



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

JOSÉ ANTONIO NARDIN BATISTA

**TORREFAÇÃO DO *PINUS ELLIOTTII* PARA FINS
ENERGÉTICOS**

Itapeva – SP
2015

JOSÉ ANTONIO NARDIN BATISTA

**TORREFAÇÃO DO *PINUS ELLIOTTII* PARA FINS
ENERGÉTICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado na Universidade Estadual Paulista “Julho de Mesquita Filho” – Câmpus Experimental de Itapeva, como requisito para a conclusão do curso de Engenharia Industrial Madeireira.

Orientador: Prof. Dr. José Cláudio Caraschi

Itapeva – SP
2015

B333t Batista, José Antonio Nardin
Torrefação do *Pinus elliottii* para fins energéticos / José Antonio Nardin Batista. – – Itapeva, SP, 2015
54 f.: il.

Trabalho de conclusão de curso (bacharelado – Engenharia Industrial Madeireira) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus Experimental de Itapeva, 2015

Orientador: José Claudio Caraschi

Banca examinadora: Rafael dos Santos, Dorival Pinheiro Garcia

Bibliografia

1. Energia – Fontes alternativas. 2. Carbonização. 3. Pirolise. I. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus Experimental de Itapeva. II. Título


CDD 621.042

JOSÉ ANTONIO NARDIN BATISTA

TORREFAÇÃO DO *Pinus elliottii* PARA FINS ENERGÉTICOS.

Trabalho de Conclusão de Curso para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Industrial Madeireira, da Universidade Estadual Paulista - UNESP - Campus Experimental de Itapeva.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: 

Prof. Dr. José Claudio Caraschi
Universidade Estadual Paulista - UNESP - Campus Experimental de Itapeva.

2º Examinador: 

Prof. Me. Rafael dos Santos
Universidade Estadual Paulista - UNESP – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá.

3º Examinador: 

Prof. Me. Dcival Pinheiro Garcia
Universidade Estadual Paulista - UNESP – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá.

Itapeva, 13 de novembro de 2015.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Campus Experimental de Itapeva

AGRADECIMENTOS

Em especial a minha mãe Maria Estela Papini Nardin e as minhas irmãs Mariana Nardin Batista e Marília Nardin Batista por todo apoio e carinho nesses 22 anos de minha existência. Ao meu pai Amauri Cesar Batista que sempre será um exemplo em minha vida. E a toda minha família que sempre esteve presente ao meu lado

Ao Prof. Dr. José Cláudio Caraschi pela grande ajuda e orientação durante esse trabalho. Ao Juscelino de Jesus Pereira Melo técnico do Laboratório de Análise Instrumental da UNESP de Itapeva. E a todos os professores, técnicos, funcionários e colegas da UNESP - Câmpus Experimental de Itapeva, que contribuíram para minha formação nesses 5 anos.

Aos meus colegas e irmãos da república Motosserra que foram minha família durante essa etapa. Sem eles minha graduação não seria completa.

RESUMO

A crescente demanda por energia fez com que a utilização de combustíveis fósseis fosse explorada de maneira radical, o que contribuiu para uma crise ambiental. A biomassa de madeira se mostra uma alternativa aos combustíveis fósseis, uma vez que é uma fonte de energia renovável e as indústrias produtoras e beneficiadoras de produtos madeireiros geram grande quantidade de resíduo. O beneficiamento desse resíduo por meio da torrefação e outros processos geram um produto com maior valor agregado e renda extra, além de melhorar as características térmicas e energéticas o que aumenta a eficiência dessa biomassa. Nesse estudo abordamos o efeito da torrefação em diversas temperaturas e tempos nas propriedades energéticas da madeira de *Pinus Elliottii*, e constatamos que o material torrefeito tem maior poder calorífico e menor teor de umidade que a madeira *in natura*. O material torreficado a 275°C durante 60 min apresentou metade do teor de umidade e 17% a mais de energia por unidade de massa que a madeira *in natura* e rendeu em massa 68%, se mostrando o melhor tratamento. Desse modo é possível afirmar que a torrefação gera um combustível mais eficiente que a madeira *in natura* e rende mais que o processo de carbonização.

Palavras-chave: Rendimento energético; Carbonização; Pirólise.

