou um torrefador rotatório com aquecimento a gás GLP, empregando-se quatro tratamentos com três repetições constituídos por partículas de madeira não torrificadas e partículas torrificadas nas temperaturas de 170, 220 e 260 °C. Posteriormente, procedeu com as análises química, física e térmica das partículas. Os resultados foram comparados entre si através da ANOVA e do teste Tukey. Comparando os extremos, a madeira “in natura” (não torrificada) e madeira torrificada a 260 °C observaram-se aumento no teor de

carbono fixo de 13,0 para 24,8%, no teor de lignina de 32,7 para 52,2%, no poder calorífico superior de 4465 para 4945 kcal/kg, na densidade á granel de 239,1 para 396,0 kg/m³, na densidade energética de 882 para 1727 Mcal/m³ e redução na umidade de equilíbrio higroscópico de 12,27 para 5,69%. A torrefação apresentou um efeito positivo nas propriedades energéticas da madeira, concluindo ser um tratamento tecnicamente viável e com potencial de exploração.

1. INTRODUÇÃO

O tradicional uso da madeira como fonte energética perdeu grande parte da sua representatividade dentro do cenário mundial a partir do século XX. O principal motivo foi o desenvolvimento tecnológico de exploração e uso dos combustíveis fósseis, que em poucas décadas, assumiram o posto de fonte energética principal da matriz mundial, mantendo-se nessa liderança até os dias atuais.

Porém, o uso dos combustíveis fósseis é contestado por serem fontes energéticas não renováveis e possuírem um potencial poluidor que ultrapassa o que se diz ser ambientalmente aceitável. Com isso, aumenta-se o interesse nos estudos e no desenvolvimento de fontes alternativas de energia que possam competir e até mesmo substituir, futuramente, os combustíveis fósseis. No geral, esses investimentos buscam fontes que apresentem vantagens ambientais (redução da emissão de poluentes), estratégicas (maior segurança energética aos países dependentes da importação de combustíveis fósseis) e socioeconômicas (diminuição da pobreza e acesso à energia em regiões isoladas), mantendo um padrão aceitável de qualidade energética dessa fonte alternativa.

No Brasil, uma das principais alternativas estudadas é a chamada biomassa energética. Trata-se de um recurso com relativa facilidade de obtenção no país, tendo em vistas o grande volume de resíduos orgânicos produzidos pelas agroindústrias também as condições naturais brasileiras favoráveis ao desenvolvimento de culturas

agrícolas e/ou florestais com finalidades exclusivamente energéticas. Dentre essas possibilidades, a madeira é uma das que apresenta maior potencial de crescimento, podendo retomar a importância energética que outrora representava.

Entretanto, a madeira, assim como as outras biomassas, apresenta baixo poder calorífico, elevado teor de umidade e heterogeneidade. Essas características justificam sua baixa participação e competitividade no mercado energético, principalmente industrial. O desafio então é desenvolver tecnologias e métodos de tratamentos prévios capazes de minimizar essas características indesejadas, tornando a madeira um combustível mais competitivo.

Uma dessas técnicas seria a torrefação, processo pelo qual a madeira passa por um tratamento térmico com temperatura e concentração de oxigênio controlada, que segundo a literatura, é capaz de apresentar melhorias energéticas, químicas e físico-mecânicas no material. Limitando-se ao máximo de 300 °C, a madeira é aquecida, degradando os compostos menos energéticos de sua constituição, concentrando no produto sólido final os compostos com maiores percentuais de carbono na constituição, ou seja, os mais energéticos. Além disso, a madeira torreficada apresenta menor umidade e maior homogeneidade quanto as suas propriedades físicas, químicas e térmicas.

Fundamentando-se nisso, consideram-se justificáveis estudos mais detalhado visando conhecer a influência do processo de torrefação nas propriedades físicas, químicas e térmicas das madeiras submetidas a esse tipo de tratamento. Assim, o conhecimento do efeito da temperatura nas principais propriedades da madeira de eucalipto servirá como um embasamento científico para a utilização ou não dessa técnica como tratamento térmico em empreendimentos futuros do setor para a competitividade da biomassa florestal na matriz energética brasileira.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Biomassa Energética

A biomassa é uma fonte primária e renovável de energia química resultante do processo de fotossíntese, apta a ser transformada em outras formas de energia (RODRIGUES, 2009). Trata-se de todo recurso renovável oriundo de material orgânico que pode ser utilizado na produção de energia (MACÊDO, 2012). Esse combustível pode ser obtido através de plantios destinados exclusivamente para produção de energia ou através de resíduos lignocelulósicos provenientes de atividades agrícolas e florestais.

A utilização do recurso biomassa energética é ainda muito baixo quando comparado a outras fontes. No passado já foi mais utilizada, porém foi gradativamente substituído pelos combustíveis fósseis depois da revolução industrial, primeiramente pelo carvão mineral e depois pelo petróleo, quando perdeu bastante espaço dentro da matriz energética mundial (HÉMERY et al., 1993).

O relatório da IEA Bioenergy Task 40 (2013) menciona o Brasil como sendo o país que mais utiliza biomassa para geração de energia, com aproximadamente 16% do uso mundial no setor, seguido pelos Estados Unidos (9%) e Alemanha (7%). Segundo Brasil (2013), a biomassa colabora com cerca de um quarto da total de energia

consumida internamente no Brasil. As principais fontes citadas são o bagaço de cana (11,2%), a lenha (6,5%), o etanol (4,2%) e o carvão vegetal (1,8%).

A biomassa é considerada uma fonte energética biodegradável que não contribui efetivamente para o acúmulo de gases causadores do efeito estufa, já que existe um equilíbrio entre o que é emitido pela sua combustão e o que é absorvido pelas plantas durante o seu desenvolvimento. Somado a isso, o oxigênio existente na composição desse material favorece a uma menor produção de monóxido de carbono durante a queima (PETROBRÁS, 2007).

O fato de ser renovável possibilita um maior controle econômico da matriz energética já que se pode interferir na produção, ou seja, planta-se mais se houver demanda, planta-se menos se houver grande oferta. No cenário social, o uso da biomassa pode ser uma alternativa para o abastecimento de energia em comunidades isoladas e para geração de empregos (PETROBRÁS, 2007).

Apesar das vantagens mencionadas, percebe-se que a biomassa é um recurso energético pouco utilizado e pouco competitivo no mercado. Segundo Dutta e Leon (2012), as principais causas inerentes a própria biomassa, quando comparada a fontes energéticas de origem fóssil, são:

- Baixa densidade;
- Alto teor de umidade;
- Baixo teor de carbono fixo;
- Alto teor de material volátil;
- Higroscopicidade (capacidade de absorver umidade);
- Heterogeneidade (grande variedade de formas, tamanhos e tipos);
- Baixo poder calorífico (energia/massa);
- Baixa densidade energética (energia/volume);
- Volumoso (transporte antieconômico a longas distâncias);
- Grandes variações nas propriedades de combustão;

Brito (2013), referindo ao uso da biomassa madeira, diz que para contornar essas adversidades deve-se investir em tecnologias mais eficientes de combustão direta (fornos e fogões), nos processos de pré-tratamentos e nas rotas de conversão térmica, química, biológica ou combinada. Esse autor menciona que essas tecnologias não precisam ser necessariamente iniciadas do zero, porque muitas vezes apenas uma

continuação ou reformulação dos processos já são suficientes para se obter resultados satisfatórios.

2.2. Produção e Uso de Madeira no Brasil

Dentre as fontes energéticas conhecidas, a madeira é uma das menos valorizadas apesar de possuir um grande potencial de desenvolvimento para um futuro próximo. Comumente associado a países pouco desenvolvidos, onde é utilizada na forma de lenha em sistemas de conversão com baixa eficiência energética, a madeira passou a ganhar importância também nos países desenvolvidos. Estados Unidos, Canadá e União Européia aumentaram os investimentos no desenvolvimento tecnológico, na produção e no consumo da madeira e seus derivados, principalmente na forma de pellets, para o aquecimento residencial e demais construções durante o inverno (COUTO, 2013).

O uso energético da madeira pode significar para o Brasil uma maior segurança e independência energética em relação ao mercado internacional, além de ser uma atividade geradora de empregos tanto no campo quanto na cidade. O Brasil possui a maior produtividade florestal por hectare-ano, ou seja, o maior incremento médio anual (IMA) que possibilita o menor ciclo de colheita do mundo para plantios florestais (ABRAF, 2012). Vital et al. (2013) citam que os principais motivos são as condições edafoclimáticas e fundiárias favoráveis, a política histórica de investimento em pesquisa e desenvolvimento, a verticalização do setor e a qualidade de mão de obra brasileira empregada no setor.

A madeira é a principal biomassa utilizada pelo setor energético brasileiro, sendo o seu emprego dividido em dois segmentos principais: o consumo direto da lenha visando à produção de calor (energia) e a carbonização visando à produção de carvão vegetal (VITAL et al., 2013). Em 2012, os segmentos de lenha e de carvão vegetal para siderurgia representaram 28,4% e 17,7%, respectivamente, do total de madeira em tora consumida no país. Os outros segmentos consumidores foram área de celulose e papel (42,1%), madeira serrada (5,4%) e painéis de madeira industrializada (4,3%) (ABRAF, 2013).

Em 2012, a área ocupada por florestas plantadas no Brasil totalizou 6,7 milhões de hectares, dos quais aproximadamente 5,1 milhões (76,6 %) de plantios de *Eucalyptus sp.* (ABRAF, 2013). O eucalipto é um grupo com mais de 600 espécies exóticas, além de uma grande quantidade de variedades e híbrido, pertencentes à família Myrtaceae (TRUGILHO et al., 1996). Castro (2011) cita como vantagens dessa essência florestal a boa adaptação as condições naturais e de silvicultura do Brasil, rápido crescimento, alta produtividade, adaptabilidade e diversificação quanto ao uso da madeira. Essa autora, revisando as espécies de eucalipto mais pesquisadas e utilizadas no Brasil, lista como sendo os principais *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus camaldulensis*, *Eucalyptus cloeziana*, *Eucalyptus pellita*, *Eucalyptus saligna* e diversos híbridos.

2.3. Composição Química da Madeira

A madeira tem três constituintes químicos principais: (i) Celulose - polímero polissacarídeo de cadeia linear e desprovido de ramificações; (ii) Hemiceluloses - polissacarídeos amorfos formados por vários tipos de açúcares, com estrutura ramificada e baixo grau de polimerização; (iii) Lignina - macromolécula heterogênea, ramificada, amorfa e polifenólica (VITAL et al., 2013).

Segundo Pereira (2012), a madeira de *Eucalyptus sp.* apresenta teores de celulose variando entre 46,1 e 48,8%, de hemiceluloses entre 21,9 e 22,5%, e de lignina entre 28,8 e 31,4%. Santos (2010) cita valores próximos, sendo a média de 32% para o teor de lignina e de 65% de holoceluloses (celulose + hemiceluloses).

A composição química influencia diretamente nas propriedades da madeira quando esta é submetida a algum processo térmico. Isso porque esses constituintes são termodegradados em faixas de temperaturas diferentes entre si. Carneiro et al. (2013) dizem que o primeiro a ser degradado é o grupo das hemiceluloses (200 °C – 260 °C), seguido pela celulose (240 °C – 350 °C) e por último, o componente mais resistente a decomposição térmica a lignina (150 °C – 500 °C). Apesar de iniciar em menores temperaturas, a decomposição térmica da lignina é a mais lenta e difícil, caracterizada

por uma baixa perda de massa em função do aumento da temperatura e por uma alta porcentagem de massa residual (OLIVEIRA, 2012).

Na Figura 1 está representada a degradação dos principais constituintes da madeira de eucalipto, exemplificando a perda de massa em função da temperatura. As xilanas compõem o principal grupo de hemiceluloses presente na madeira desse gênero florestal.

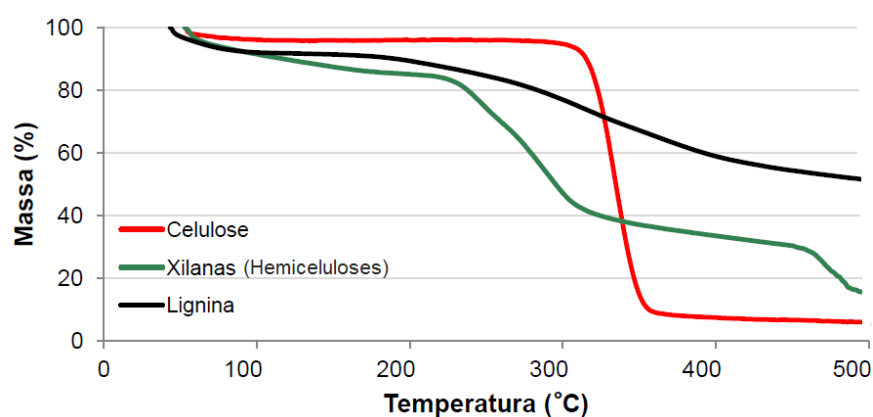


Figura 1 – Degradação térmica dos principais constituintes da madeira de *Eucalyptus* sp. (PEREIRA, 2012).

A composição química também influencia no conteúdo energético por massa de madeira. O poder calorífico da lignina é maior (21 a 27 MJ/kg) do que a celulose (17,2 a 17,5 MJ/kg) e as hemiceluloses (16,0 MJ/kg) (VITAL *et al.*, 2013). O motivo é a constituição química elementar de cada um. Os elementos carbono (C) e hidrogênio (H) são os principais contribuintes energéticos na madeira durante a combustão, enquanto oxigênio (O) e nitrogênio (N) influenciam negativamente. Pereira (2012), por exemplo, encontrou para celulose valores aproximado de 42% de C e 52% de O, para as hemiceluloses 41% de C e 53% de O, e para lignina 59% de C e 35% de O, explicado assim a diferença do conteúdo energético.

Além de ser o principal contribuinte energético, a lignina também influencia na higroscopicidade da madeira. Ela é o constituinte mais hidrofóbico e contribui efetivamente para reduzir a capacidade da madeira em absorver água do ambiente. As holoceluloses, no entanto, são mais hidrofílicas por apresentarem na constituição grupos hidroxílicos disponíveis para ligação de hidrogênio com moléculas de água. As

celuloses são menos hidrofílicas dos que as hemiceluloses devido às regiões cristalinas de sua estrutura que dificultam fisicamente a absorção de água (ROWELL, 2005).

2.4. Torrefação da Madeira

Torrefação, pirólise lenta, cozimento da madeira e secagem de alta temperatura são alguns nomes dados a uma técnica de tratamento térmico da biomassa, visando melhorias energéticas, desenvolvida inicialmente na França por volta de 1930 (VAN DER STELT et al., 2011). Esse tratamento produz um material com propriedades intermediárias entre a biomassa ao natural e a biomassa carbonizada, além de um conjunto reaproveitável de gases condensáveis. O material sólido resultante pode ser usado diretamente na produção de energia térmica ou como recurso para gaseificação e para produção de pellets e briquetes, dentre outras utilidades. Já os gases condensáveis podem ser aproveitados nas indústrias químicas (MACÊDO, 2012).

Van der Stelt et al.(2011) definem torrefação como sendo uma técnica de pré-tratamento térmico que pode melhorar as propriedades energéticas da biomassa para aumentar a sua qualidade e atratividade como combustível. Dutta e Leon (2012) dizem que o processo é um tratamento termoquímico que pode minimizar razoavelmente a maioria das desvantagens energéticas da biomassa lenhosa. A torrefação é um tratamento térmico da biomassa desenvolvido na fase endotérmica da pirólise, resultando em um material intermediário entre a biomassa e o carvão, com altos balanços energéticos. Rodrigues (2009) diz que o objetivo fundamental do processo de torrefação é concentrar a energia da biomassa em um produto formado em um determinado espaço de tempo considerado curto e em uma faixa de temperatura considerada de baixa a moderada, permitindo reter os voláteis de maior poder calorífico no próprio produto.