ABSTRACT

The growing demand for energy caused the use of fossil fuels were exploited in a radical way, contributing to an environmental crisis. Biomass wood shown an alternative to fossil fuels, as it is a renewable source of energy and manufacturing industry and hulling of wood products generate large amounts of waste. The processing of this waste through the roasting and other processes generate a product with higher added value and extra income in addition to improving the thermal and energy characteristics which increases the efficiency of this biomass. In this study we discuss the effect of roasting at different temperatures and times in the energetic properties of *Pinus Elliottii*, and noticed that by the torrefeito material has higher calorific value and lower moisture content than wood in nature. The torrificado material to 275oC for 60 I had half the moisture content to 17% more energy per unit mass than wood in natura and earned massive 68%, showing the best treatment. Thus it is clear that roasting creates a more fuel efficient than the wood raw and earns more than the carbonization process.

Keywords: Energy efficiency; Carbonization; Pyrolysis.

SUMÁRIO

1	Introdução	7
1.1	Objetivos	8
2	Revisão bibliográfica	9
2.1	Propriedades da Madeira	9
2.1.1	Umidade.....	9
2.1.2	Densidade.....	9
2.1.3	Constituição química.....	10
2.1.4	Propriedades energéticas e combustão.....	14
2.2	Formas de utilização da madeira como combustível.....	18
2.3	Processo de torrefação	23
2.3.1	Vantagem e aplicações.....	24
2.3.2	Plantas industriais.....	26
3	Materiais e método	28
3.1	Preparação da matéria-prima.....	28
3.1.1	Densidade básica da madeira <i>in natura</i>	28
3.2	Processo de torrefação	29
3.2.1	Rendimento gravimétrico	29
3.3	Ensaio de absorção de umidade.....	30
3.3.1	Ensaio de absorção de umidade em estufa climatizada ..	30
3.3.2	Ensaio de absorção de umidade ao ar livre	30
3.4	Análise energética	31
3.4.1	Poder calorífico	31
3.4.2	Rendimento energético	32
3.5	Análise imediata.....	33
3.5.1	Teor de materiais voláteis	33

3.5.2 Teor de cinzas	33
3.5.3 Teor de carbono fixo	34
4 Resultados e discussão	35
4.1 Densidade básica da madeira <i>in natura</i>	35
4.2 Material torreficado	36
4.2.1 Rendimento gravimétrico	37
4.3 Absorção de umidade	39
4.3.1 Absorção de úmida em estufa climatizada.....	39
4.3.2 Absorção de úmida ao ar livre	42
4.4 Análise energética	43
4.4.1 Poder calorífico	43
4.4.2 Rendimento energético	47
4.5 Análise imediata	49
5 Conclusão	51
Referências bibliográficas	53

1 INTRODUÇÃO

Por muito tempo a madeira foi a principal fonte de combustível, devido a sua fácil obtenção e conversão em energia térmica. Entretanto a madeira apresenta algumas características que a tornam um combustível não muito eficiente, como alta higroscopicidade, baixa densidade energética e emissão de poluentes particulados e gasoso. Com o aumento da demanda por energia os combustíveis fósseis se tornaram mais atraentes.

O principal problema do combustível fóssil é a poluição que é gerada. Em qualquer combustão incompleta á sempre a formação de dióxido de carbono (CO_2), e água (H_2O), outros componentes são também podem ser formados, como os óxidos de nitrogênio (NO_x), óxidos de enxofre (SO_x), monóxido de oxigênio (CO), sólidos (cinzas e material particulado) e etc. Quando se queima a madeira o CO_2 produzido é consumido através da fotossíntese pela próxima árvore que cresce. Quando se queima combustível fóssil não há o consumo imediato do CO_2 formado, o que aumenta a concentração desse gás na atmosfera e causa o chamado efeito estufa. Como já está provado que o efeito estufa está causando muitos danos ao meio ambiente medidas para diminuir sua emissão estão sendo tomadas, o que faz com que a madeira, um combustível renovável, se torne novamente atraente.

O Brasil é um grande produtor de madeira, segundo a Sociedade Brasileira de Florestas (2006) o Brasil produziu em 2005 110,6 milhões de m^3 de madeira na forma de toras. Entretanto desde a colheita até a industrialização a madeira gera grande quantidade de resíduo. Uma serraria, que faz o desdobro inicial da tora, rende cerca de 50%. Durante a colheita, galhos, raízes, cepo e etc. quase não são aproveitados e são deixados no campo. Quando aproveitados esses resíduos são simplesmente queimado em fornalhas de baixa eficiência e sem passar por nenhum tipo de beneficiamento ou tratamento (como a torrefação e a gaseificação, por exemplo) antes de serem convertido em calor.

Desse modo a pesquisa no desenvolvimento de técnicas que aproveitem melhor esse resíduo se mostra necessária e justificada. Já existem inúmeras formas de aproveitar a biomassa de madeira para combustível, a torrefação é uma delas que ainda está em desenvolvimento.

1.1 Objetivos

Este trabalho tem por objetivo principal avaliar as condições do processo de torrefação da madeira de *Pinus elliotti* para fins energéticos.

Os objetivos específicos são:

- Avaliar o processo de torrefação em diferentes temperaturas e tempos.
- Caracterizar o material torreficado quanto as suas propriedades químicas e físicas para fins energéticos.
- Determinar a melhor condição de torrefação para fins energéticos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Propriedades da Madeira

2.1.1 Umidade

A madeira possui três tipos de água: capilar, higroscópica e de constituição. Imediatamente ao ser colhida muito da água capilar é liberada. Após ser desdobrada em serrarias, a madeira passa pelo processo de secagem ao ar ou em estufa, onde se inicia a retirada da água higroscópica. Wengert (2005) diz que por ser constituída por células porosas a evaporação da água higroscópica ocorre até que se seja atingido um equilíbrio entre a atmosfera e a madeira, este equilíbrio é chamado de umidade de equilíbrio da madeira. Simpson (1971) estudou 9 modelos matemáticos que permitem a determinação da umidade de equilíbrio da madeira em função da umidade relativa do ar, temperatura ambiente e espécie de madeira. Sendo assim esses parâmetros definem qual será o teor de umidade da madeira em uma determinada condição climática.

Em resumo a madeira é higroscópica (absorve umidade), a água higroscópica é eliminada e absorvida de acordo com as condições climáticas. A umidade de equilíbrio pode ser determinada expondo-se amostras de madeira secas ao ambiente e determinando o seu teor de umidade ao longo do tempo.

O teor de umidade é importante para a utilização da madeira como combustível, pois a água presente na mesma rouba energia durante a combustão para evaporar, portanto quanto menor a umidade de equilíbrio da madeira maior será a eficiência da sua combustão.

A água de constituição não é água propriamente dita, ela é resultado da combustão do elemento hidrogênio presente na madeira quando aquecida.

2.1.2 Densidade

Densidade é a relação entre massa e volume. Para a madeira existem dois conceitos de densidade, densidade básica e densidade aparente.

A densidade básica da madeira é a relação entre a massa seca e o volume saturado. Este é um importante indicador da madeira, pois é uma relação que influencia as outras propriedades. Já a densidade aparente é a relação entre a massa úmida e o volume, e dependente do teor de umidade e da forma e granulometria da amostra de madeira.

A densidade básica nos fornece informações sobre a espécie, genética e idade de corte por exemplo. Utilizada como uma forma de caracterização da madeira.

A densidade aparente mostra a massa contida em determinado volume em uma determinada umidade, propriedade muito utilizado para dimensionar silos e calcular frete por exemplo.

A densidade é um fator importante para a utilização da madeira como combustível, pois baixa densidade significa menor densidade energética. Quanto menor a densidade energética maior o volume requerido pela fornalha e maior custo no transporte uma vez que é necessário mais viagens para suprir a energia demanda. O alto custo no transporte e a heterogeneidade inviabilizam o comercia da biomassa de madeira a longas distancias, o que dificulta a ampliação do seu uso. Alto volume da fornalha representa maior custo de instalação e maior perda térmica o que diminui seu rendimento e competitividade.

2.1.3 Constituição química

A madeira pode ser analisada quimicamente de várias formas. Quanto aos elementos químicos, substâncias químicas e análise imediata.

A madeira é constituída por muitos componentes químicos. São cinco os componentes que formam a composição geral da madeira: holocelulose (celulose e hemiceluloses), lignina, extrativos orgânicos, constituintes inorgânicos (cinzas) (SEDEROFF; CHAN, 1991).

Substancias químicas

- Celulose

A celulose é um polissacarídeo $((C_6H_{10}O_5)_n)$ de cadeia não-ramificada parcialmente cristalina formada por monômeros de glicose $(C_6H_{12}O_6)$, alto grau de polimerização e insolúveis em solventes orgânicos, água, ácidos e álcalis diluídos. Seu isolamento puro é difícil devido a estar associada as hemiceluloses e a lignina É obtida principalmente da madeira e tem diversas aplicações como a produção de papel, papelão, polpa para dissolução e outros. (LIN; DANCE, 1992).