Na torrefação, a biomassa é termicamente tratada a uma temperatura entre 200 e 300 °C com baixa taxa de aquecimento, em ambiente com concentrações reduzidas ou ausente de oxigênio, durante tempos curtos de residência de no máximo algumas horas (VAN DER STELT et al., 2011; DUTTA e LEON, 2012; LORA et al., 2013). Segundo estes mesmos autores, nessas condições ocorre a separação parcial de água, de

compostos orgânicos voláteis e de hemiceluloses da biomassa lenhosa, reduzindo o teor de oxigênio do produto sólido final, concentrando os constituintes mais energéticos da biomassa, principalmente a lignina.

De acordo com a literatura, as principais características de interesse energético que a biomassa torrificada apresenta em relação à biomassa “in natura” são:

- Maior valor energético: A torrefação degrada os constituintes menos energéticos da biomassa (principalmente as hemiceluloses) e, conseqüentemente, concentra no produto sólido final os constituintes com maior conteúdo energético, isto é, elimina oxigênio e concentra carbono (BERGMAN ET al., 2005).
- Menor dureza: A torrefação destrói parcialmente a estrutura fibrosa da biomassa, diminuindo sua tenacidade e deixando-a mais friável. Há uma redução do consumo de energia necessária para a moagem da biomassa, além de uma melhor sobreposição e compactação das partículas, aumentando a densidade á granel do material (VAN DER STELT et al., 2011).
- Maior homogeneidade: O material torrificado apresenta propriedades físicas e químicas mais homogêneas, como a distribuição granulométrica, o que possibilita a utilização de diferentes tipos de biomassa lenhosa em um mesmo equipamento de combustão (DUTTA e LEON, 2012).
- Menor umidade: Além de reduzir a quantidade de água da biomassa, a torrefação diminui a higroscopicidade desse material. O tratamento aumenta a concentração de lignina, reduzindo a relação constituintes hidrofílicos/constituintes hidrofóbicos. Assim, reduz-se a capacidade da biomassa em absorver umidade do ambiente (LORA et al., 2013).
- Maior durabilidade: A composição química da biomassa torrificada faz com que ela seja menos atrativa aos microorganismos decompositores, diminuindo a atividade biológica e aumentando a vida útil de armazenamento sem degradação desse combustível (VAN DER STELT et al., 2011).

Essas características colaboram para gerar um produto combustível com maior densidade energética, com maior facilidade de armazenamento e com maior viabilidade para transportes a longas distancias.

Deve se atentar, porém, que o aumento da temperatura e do tempo de torrefação gera um maior decréscimo no balanço em massa (FELFLI, 2003). O limite máximo de temperatura no processo de torrefação deve ser controlado, já que haverá emissão de compostos voláteis mais sensíveis ao aquecimento e degradação de componentes do material, com a perda de massa e de conteúdo energético.

Dentre as principais rotas de consumo da madeira torrificada listadas pela literatura estão o consumo direto para geração de energia na co-combustão com o carvão pulverizado ou a associação com outros tratamentos ou rotas de conversão, como a produção de pellets e a gaseificação, agregando mais valor ao produto final.

A madeira torrificada apresenta uma melhor moabilidade, possibilitando utilizá-la como combustível pulverizado em geradores de vapor de queima de suspensão ou em reatores de gaseificação de leito arrastado (LORA et al., 2013). A produção de combustíveis líquidos pelo processo de FischerTropsch associado com a torrefação também é citado por Van der Stelt et al. (2011). A baixa relação O/C aumenta o balanço durante a gaseificação e o processo libera menos gases devido à redução do teor de materiais voláteis da madeira torrificada (DUTTA e LEON, 2012).

Referindo-se a produção de pellets, Lora et al.(2013) afirmam que o maior teor de lignina e as estruturas fibrosas mais maleáveis facilitam o processo de compactação, além de gerar um produto final mais resistente à água e com maior densidade energética.

O desenvolvimento comercial da torrefação está atualmente ainda em fase inicial. Wilén et al. (2013) descrevem que a maioria das instalações destinadas a torrefação de biomassa ainda é de projetos-pilotos com problemas técnicos que dificultam o domínio comercial do processo. Os reatores utilizados são adaptações dos equipamentos comercialmente utilizados e de tecnologias conhecidas para outras aplicações como secagem, combustão e gaseificação. Esses autores afirmam que o potencial de demanda por biomassa torrificada é muito superior ao que as instalações atuais conseguem produzir.

Na Tabela 1 está descrito as principais técnicas e equipamentos existentes para torrefação de biomassa, além das suas respectivas principais companhias que, reconhecidamente, apresentam algum domínio sobre o desenvolvimento e produção desses reatores (torrefadores). Nota-se que as companhias estão concentradas nos

Estados Unidos e nos países europeus. No Brasil, a torrefação ainda é técnica pouco difundida, ficando restrita a projetos de pesquisa em Universidades e outras instituições correlacionadas.

Tabela 1 - Visão geral das tecnologias de torrefação de biomassa e as principais companhias associadas a cada uma delas

Técnicas (Reatores)	Principais Companhias Fornecedoras
Reator Tambor Rotativo	CDS (Reino Unido), Torr-Coal (Holanda), Bio3D (França), EBERS AG (Áustria), 4 Energy Invest (Bélgica), BioEndev/ETPC (Suécia), Atmosclear S.A. (Suíça)
Reator Parafuso Transportador	BTG (Holanda), Biolake (Holanda), Foxcoal (Holanda), Agri-tech Producers (EUA)
Fornalha Múltipla/Turbo-secador	CMI-NESA (Bélgica), Wyssmont (EUA)
Reator TORBED	Topell (Holanda)
Reator Micro-ondas	Rotavawe (Reino Unido)
Cama de Leito Fluidizado	ECN (Holanda), Thermya (França), Buhler (EUA)
Correia Transportadora	Stramproy Green Investment (Holanda), New Earth Eco Technology (EUA)

Fonte: Adaptado de Kleinschmidt (2011)

3. OBJETIVO

3.1. Objetivo Geral

Avaliar o efeito da temperatura de torrefação nas propriedades energéticas em partículas de madeira de *Eucalyptus urophylla*.

3.2. Objetivos Específicos

- Avaliar o efeito da temperatura na degradação térmica das partículas de madeira durante o processo de torrefação;
- Avaliar o efeito da temperatura de torrefação na composição química, no poder calorífico, na densidade, na higroscopicidade e da distribuição granulométrica das partículas de madeira;
- Avaliar a concentração (densidade) energética em função da temperatura de torrefação;
- Avaliar o balanço em massa e em energia do processo;

4. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi desenvolvido no Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM), vinculado ao Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa (DEF/UFV), localizado no município de Viçosa, MG. As análises termogravimétricas e de composição química elementar foram realizadas no Laboratório de Biomateriais da Universidade Federal de Lavras.

Foram utilizadas partículas de madeira de *Eucalyptus urophylla* com 5,5 anos de idade, provenientes de plantios comerciais da empresa Suzano Energia Renováveis, localizados no estado do Maranhão. As toras, previamente descascadas, foram cavaqueadas e então reduzidas a partículas em um moinho martelo, utilizando peneiras com malhas de quatro milímetros de diâmetro. As partículas foram então secas em estufa com circulação de ar constante a uma temperatura de 100 ± 3 °C até alcançar massa constante.

O experimento consistiu de quatro tratamentos com três repetições cada, sendo T1 partículas de madeira secas em estufas, mas não torrificadas, e T2, T3 E T4 partículas de madeira torrificadas até as temperaturas de 170, 220 e 260 °C, respectivamente.

4.1. Torrefação das Amostras

As partículas de madeira foram tratadas termicamente em um torrefador rotatório (Figura 2) com aquecimento a gás (GLP). O equipamento consistia de um cilindro metálico (0,7 m de comprimento x 0,5 m de diâmetro); um motor elétrico que o girava a uma rotação média de 17 RPM e um sistema de aquecimento por queima de gás (GLP) alimentado por dois botijões de 13 kg ligados em paralelo.

A temperatura foi monitorada através de um termômetro analógico instalado no cilindro e controlada através de um registro regulador da entrada de gás e outro regulador da entrada de ar. Uma cobertura metálica revestida com manta de fibra de vidro foi acoplada sobre o cilindro, tendo como objetivo minimizar as perdas térmicas do processo.

A taxa de aquecimento foi de aproximadamente 5 °C/min, mantendo o material por um período de mais 15 minutos na temperatura final desejada. Decorrido esse tempo, o sistema de aquecimento era desligado e a cobertura metálica retirada, mantendo o cilindro em rotação constante, até o resfriamento do material para temperatura inferior a 50 °C.

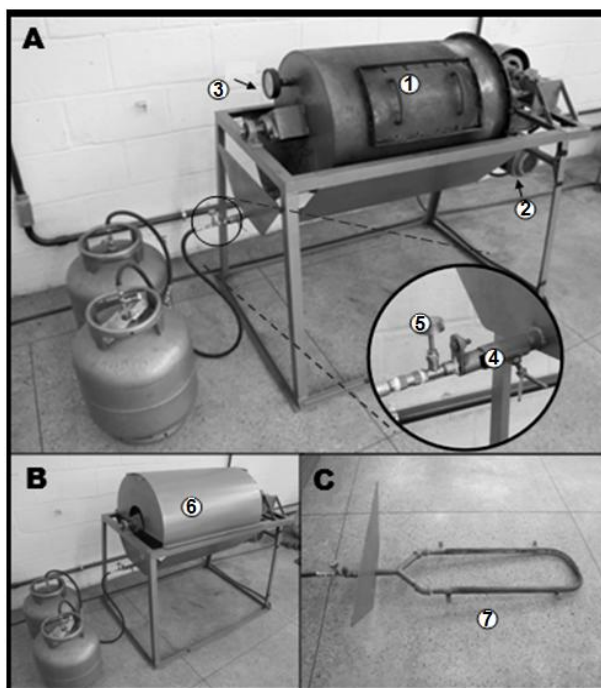


Figura 2 - Equipamento utilizado para torrefação das partículas de madeira de *E. urophylla*
A) Torrefador rotatório B) Cobertura C) Aquecedor. Cilindro (1), motor elétrico (2), termômetro (3), registros controle de ar (4) e de gás (5), cobertura (6) e aquecedor (7).

4.2. Propriedades da Biomassa

4.2.1. Distribuição Granulométrica

As amostras de 1 kg foram separadas pela granulometria em um conjunto de três peneiras metálicas sobrepostas com espessura da malha, partindo da base vedada, de 1, 2 e 4 mm. A distribuição granulométrica, em porcentagem, foi calculada pela massa do material que passou por uma peneira e ficou retida na seguinte, dividindo pela massa inicial da amostra (1 kg) e multiplicando por 100. Obtiveram-se três classes: (i) abaixo de 1 mm; (ii) entre 1 e 2 mm; (iii) entre 2 e 4 mm.

4.2.2. Densidade a Granel

A densidade a granel foi obtida preenchendo um recipiente com volume interno conhecido ($0,001 \text{ m}^3$) com as amostras de partículas de cada tratamento, mantidas nas mesmas condições de umidade ambiente 65%, temperatura de 20° C e com granulometria entre 1 e 2 mm. O cálculo da densidade foi feito dividindo a massa da amostra (kg) pelo volume interno da caixa (m^3), na média de três repetições cada.

4.2.3. Umidade de Equilíbrio Higroscópico

Para a determinação da umidade de equilíbrio higroscópico do material, amostras foram colocadas em uma câmara climática a 20° C e 65 % de umidade relativa até atingir massa constante. A umidade foi calculada em base seca seguindo as normas da ABNT NBR 9484 (1986).

4.2.4. Composição Química Imediata

A composição química imediata foi obtida com amostras moídas, peneiradas em uma granulometria entre 40 e 60 mesh, e secas a 0% de umidade seguindo os procedimentos citados pela ABNT NBR 8112 (1983), com algumas adaptações, para a determinação dos teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo.

O teor de materiais voláteis foi determinado pelo aquecimento das amostras a 950° C , em forno-mufla, dentro de cadinhos tampados por dois minutos junto à porta, para aclimação e, posteriormente, por mais nove minutos no interior do forno fechado. Com a diferença de massa da amostra obtida antes e depois dessa etapa, determinou-se

o teor de materiais voláteis. O teor de cinzas foi determinado após a amostra sofrer combustão completa ao ser aquecida em forno mufla, a 600 °C, durante 6 horas. Com a relação massa de cinzas e massa inicial da amostra obteve-se os teores de cinzas. O teor de carbono fixo foi calculado pela diferença do somatório dos teores de materiais voláteis e cinzas com o total de 100%.

4.2.5. Composição Química Estrutural

A composição química estrutural foi obtida com amostras moídas e peneiradas na granulometria entre 40 e 60 mesh. Os teores de extrativos e de lignina solúvel foram obtidos segundo as normativas da TAPPI (1998) alterando o etanol/benzeno pelo etanol/tolueno. A lignina solúvel foi determinada por espectrometria conforme Santos (2010). O teor de lignina total foi obtido através da soma dos valores de lignina solúvel e insolúvel. O teor de holoceluloses (celulose + hemiceluloses) foi obtido pela diferença entre o somatório dos teores de lignina total e extrativos com o total de 100%.

4.2.6. Composição Química Elementar

Para a análise química elementar, as amostras foram moídas e selecionadas entre as peneiras sobrepostas de 200 e 270 mesh. O equipamento utilizado foi *Vario Micro Cube* CHNS-O aonde as temperaturas chegam até 1200 °C e proporcionam a combustão da serragem. Ocorreram, então, reações químicas gerando gases que, por sua vez, foram conduzidos aos tubos redutores presentes em um compartimento específico. Em seguida, os elementos químicos (carbono, nitrogênio, hidrogênio, enxofre) foram individualizados numa sequência induzida de acordo com a massa molecular de cada um e quantificados a partir de um software específico. O valor de oxigênio foi quantificado pela diferença do somatório do C, N, H e S com o total de 100%.

4.2.7. Degradação Térmica

Para as análises termogravimétricas (TGA), as amostras foram moídas e selecionadas entre as peneiras sobrepostas de 200 e 270 mesh. A caracterização térmica da madeira foi realizada utilizando equipamento DTG-60 da *Shimadzu*. As análises foram realizadas sob atmosfera de gás nitrogênio, com uma vazão constante de 50 ml.min⁻¹. Os termogramas foram obtidos a partir da temperatura ambiente, em torno de

30 °C, até a temperatura máxima de 600 °C, com uma taxa de aquecimento de 10 °C/minuto.

4.2.8. Poder Calorífico Superior

O poder calorífico superior (PCS) do material foi determinado em uma bomba calorimétrica, seguindo as normativas da ABNT NBR 8633 (1984). As amostras de partículas foram moídas em um moinho de facas, selecionadas entre um conjunto de peneiras sobrepostas de 40 e 60 mesh, e posteriormente secas até 0% de umidade.

4.2.9. Densidade Energética

A densidade energética (Kcal/m³) foi estimada multiplicando o conteúdo energético (Kcal/kg) pela densidade (kg/m³) média das amostras de cada tratamento.