- Hemiceluloses

As hemiceluloses são polissacarídeos de estrutura ramificada, amorfa e de baixa massa molar, constituída por diferentes açúcares e ácidos como: D-glucose, D-manose, D-galactose, D-glucose, D-xilose, L-rabionose, L-fucose, ácido 4-O-metilglucurônico, ácido D-galacturônico e ácido D-glucurônico. São mais higroscópicas que os outros componentes e facilmente hidrolisadas por ácidos (SEDEROFF; CHANG, 1991).

- Ligninas

A lignina é uma macromolécula aromática, heterogênea, ramificada, amorfa e de alta massa molar. A composição da lignina depende da espécie de madeira e é diferenciada pelas suas unidades aromáticas que são a guaiacila, siringila e *p*-hidroxifenila. Nas coníferas há maior ocorrência de guaiacila, já as folhosas são compostas tanto por guaiacila como por siringila (LIN; DENCE, 1992; SEDEROFF; CHANG, 1991).

- Extrativos

Os principais tipos de extrativos são os terpenóides e esteróides, gorduras, ceras e substâncias fenólicas como taninos (SJÖSTRÖM 1992). Eles afetam as propriedades organolépticas e sua função na madeira é proteção a ferimentos e reserva energética, por isso são encontrados em maior concentração nas cascas.

O *Pinus elliottii* possui uma grande quantidade de extrativos sendo realizada a resinagem para se obter goma-resina que tem várias aplicações industriais.

- Constituintes inorgânicos

Os constituintes inorgânicos são chamados de cinzas (todo resíduo sólido após a combustão) e sua porcentagem na madeira é baixa (0,3 a 0,7%). Formados por minerais que são agregados ao vegetal ao longo de seu crescimento ou por contaminação durante o transporte e colheita. São constituídos por Na, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu e Si (BRAND, 2007).

Constituição elementar.

A constituição elementar mostra a porcentagem em massa dos elementos químicos. A Tabela 1 mostra a constituição elementar de algumas espécies de madeira e dos seus constituintes.

Tabela 1: Constituição elementar da madeira e seus constituintes.

Componente	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	S (%)
<i>E. globulos</i>	48,2	5,92	44,2	0,39	0,01
<i>E. grandis</i>	48,3	5,89	45,1	0,15	0,01
<i>E. camaldulensis</i>	49,0	5,87	44,0	0,30	0,01
<i>Pinus</i> sp	51,9	6,16	41,7	0,12	0,03
Casca madeira	52,3	6,00	40,0	0,20	-
Celulose	41,8	6,2	52,0	-	-
Hemiceluloses	41,3	5,9	52,8	-	-
Lignina	59,4	5,7	34,9	-	-

Fonte: KITANE; HALL, 1989/PEREIRA, 2012 - Adaptada.

Como se pode notar a madeira é constituída de aproximadamente 6% de hidrogênio, elemento que durante a combustão forma a água de constituição.

A Tabela 2 mostra uma comparação entre a constituição elementar de diversos combustíveis.

Tabela 2: Constituição elementar de alguns combustíveis.

Combustível	C (%)	H (%)	O (%)	S (%)	N (%)	Inorgânico (%)
Óleo diesel	86,0	13,1	-	0,9	-	-
Querosene	85,6	14,3	-	0,1	-	-
Carvão mineral	52,3	3,7	9,6	0,5	0,9	32,5
Carvão vegetal	74,5	3,0	17,0	0,5	1,0	4,0
Madeira	50,2	6,3	43,1	-	0,06	0,38

Fonte: CETEC, 1988

A quantidade de enxofre (S) presente na madeira é muito baixa ao contrário dos combustíveis fósseis, esta é uma das vantagens da madeira, pois o enxofre causa problemas de corrosão nos equipamentos industriais e gera

óxidos de enxofre (SO_x) que são os poluentes atmosféricos causadores da chuva ácida. (BRAND, 2007; RICHARDSON et al., 2002).

Análise Imediata

A análise imediata é realizada para determinar o teor de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo. É um importante indicador da qualidade da biomassa e seu ensaio é normatizado pela norma ABNT NBR 8112/86.

- Materiais voláteis

Segundo Brame e King (1942) durante a combustão os materiais voláteis eliminam gases que queimam na forma de chama. A chama faz com que unidades de calor se difundam em um espaço bastante amplo da região de queima, não permitindo a obtenção de altas intensidades de calor em pontos específicos. Smith (1976) relata que combustíveis com alto teor de voláteis são mais fáceis e rapidamente queimados.

- Cinzas

Como já mencionado as cinzas são os constituintes inorgânicos. Altamente indesejados no combustível, pois segundo Garcia (2010) quanto maior a quantidade de cinzas maior a quantidade de resíduo formado após a combustão e maior a manutenção requerida. Além deste fato o contato deste resíduo com as partes metálicas causam corrosão o que diminui a vida útil do queimador utilizado (RICHARDSON et al., 2002).

- Carbono fixo

Quando aquecida a madeira se degrada, o primeiro constituinte a ser eliminado é a água na forma de vapor seguido pelo material volátil na forma gasosa. O carbono fixo se mantém na forma sólida e é quem gera maior quantidade de calor e durante mais tempo, pois quando entra em combustão o calor gerado se concentra em um ponto fixo e não espalhado como a chama. Quanto maior a quantidade de materiais voláteis menor a quantidade de carbono fixo.

O carbono fixo é um importante parâmetro para a indústria siderúrgica, pois o carbono remove o oxigênio do óxido de ferro III (Fe_2O_3 – hematita, principal minério de ferro utilizado) e forma o ferro-gusa (liga de ferro com até 5% de carbono) que é a matéria-prima para a produção do ferro liga e do aço. Antes de ser utilizado nos altos-fornos das siderúrgicas o carvão

vegetal deve passar pelo processo de coqueação, o que faz aumentar ainda mais o seu conteúdo de carbono fixo como podemos observar na Tabela 3.

Tabela 3: Propriedades do carvão e do coque para as siderurgias.

Propriedades	Coque	Carvão vegetal	Carvão vegetal preferencial	Carvão mineral
Carbono fixo (%)	88	70-80	75-80	41
Materiais voláteis (%)	1,0	25-35	Máx. 25	19
Umidade (%)	1-2	1-6	Máx. 4	1,0
Cinzas (%)	10-12	0,5-4	Máx. 1	40
Enxofre (%)	0,45-0,7	0,03-0,1	Máx. 0,03	0,5
Resistência a compressão (kg cm ⁻²)	130-160	10-80	Min. 30	-
Faixa granulométrica (mm)	25-75	9-100	40 -50	-
Densidade (kg m ⁻³)	550	180-350	Min. 250	-

Fonte: Santos, 2008 – adaptada.

2.1.4 Propriedades energéticas e combustão

A combustão é uma reação de oxidação exotérmica, autossustentável com liberação de luz, calor e gases. A combustão ocorre quando os três componentes necessários (combustível, comburente e ignição) encontram-se nas seguintes condições:

- Disponibilidade de combustível e comburente: A quantidade de comburente necessária depende da quantidade de combustível presente. Normalmente utiliza-se mais oxigênio do que a estequiometria da reação pede, isso garante a combustão completa, entretanto valores excessivos prejudicam o rendimento energético.
- Contato entre combustível e comburente: quanto maior a superfície de contato dos dois melhor se dará a reação. Combustíveis na forma de pó ou aumento da turbulência do comburente aumentam a superfície de contato.
- Ignição: deve-se atingir a temperatura de ignição para que a reação se torne exotérmica e seja autossustentável.

Uma vez atingido os requisitos acima mencionado a combustão da biomassa passa por três etapas: evaporação da água, queima dos compostos voláteis e queima do carbono fixo. Em processos industriais as três etapas ocorrem de maneira simultânea, pois a fornalha é constantemente alimentada (CARNEIRO et al.,2013).

A energia liberada por unidade de massa durante a combustão é chamada de poder calorífico. Para a biomassa encontram-se três valores de poder calorífico: poder calorífico superior (PCS), inferior (PCI) e líquido (PCL). Esses três valores são devido a presença de água na biomassa.

O PCS é obtido em bomba calorimétrica e é o maior valor de poder calorífico, nele não se desconsidera a evaporação das águas presente na biomassa. Existem vários estudos de regressões lineares que permitem calcular o PCS a partir de informações como a análise elementar, análise imediata e composição química (teor de lignina, celulose, etc.).

Segundo Brito (1993), o PCI considera somente a evaporação da água de constituição, proveniente da combustão dos hidrogênios da biomassa e não considera o teor de umidade. Como mostrado a madeira e constituída de aproximadamente 6% de hidrogênio, sendo assim o PCI pode ser facilmente calculado descontando a água que se forma devido a 6% de hidrogênio. O PCL também conhecido como poder calorífico útil (PCU), considera a perda de energia para evaporar a água de constituição e a umidade presente na biomassa. O PCL retrata de maneira mais realista a energia liberada pela biomassa, sendo que quanto menor a umidade maior será a energia possível de utilizar industrialmente.

A Tabela 4 mostra o PCS e PCI do pinus, eucalipto e de alguns dos seus constituintes.