Como a densidade utilizada foi a granel, o conteúdo energético considerado foi o poder calorífico útil (PCU), que desconta a energia gasta para evaporar a água presente nas amostras. O PCU foi estimado pelas fórmulas:

$$(i) \text{ PCU} = [\text{PCI}(1 - u)] - (600u)$$

$$(ii) \text{ PCI} = \text{PCS} - [600(9H/100)]$$

Onde: H – Hidrogênio (%); u – Umidade, PCI – Poder Calorífico Inferior (Kcal/kg); A umidade considerada para as amostras foi a média dos valores obtidos nas estimativas da umidade de equilíbrio higroscópico (UEH) para as amostras de madeira submetidas em cada um dos tratamentos

4.3. Balanço em Massa e Energia

O balanço em massa de cada tratamento foi obtido pela média das três repetições. O cálculo foi feito dividindo a massa final (partículas torrificadas) pela massa inicial (partículas de madeira “in natura”) de cada torrefação (repetição) e multiplicando por 100.

$$\text{Balanço em Massa} = \frac{\text{Massa Final} \times 100}{\text{Massa Inicial}}$$

O balanço em energia de cada tratamento foi obtido pela média das três repetições. O cálculo foi feito dividindo o PCS das partículas torrificadas pelo valor médio do PCS obtidos para a madeira “in natura” e multiplicando pelo balanço em massa.

$$\text{Balanço em Energia} = \frac{\text{Balanço em Massa} \times \text{PCS (Final)}}{\text{PCS (Inicial)}}$$

4.4. Delineamento experimental

O experimento consistiu em um Delineamento Inteiramente Casualizado de quatro tratamentos com três repetições cada, sendo:

- T1 partículas de madeira secas, mas não torrificadas;
- T2 partículas de madeira pré-torrificadas até temperatura final de 170 °C.
- T3 partículas de madeira torrificada até temperatura final de 220 °C.
- T4 partículas de madeira torrificada até temperatura final de 260 °C.

Depois de confirmada a normalidade e homogeneidade da variância dos dados de cada análise do tratamento, estes foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e, quando estabelecidas diferenças significativas, os tratamentos foram então comparados entre si, por meio do teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2 é apresentada a distribuição granulométrica das partículas de madeira de *Eucalyptus urophylla* submetidas a diferentes temperaturas de torrefação.

TABELA 2 - Distribuição granulométrica média das partículas de madeira em função do tratamento

Tratamento	Distribuição Granulométrica (%)		
	0 - 1 mm	1 - 2 mm	2 - 4 mm
T1	35,5	37,6	26,9
T2	36,6	40,7	22,7
T3	37,8	41,1	21,0
T4	38,2	41,8	20,0

Observou-se uma homogeneização das dimensões das partículas de madeira com o aumento da temperatura de torrefação. Houve uma redução gradativa da proporção das partículas de maior dimensão (2 – 4 mm) e um aumento da representatividade das partículas menores (0 – 1 mm) e médias (1 – 2 mm) em relação à distribuição granulométrica inicial das amostras não torrificadas (T1).

A redução do tamanho das partículas devido a temperatura de torrefação foi citada por Van der Stelt et al. (2011). Esses autores afirmam que esse tratamento desestabiliza a estrutura fibrosa da biomassa, diminuindo a sua tenacidade, isto é, deixando-a mais friável (frágil, quebradiça) tornando-as mais facilmente reduzida a partículas menores. Bergman et al. (2005) citam que as partículas torrificadas apresentam uma estrutura mais esférica do que a original, causando uma homogeneização das partículas em dimensões menores.

Na Tabela 2 estão apresentados os balanços médios em massa dos tratamentos e seus respectivos valores médios de densidade a granel e umidade de equilíbrio higroscópico.

TABELA 3 – Valores médios de densidade a granel e de umidade de equilíbrio higroscópico (UEH) das amostras de madeira submetidas aos diferentes tratamentos

Tratamento	Densidade a Granel (kg/m³)	UEH (%)
T1	239,1 c	12,27 a
T2	377,8 b	9,22 b
T3	384,6 ab	6,47 c
T4	396,0 a	5,69 d

Médias ao longo das colunas seguidas de mesma letra minúscula não diferem significativamente entre si pelo Teste de Tukey com 5% de significância.

A densidade a granel apresentou resposta positiva ao aumento da temperatura de torrefação com aumento da densidade em 1,6 vezes das amostras do T1 para o T2. Nos tratamentos T3 e T4 também houve aumentos significativos para a densidade. A diminuição da tenacidade, citado por Van der Stelt et al. (2011), e a contração da madeira devido a perda forçada de água durante a torrefação podem explicar o aumento da densidade a granel das partículas, pois as mesmas tornam-se mais uniforme e com dimensões reduzidas apresentando uma ocupação mais completa dos espaços livres. Isso possibilita uma sobreposição mais compactada das partículas na carga, elevando-se, portanto, a densidade a granel.

Observa-se que houve uma redução da umidade de equilíbrio higroscópico das partículas com o aumento da temperatura de torrefação. A madeira “in natura” com média de 12,27% de teor de umidade inicial passou para a média de 5,69% quando submetida à maior temperatura de torrefação (260 °C) do T4. Isso se deve principalmente a redução nos teores de hemiceluloses que são polissacarídeos hidrofílicos por apresentarem grupos hidroxílicos disponíveis para ligação de hidrogênio com moléculas de água. Além disso, deve também a concentração nos teores de lignina, constituinte mais hidrofóbico da madeira que ocasiona a redução da sua higroscopicidade.

Na Tabela 4 são apresentados os valores médios da composição química imediata da madeira em função dos tratamentos.

Tabela 4 - Valores médios de materiais voláteis (MV), carbono fixo (CF) e cinzas (CZ) obtidos para as partículas de madeira submetidas aos diferentes tratamentos

Tratamento	MV (%)	CF (%)	CZ (%)
T1	86,8 a	13,0 d	0,16 a
T2	84,4 b	15,4 c	0,19 a
T3	80,9 c	18,9 b	0,19 a
T4	75,0 d	24,8 a	0,21 a

Médias ao longo das colunas seguidas de mesma letra minúscula não diferem significativamente entre si pelo Teste de Tukey com 5% de significância.

Observou-se que houve uma redução do teor de materiais voláteis com o aumento da temperatura final de torrefação, e conseqüentemente, um aumento no teor de carbono fixo. Os valores encontrados no estudo variaram de 86,8 a 73,1% para materiais voláteis e de 13,0 a 26,7% para carbono fixo, sendo os extremos, respectivamente, madeira “in natura” (T1) e torrificada a 260 °C (T4).

Essa tendência de concentração do carbono fixo em decorrência do aumento temperatura de torrefação está de acordo com diversos autores. Rodrigues (2009) encontrou valores de 19,6% para madeira “in natura” de *Eucalyptus grandis* e valores de 24,7% para madeira torrificada por 60 minutos a 250 °C. Felfli et al (2005), estudando briquetes produzidos com resíduos de madeira torrificada também

verificaram diferenças entre os valores da análise química imediata dos materiais torreficados durante 60 minutos a 220 °C e a 280 °C. O teor de carbono fixo aumentou de 19,0 para 38,2% entre as duas temperaturas finais de tratamento, respectivamente.

O aumento dos teores de carbono fixo é devido à maior intensidade de degradação das hemiceluloses ocorrida nas faixas de temperatura da torrefação, favorecendo a concentração em porcentagem da lignina no material, constituindo este com teores maiores de carbono na composição (VITAL et al., 2013).

Não houve efeito significativo da temperatura de torrefação nos teores de cinzas, permanecendo-os inferiores a 1%, semelhantes com os resultados citados por Pereira (2012) para madeira de *Eucalyptus* sp.

Na Tabela 5 estão apresentados os valores médios da composição química estrutural das partículas de madeira em função do tratamento.

Tabela 5 - Valores médios de holoceluloses (celulose + hemiceluloses), lignina e extrativos das partículas de madeira em função do tratamento

Tratamento	Holoceluloses (%)	Lignina (%)	Extrativos (%)
T1	62,3 a	32,7 c	4,97 b
T2	61,5 a	34,0 c	4,50 b
T3	50,7 b	41,2 b	8,15 a
T4	42,6 c	52,2 a	5,19 b

Médias ao longo das colunas seguidas de mesma letra minúscula não diferem significativamente entre si pelo Teste de Tukey com 5% de significância.

Observa-se que houve uma redução dos teores de holoceluloses e um consequente aumento dos teores de lignina com o aumento da temperatura de torrefação. Os tratamentos T1 e T2 não diferiram significativamente entre si, possivelmente porque até 170 °C a degradação térmica é baixa, ocorrendo apenas a secagem da madeira. As partículas submetidas ao tratamento T4 apresentaram o maior teor de lignina (52,2%), seguido pelas do tratamento T3 (32,7%).