Tabela 4: Poder calorífico superior e inferior do pinus e eucalipto e seus constituintes.

Biomassa	PCS (MJ kg⁻¹)	*PCI (MJ kg⁻¹)
<i>E. grandis</i>	19,35	17,99
<i>Pinus sp</i>	20,21	18,85
Celulose	17,76	16,40
Lignina**	20,57	19,22
Casca	20,50	19,14

Fonte: Kitani; Hall 1989/ Monteiro et al - adaptado - *PCI calculado considerando 6% de H

**obtido do licor negro precipitado com ácido sulfúrico.

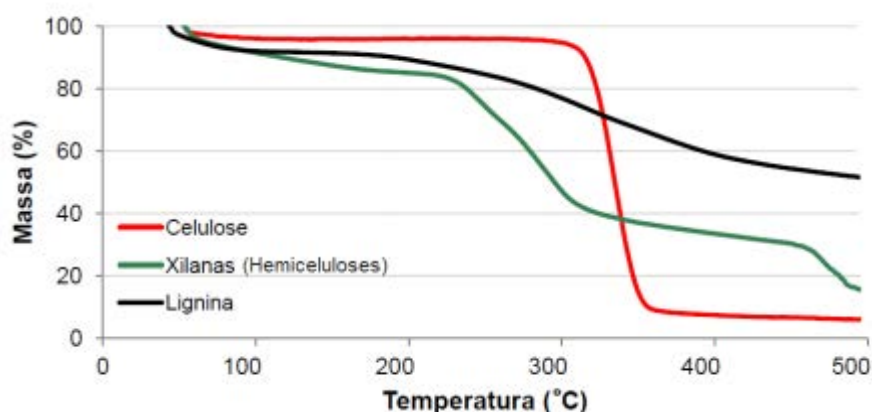
A Tabela 5 mostra como a umidade influencia o poder calorífico líquido da madeira de *Pinus sp*, tomada como exemplo.

Tabela 5: Influência do teor de umidade no poder calorífico do *Pinus sp*.

Teor de umidade base úmida (%)	PCL (kJ kg⁻¹)	%
0 – PCI	17990	100
15	14915	82,91
20	13890	77,21
25	12864	71,51
30	11839	65,81
40	9789	54,41
50	7739	43,02

Quando aquecida os constituintes da madeira sofrem degradação. A análise termogravimétrica (TG) monitora a variação de massa durante o aquecimento da madeira e com ela podemos determinar qual a temperatura em que os constituintes da madeira iniciam e terminam a sua degradação (CARNEIRO et al., 2013). A Figura 1 mostra a curva TG dos principais constituintes da madeira.

Figura 1: Curva termogravimétrica (TG) dos principais constituintes da madeira.



Fonte: Pereira, 2012

Nota-se pela Figura 1 que as hemiceluloses são os compostos mais sensível a temperatura iniciando sua degradação á 200°C e a partir de 300°C resta somente metade da quantidade inicial. Durante a torrefação espera-se uma alta remoção das hemiceluloses, devido a essa instabilidade. O fato de ela gerar o caráter hidrofílico da madeira e quando aquecida ser a principal formadora de materiais voláteis é que torna sua remoção desejável.

A celulose apresenta maior estabilidade térmica que as hemiceluloses, sendo praticamente toda a partir de 350°C, a torrefação não gera grande degradação da celulose pois ocorre entre 200 e 300°C.

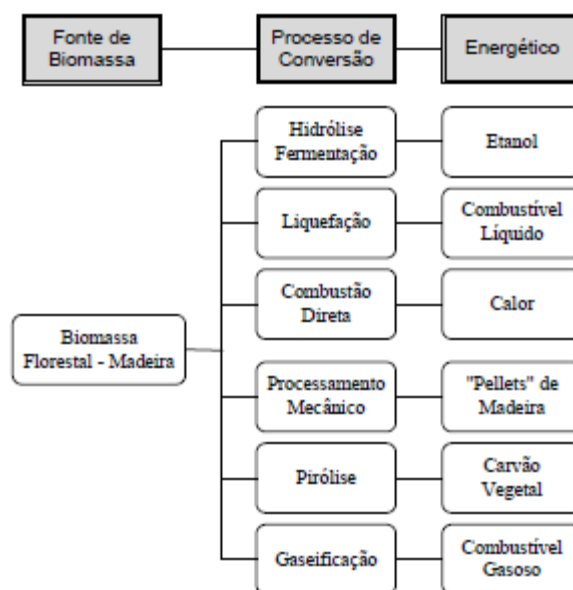
A lignina apresenta a maior estabilidade térmica entre os componentes da madeira. Nota-se uma degradação pouco acentuada a partir de 250°C e a 500°C ainda resta 50% da quantidade inicial.

Essa estabilidade térmica da lignina gera a possibilidade de pelletização do material torrefeito, uma vez que a lignina atua como aglomerante durante a pelletização.

2.2 Formas de utilização da madeira como combustível

A madeira pode ser utilizada como combustível, porém apresenta alguns inconvenientes como baixo poder calorífico e densidade energética, alto teor de umidade e emissão de fumaças e poluição. Várias formas de transformação da biomassa em energia foram desenvolvidas para aumentar a sua competitividade como combustível, a Figura 2 mostra algumas formas utilizadas.

Figura 2: Formas de conversão da biomassa em energia.



Fonte: GARCIA, 2010.

- Combustão direta

A combustão direta da madeira é uma das formas mais utilizadas, porém, como já dito, apresenta alguns inconvenientes como baixo rendimento e emissão de poluentes. Para a combustão ocorrer a quantidade de água não deve ser maior que 50% em massa, pois em valores acima deste já se faz necessário a suplementação com óleo combustível. A umidade presente incorpora-se aos produtos da combustão na forma de vapor de água e aumenta o volume dos produtos da combustão, a potência do exaustor e a quantidade de monóxido de carbono (CO) no gás de exaustão (CARNEIRO et al., 2013).

Para que a combustão ocorra de forma eficiente a relação ar:combustível deve ser maior que a estabelecida pela estequiometria da combustão, isso garante que a combustão seja completa o que aumenta a

eficiência térmica e baixos níveis de CO e fuligem (material particulado) nos gases da combustão. É possível determinar valores para esse coeficiente de excesso de ar bem como para o volume dos gases da combustão e a temperatura de chama em função da análise elementar do combustível.

As fornalhas são dispositivos projetados para assegurar a queima completa dos combustíveis de modo eficiente como citado acima (MAGALHÃES, 2007). As fornalhas dependem do tipo de combustível utilizado e a quantidade de calor que deve ser liberado num intervalo de tempo e devem possuir sistema de alimentação contínua, aberturas para regulagem da entrada de ar e sistema para remoção de cinzas (CARNEIRO et al., 2013).

Um queimador de biomassa muito utilizado é o queimador pirolítico que é compacto, de simples manuseio e pode ser adaptado a diversas situações. Este queimador é muito utilizado para substituir queimadores a óleo diesel, GLP e outros combustíveis fósseis.

- Processamento mecânico

Os principais produtos do processamento mecânico da biomassa são os *pellets* e briquetes, que são utilizados na combustão direta. A diferença entre o *pellets* e o briquete é a sua dimensão, os *pellets* são cilíndricos com diâmetro de 4 a 10 mm por até 40 mm de comprimento, os briquetes são cilindros de 70 a 100 mm por 400 mm de comprimento. Eles têm por objetivo aumentar a densidade e a densidade energética da biomassa, além de padronizar sua granulometria o que facilita o transporte e a automação dos alimentadores da fornalha.

Sua produção consiste na diminuição da granulometria da madeira através de moinhos (0,5 a 1 cm), secagem (teor de umidade base úmida de 8 a 15%), pelletização ou briquetagem e resfriamento. O atrito gerado durante a prensagem gera calor superior a 120°C o que reorganiza a lignina da madeira e a torna um aglomerante natural, dispensando a utilização de aditivos (GARCIA, 2010).

A competitividade dos *pellets* no Brasil ainda é baixa devido ao alto custo de fabricação, Os *pellets* no Brasil são comercializados entre 400 e 650 R\$/t em quanto que na Europa o preço varia entre 300 e 500 R\$/t dependendo do câmbio (GARCIA, 2014). Entretanto como o Brasil é um grande produtor de

resíduos de biomassa com investimento e desenvolvimento desse processo será possível alcançar os países desenvolvidos.

- Gaseificação

A gaseificação da madeira consiste na transformação de um combustível sólido em gás, que pode ser utilizado em motores a combustão interna e para substituir o gás natural e o GLP além da possibilidade de se produzir gasolina e diesel pelo processo denominado síntese Fischer Tropsch. Foi muito utilizado durante a Segunda Guerra em veículos devido a baixa disponibilidade de combustíveis fósseis (ANDRADE; LORA, 2013).