A redução dos teores das holoceluloses é devida, principalmente, a degradação das hemiceluloses. Os dois tratamentos com maiores temperaturas finais (T4 e T3, respectivamente) estão situados na faixa de degradação preferencial das hemiceluloses,

que segundo Carneiro et al. (2013) está entre 200 e 260 °C. Citado por Pereira (2012), a perda de massa mais significativa de celulose só ocorre em temperaturas superiores a 300 °C, ou seja, acima da temperatura que se considera o limite máximo da torrefação.

Extrativos são os ditos constituintes não estruturais ou secundários da madeira. Enquanto os seus teores permaneceram próximos a 5% nas partículas do T1, T2 e T4, o que chama atenção é o pico de 8,15% do tratamento T3. Uma hipótese que poderia explicar essa diferença está na degradação dos outros constituintes da madeira, principalmente das hemiceluloses, durante a torrefação. Possivelmente, na quantificação dos extrativos presentes nas partículas submetidas ao tratamento T3 (220 °C), foram também contabilizados os resíduos advindos da degradação parcial das hemiceluloses. Os resíduos ou subprodutos da degradação desse constituinte podem apresentar constituições um pouco similares a dos extrativos, sendo assim erroneamente contabilizado pela análise em questão. Nas partículas submetidas ao T4 (260 °C), no entanto, esses “novos extrativos” foram degradados de maneira mais efetiva e intensa, por isso a redução nos seus teores. O tipo de análise utilizado, portanto, se comprovada essa teoria, não é seletivo o suficiente para separar os extrativos dos resíduos da degradação térmica dos outros constituintes.

Na Tabela 6 estão apresentados os valores médios da composição química elementar das partículas de madeira em função dos tratamentos.

Tabela 6 - Valores médios, em porcentagem, de Carbono, Oxigênio, Hidrogênio e Nitrogênio encontrados na composição elementar das amostras de cada tratamento

Tratamento	Carbono	Oxigênio	Hidrogênio	Nitrogênio
T1	47,4 c	45,2 a	6,11 a	1,30 a
T2	47,7 c	45,2 a	5,76 b	1,36 a
T3	50,4 b	42,7 b	5,58 b	1,37 a
T4	54,1 a	39,0 c	5,44 c	1,40 a

Médias ao longo das colunas seguidas de mesma letra minúscula não diferem significativamente entre si pelo Teste de Tukey com 5% de significância.

Os teores de oxigênio elementar reduziram significativamente em função do aumento da temperatura final do processo de tratamento térmico, aumentando assim, os teores de carbono. A relação C/O aumentou de 1,05 das partículas de madeira “in natura” para 1,39 das partículas torrificadas a 260 °C.

A redução dos teores de hemiceluloses, com a consequente concentração dos teores de lignina, explicam esses resultados. Esses valores influenciarão diretamente no poder calorífico das amostras de madeira, já que o carbono é um dos elementos que mais contribui em energia durante a combustão, enquanto o oxigênio tem efeito negativo, retirando energia do sistema.

Felfli et al. (2005) trabalhando com torrefação de resíduos de madeira para briquetagem encontrou valores de 49,4 % de carbono e 40,2% de oxigênio para a madeira ao natural e 55,8% de carbono e 29,8% de oxigênio para madeira torrificada durante uma hora a 250 °C. Apesar das diferenças encontradas no presente estudo, devido às propriedades inerentes a cada madeira utilizada, ressalta-se que as mudanças da composição química elementar devido ao aumento de temperatura seguiram as mesmas tendências nos dois estudos.

Os teores de hidrogênio também reduziram com o aumento da temperatura de torrefação. Já os teores de nitrogênio não foram influenciados pelos tratamentos.

Na Figura 3 são apresentadas as curvas termogravimétricas (TGA e DTG) das partículas de madeira submetidas a cada um dos tratamentos. Na Tabela 7 são apresentadas as perdas de massa, em porcentagem, das amostras submetidas aos tratamentos em função das faixas de temperatura durante a Análise Termogravimétrica.

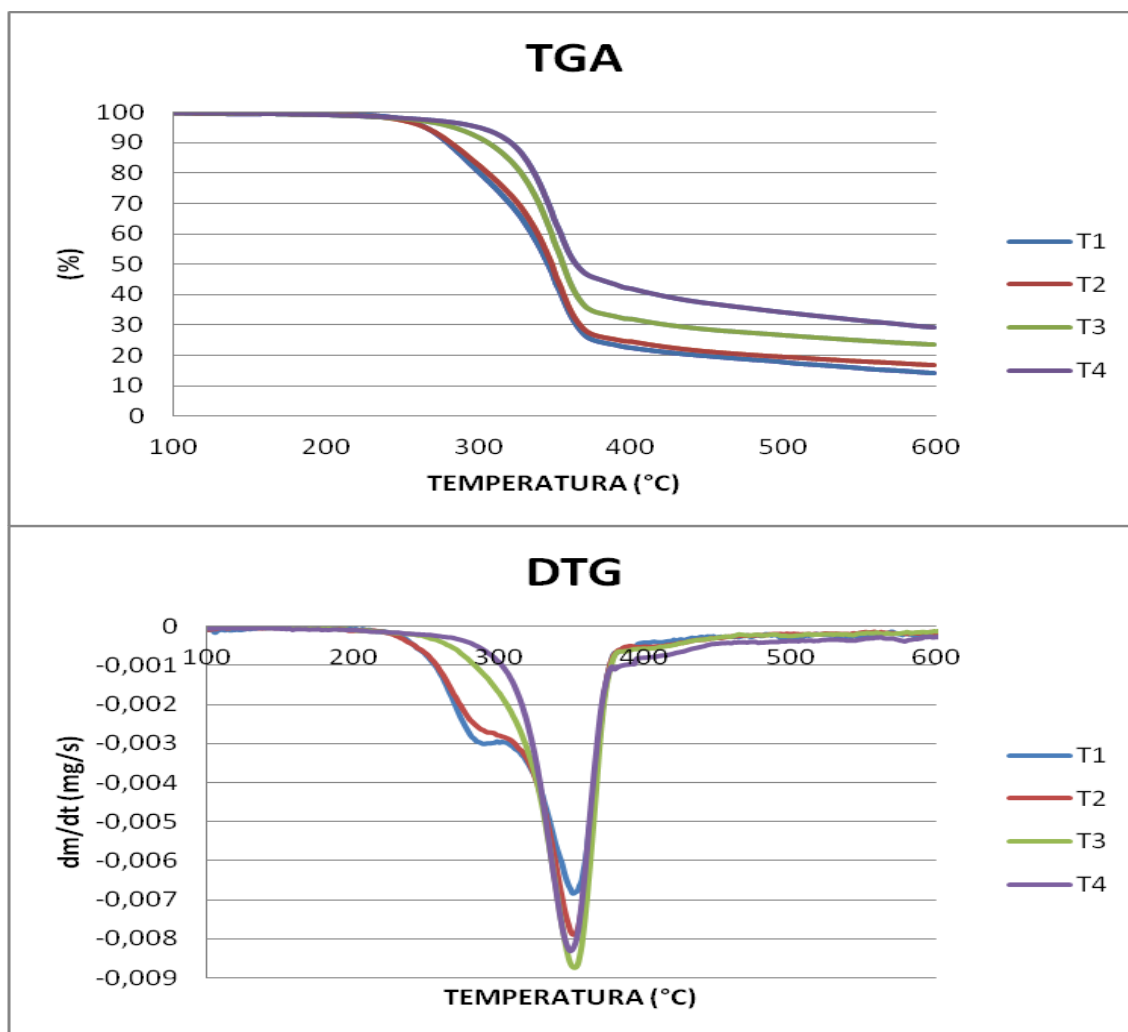


FIGURA 3 - Curvas de TGA e DTG das partículas de madeira submetidas a cada um dos tratamentos. Atmosfera de nitrogênio, taxa de aquecimento 10 °C/min e amostras com 0% de umidade.

TABELA 7 - Perda percentual de massa das amostras de cada tratamento em função das faixas de temperatura durante a Análise Termogravimétrica (TGA)

Trat.	Faixas de Temperatura (°C)							MR
	100-150	150-200	200-250	250-300	300-350	350-400	400-450	
T1	0,39	0,00	1,91	17,57	36,57	21,19	2,72	19,64
T2	0,24	0,36	1,95	14,97	36,71	21,35	3,28	21,15
T3	0,27	0,45	1,26	6,27	35,73	24,03	3,47	28,52
T4	0,24	0,47	1,04	3,12	31,55	21,54	4,78	37,27

MR: Massa Residual após 450 °C das amostras iniciais com 0% de umidade.

Verifica-se na curva do TGA que as partículas de madeira “in natura” (T1) apresentaram uma maior degradação térmica que as partículas submetidas aos tratamentos térmicos, evidenciando a sua menor estabilidade térmica com relação ao material torreficado. As partículas torreficadas a 260 °C (T4) foram as que apresentaram a menor perda percentual de massa e a partir de temperaturas mais altas, sendo que a degradação ocorreu em etapa única e concentrada próxima aos 350 °C.

Nota-se na curva do DTG que as partículas do T1 foram degradadas em uma faixa ampla de temperatura, entre 250 e 400 °C, enquanto as partículas do T4 foram degradadas de maneira mais intensa e concentrada próxima à temperatura de 350 °C. Verifica-se nesse gráfico, que as partículas torreficadas a 220 °C (T3) e, principalmente, as torreficadas a 260 °C (T4) não possuem perda de massa similar ao material “in natura” e ao pré-torreficado a 170 °C que apresentaram um primeiro pico entre 250 e 300 °C. Essa faixa é a caracterizada pela degradação das hemiceluloses, ou seja, possivelmente o aumento da temperatura de torrefação aumentou a degradação desses constituintes da madeira. As partículas do T4 apresentam teores muito baixos de hemiceluloses quando comparadas com as de madeira “in natura” (T1).

Em consequência da degradação das hemiceluloses em função da temperatura, os teores de celulose e lignina aumentam em proporção nas partículas torreficadas. A degradação das partículas do tratamento T4, em etapa única na curva do TGA e mais intensa na curva do DTG, próxima a 350 °C em ambas as curvas, confirma que esse material apresenta um maior de celulose. Pereira (2012), avaliando de maneira isolada a degradação térmica de cada constituinte da madeira de *Eucalyptus* sp., constatou que a degradação da celulose ocorre mais concentrada próxima a temperatura de 350 °C, na qual as partículas torreficadas também apresentaram maior e mais concentrada perda de massa. Com isso, verifica-se que o aumento da temperatura torrefação concentra os teores de celulose em decorrência da degradação das hemiceluloses.

Na Tabela 7, observa-se em números percentuais que as perdas de massa das partículas torreficadas ocorrem de maneira mais significativa a partir dos 300 °C, não apresentando perda em uma faixa de temperatura tão ampla quanto a apresentada pelas partículas “in natura”. Essa diferença entre os tratamentos colabora com o que foi dito sobre a temperatura de torrefação degradar intensamente as hemiceluloses, mas ser insuficiente para causar perdas significativas de massa de celulose e lignina.

Tanto na curva do TGA quanto na Tabela 7, nota-se que acima de 450 °C, as partículas do T4 apresentaram uma porcentagem de massa residual duas vezes maiores que as partículas do T1 (“in natura”). Essa faixa de temperatura é a usualmente utilizada na fase final na produção de carvão vegetal. Oliveira (2012) cita que a lignina é o constituinte que mais colabora com o balanço em carvão, devido à maior porcentagem de massa residual em decorrência a sua estabilidade térmica. Assim, os maiores valores residuais acima de 450 °C apresentados pelas partículas torrificadas no tratamento T4 confirmam as proposições feitas de que estas apresentavam um maior teor de lignina em relação às partículas de madeira “in natura” ou torrificadas em temperaturas mais baixas.

Com a análise da degradação térmica, verifica-se que as partículas torrificadas apresentam uma constituição química estrutural mais homogênea, sendo dividida basicamente em celulose e lignina. Além da concentração dos constituintes mais energéticos, o aumento da temperatura de torrefação resulta em um material sólido final com características químicas e térmicas mais semelhantes entre si. Essa homogeneização facilita o controle e uso do material para os fins que se destinam.

Na tabela 8 estão resumidos os valores energéticos de cada tratamento.

Tabela 8 - Valores médios de poder calorífico superiores (PCS) e de densidade energética das amostras submetidas em cada um dos tratamentos.

Tratamento	PCS (kcal/kg)	Densidade Energética (Mcal/m³)
T1	4465,0 d	882 d
T2	4570,1 c	1440 c
T3	4772,7 b	1593 b
T4	4945,0 a	1727 a

Médias ao longo das colunas seguidas de mesma letra minúscula não diferem significativamente entre si pelo Teste de Tukey com 5% de significância.

O poder calorífico das partículas apresentou um aumento proporcional com a temperatura final de torrefação. Os valores médios obtidos apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos, havendo um aumento gradativo do T1 até o T4, de 4464 para 4945 kcal/kg, respectivamente. Rodrigues (2009) encontrou uma variação de

4674 kcal/kg para peças de madeira de *Eucalyptus* sp. “in natura” e 5121 kcal/kg para peças torrificadas a 250 °C. Os valores são superiores aos encontrados no presente estudo, possivelmente, devido às propriedades energéticas da própria madeira utilizada, além das dimensões do material utilizado.

O aumento do poder calorífico com o aumento da temperatura de torrefação se deve a concentração nos teores de carbono fixo, de carbono elementar e de lignina no material final. Isso mostra que a torrefação concentrou no produto sólido final os constituintes mais energéticos da madeira de origem.

A densidade energética aumentou significativamente com o aumento da temperatura de torrefação, duplicando o valor inicial da madeira “in natura” de 882 para 1727 Mcal/m³. Esse aumento era esperado já que o aumento do PCS, o aumento da densidade a granel e a redução da umidade de equilíbrio influenciam diretamente no aumento da densidade energética.

Na Tabela 9 estão os balanços de massa e de energia de cada tratamento.

Tabela 9 - Balanço médio em Massa e em Energia de cada temperatura de torrefação.

Tratamento	Balanço (%)	
	Massa	Energia
T1	100,0 a	100,0 a
T2	96,8 b	99,0 a
T3	89,1 c	95,2 b
T4	75,7 d	83,9 c

Médias ao longo das colunas seguidas de mesma letra minúscula não diferem significativamente entre si pelo Teste de Tukey com 5% de significância.

Observaram-se diferenças significativas no balanço em massa, havendo uma redução em decorrência do aumento de temperatura. O menor valor médio foi obtido na temperatura de torrefação de 260 °C (T4) com 75,7%. Esse valor é superior aos 70% citados por Dutta e Leon (2012) como sendo o comum para torrefação de biomassa e aos 62% encontrados por Macêdo (2012) para *Eucalyptus* sp. Possivelmente, essas diferenças sejam devidas a maior temperatura final do tratamento ou a menor granulometria da biomassa utilizada, respectivamente.

Rodrigues (2009) obteve balanços superiores a 80%, sendo que a possível explicação para essa diferença é o fato desse autor utilizar peças de madeira com dimensões de 4x2x8 cm, sendo estes menos facilmente degradados pela ação da temperatura de torrefação quando comparados as partículas de madeira utilizadas no presente estudo.

O balanço em energia, como esperado, reduziu em função do aumento da temperatura. Não houve diferença significativa entre tratamentos T1 e T2, já que o balanço em massa, uma das variáveis no cálculo do balanço energético, também não diferiu. Os tratamentos T3 e T4 apresentaram valores inferiores, devido às perdas de massas mais significativas.

O balanço médio de 83,9% obtido pelo tratamento T4 foi inferior aos 90% citados por Dutta e Leon (2012) como sendo o valor esperado para a torrefação entre as temperaturas de 250 e 300 °C. A diferença pode ser devida as características inerentes a própria biomassa avaliadas por esses autores, como talvez um maior teor inicial de lignina, ou diferenças na própria taxa de aquecimento. Salienta-se o balanço em energia de materiais sólidos da torrefação sugeridos por Bergman *et al.* (2005) está situado na faixa de 80 a 95%, logo o valor obtido no presente estudo é pode ser considerado satisfatório.

6. CONCLUSÕES

- De um modo geral, o aumento de temperatura de torrefação tem resposta positiva nas propriedades energéticas da madeira.
- Quanto maior a temperatura de torrefação maior a homogeneidade do produto torreficado, principalmente, quanto a granulometria e as propriedades energéticas.
- As partículas de madeira torreficada têm a sua degradação térmica concentrada entre 300 e 400 °C, sendo mais intensa próxima a temperatura de 350° C.
- O aumento da temperatura de tratamento concentra os teores de carbono elementar, com a conseqüente redução dos teores de oxigênio. Concentra o teor de lignina em relação ao teor de holoceluloses. Concentra o teor de carbono fixo em relação ao teor materiais voláteis.
- O aumento da temperatura causa uma redução da higroscopicidade das partículas de madeira e aumento no poder calorífico, na densidade a granel e energética.
- O balanço em energia é superior ao balanço em massa para a torrefação, ou seja, os constituintes menos energéticos são degradados preferencialmente.
- As partículas torreficadas a 260 °C apresentaram as melhores características energéticas, com balanços nos limites aceitáveis, sendo, portanto, o material que apresenta a maior competitividade dentro mercado energético.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS – ABRAF. Anuário estatístico da ABRAF 2013 - ano base 2012. **ABRAF**. Brasília, DF. 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 8112**: Carvão Vegetal – Análise Imediata. Rio de Janeiro. 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 8633**: carvão vegetal: determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 9484**: Compensado – Determinação do teor de umidade. Rio de Janeiro. 1986.

BERGMAN, P.C.A.; BOERSMA, A.R.; KIEL, J.H.A.; PRINS, M.J.; PTASINSKI, K.J.; JANSSEN, F.J.J.G. Torrefaction for entrained-flow gasification of biomass. **ECN**. Petten, Holanda. 2005.

BRASIL. Balanço Energético Nacional 2013 – Ano base 2012. **Ministério de Minas e Energia**. Produzido por EPE – Empresa de Pesquisa Energética. 284 p. Brasília, Distrito Federal. 2013.

BRITO, J.O. Energia da Madeira. In: **Bioenergia & Biorrefinaria - Cana-de-açúcar & Espécies Florestais**". Editores: SANTOS, F.; COLODETTE, J.; QUEIROZ, J.H. Viçosa, MG. 2013. Pág 271 – 298

CARNEIRO, A.C.O.; SANTOS, R.C.; OLIVEIRA, A.C.; PEREIRA, B.L.C. Conversão direta da madeira em calor e energia. In: **Bioenergia & Biorrefinaria - Cana-de-**

açúcar & Espécies Florestais''. Editores: SANTOS, F.; COLODETTE, J.; QUEIROZ, J.H. Viçosa, MG. 2013. Pág 355 – 378.

CASTRO, A.F.N.M. **Efeito da idade e de materiais genéticos de *eucalyptus* sp. na madeira e carvão vegetal**. 2011. 97 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG, 2011.

COUTO, L. Produção de florestas energéticas. In: **Bioenergia & Biorrefinaria - Cana-de-açúcar & Espécies Florestais''**. Editores: SANTOS, F.; COLODETTE, J.; QUEIROZ, J.H. Viçosa, MG. 2013. Pág 297 – 320.

DUTTA, A.; LEON, M.A. **Pros and cons of torrefactino of Woody biomass**. 2012. University of Guelph. Disponível em < http://www.agrireseau.qc.ca/references/32/presentations_guelph/2torrefaction%20-%20Pros%20and%20Cons%20by%20Mathias%20Leon%20UoG.pdf> Acesso em agosto de 2013.

FELFLI, F.E.F. **Torrefação de biomassa, viabilidade técnica e potencial de mercado**. 2003. 137 f. Tese (Doutorado em Planejamento de Sistemas Energéticos) Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, Campinas – SP, 2003.

FELFLI, F.E.F.; LUENGO, C.A.; SUÁREZ, J.A.; BEATÓN, P.A. Wood briquette torrefaction. **Energy for Sustainable Developmet**. Volume IX. N° 3. Berkeley, CA, EUA. 2005.

HÉMERY, D.; DEBEIR, J.C.; DELÉAGE, J.P. Uma história da energia. **Editora Universidade de Brasília**. Brasília, DF, 1993. 448 f.

IEA BIOENERGY TASK 40. **Large Industrial Users of Energy Biomass**. 2013. Disponível em < <http://www.bioenergytrade.org/downloads/t40-large-industrial-biomass-users.pdf>> Acesso em Outubro de 2013.

KLEINSCHMIDT, C.P. Overview of international developments in torrefaction. **IEA Bioenergy Torrefaction**. Graz, Áustria. 2011.

LORA, E.E.S.; VENTURINI, O.J.; ANDRADE, R.V. Torrefação de madeira. In: **Bioenergia & Biorrefinaria - Cana-de-açúcar & Espécies Florestais''**. Editores: SANTOS, F.; COLODETTE, J.; QUEIROZ, J.H. Viçosa, MG. 2013. Pág 401 – 427.

MACÊDO, L.A. **Influência da composição da biomassa no balanço em condensáveis do processo de torrefação**. 2012. 60 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais). Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, Brasília -. DF, 2012.

OLIVEIRA, A.C. **Sistema forno-fornalha para produção de carvão vegetal**. 2012. 64 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 2012.

PEREIRA, B.L.C. **Qualidade da madeira de *Eucalyptus* para produção de carvão vegetal**. 2012. 105 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 2012.

PETROBRÁS. **Biocombustíveis – O que você precisa saber sobre esse novo mercado**. 2ª Edição. 2007. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/quem-somos/perfil/atividades/producao-biocombustiveis/downloads/pdf/Cartilha-Biocombustiveis-PORTUGUES.pdf>> Acesso em agosto de 2013.

RODRIGUES, T.O. **Efeitos da torrefação no condicionamento de biomassa para fins energéticos**. 2009. 71 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

ROWELL, R.M.; S. LEVAN-GREEN,. **Thermal properties**. In: **Hand book of wood chemistry and wood composites**. ROWELL, R.M. (Ed.). p.121-138. Boca Raton: CRC Press, 2005.

SANTOS, R.C. **Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de Eucalipto**. 2010. 159 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras – MG, 2010.

TAPPI TECHNICAL DIVISIONS AND COMMITTEES. **TAPPI test methods**. Atlanta, 1998. 46 p.

TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; MENDES, L. M. Influência da idade nas características físico-químicas e anatômicas da madeira de *Eucalyptus saligna*. **Revista Cerne**. Lavras, MG. 1996.

VAN DER STELT, M.J.C.; GERHAUSER, H.; KIEL, J.H.A.; PTASINSKI, K.J. Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: A review. **Biomass and bioenergy**. 2011. Disponível em < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953411003473>> Acesso em Agosto de 2012.

VITAL, B.R.; CARNEIRO, A.C.O.; PEREIRA, B.L.C. Qualidade da madeira para fins energéticos. In: **Bioenergia & Biorrefinaria - Cana-de-açúcar & Espécies Florestais**". Editores: SANTOS, F.; COLODETTE, J.; QUEIROZ, J.H. Viçosa, MG. 2013. Pág 321 – 354.

WILÉN, C.; JUKOLA, P.; JÄRVINEN, T.; SIPILÄ, K.; VERHOEFF, F.; KIEL, J. Wood torrefaction – pilot tests and utilization prospects. **VTT TECHNOLOGY 122**. Espoo, Finlândia. 2013.