Os tipos de gaseificadores mais utilizados são os de leito fixo, leito fluidizado e de leito arrastado. Os gases formados são chamados de gás pobre devido ao seu baixo poder calorífico (5 MJ Nm^{-3}) e devem ser limpos pois contém impurezas como partículas sólidas, alcatrão, metais alcalinos, ácido clorídrico e compostos sulfurosos (ANDRADE; LORA, 2013).

- Pirólise lenta (carbonização)

A pirólise lenta total, também conhecida por carbonização, tem por objetivo a produção do carvão vegetal. O Brasil é o único país que produz carvão vegetal em larga escala mesmo que utilizando processos empíricos e rudimentares. O principal consumidor é o mercado interno onde 72% se destina a produção de ferro-gusa (um terço da produção nacional), 12% para produção de ferro-liga (metade da produção nacional) e o restante se destina para a utilização residencial (cocção e aquecimento) e muito pouco para outros fins industriais (cimento, química, alimentícia e cerâmicas) (MME – BEM, 2015).

A pirólise consiste no aquecimento da madeira na ausência de oxigênio (ar) a temperaturas entre 350 e 500°C e seu objetivo é aumentar o teor de carbono fixo por meio da eliminação dos hidrogênios e oxigênios presentes na madeira e conseqüentemente diminuir a quantidade de materiais voláteis. Os constituintes mais degradados são os extrativos e as hemiceluloses, seguidos pela celulose e por último a lignina. Essa degradação emite poluentes que faz com que a carbonização seja mal vista ambientalmente, entretanto processos modernos recuperam e utilizam esses poluentes que podem ser divididos em três grupos: materiais particulados,

compostos orgânicos condensáveis (COC) e gases não-condensáveis (GNC) (PEREIRA, 2012).

São consideradas duas as variáveis que afetam o processo e a qualidade do carvão: temperatura e taxa de aquecimento. A temperatura influencia diretamente o rendimento gravimétrico, o teor de carbono fixo e os gases gerados, quanto mais elevada a temperatura menor o rendimento e maior o teor de carbono fixo. Temperaturas entre 200 e 280°C geram compostos oxigenados (CO, CO₂, álcoois como metanol e ácidos), temperaturas acima de 280°C geram compostos GNC hidrogenados (hidrocarbonetos e H₂). A taxa de aquecimento (velocidade de elevação da temperatura) afeta o rendimento gravimétrico e a resistência mecânica, altas taxas de aquecimento diminuem o rendimento e aumentam a friabilidade devido a reações mais intensas. A taxa de aquecimento é a principal diferença entre a pirólise lenta e a pirólise rápida (CARNEIRO et al., 2013).

Existem vários tipos de fornos para realizar a carbonização, elencaremos alguns a seguir (CARNEIRO et al., 2013):

- Forno “rabo quente” – baixo custo; alta poluição; 7 dias de processo (3 dia para carbonizar, 3 dias para esfriar e 1 dia para carregar e descarregar); rendimento entre 20 e 28%.
- Forno de superfície – similar ao rabo quente; chaminé com tiragem dos gases; rendimento entre 28 e 34%.
- Forno MF1-UFV – desenvolvido pela Universidade Federal de Viçosa (UFV) em parceria com ArcelorMittal BioFlorestas; capacidade para 10 mts; aproveitamento dos gases da carbonização; rendimento entre 29 e 30%; diminuição da emissão de CH₄ em 94 % e de CO em 97%
- Forno circular com queimador – desenvolvido pela UFV em parceria com a Associação das Siderúrgicas para Fomento Florestal e a Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais; capacidade de 12 mst; 6 dias de processo; aproveitamento dos gases da carbonização (baixa poluição); rendimento de 32%.
- Forno retangular – capacidade para 700 mst; 13 dias de processo; rendimento entre 30 e 35%.

Como mencionado o carvão vegetal é muito utilizado para a siderurgia, devido ao alto teor de carbono fixo. Essa necessidade de material rico em carbono fixo faz com que o baixo rendimento gravimétrico da carbonização seja aceitável. Já para torrefação, que visa a produção energética, baixo rendimento gravimétrico significa perda de material e menor rendimento energético, o que tornaria o processo insustentável.

- Pirólise rápida (bio-óleo)

A pirólise rápida consiste no aquecimento da biomassa a temperaturas entre 300 e 600°C em um ambiente inerte e por rápido período (2 a 3 segundos). O rendimento varia entre 50 e 75 % e o produto resultante é um óleo líquido cor de café escuro, mais denso que água, com forte cheiro de fumaça e que possui poder calorífico próximo ao da madeira. O bio-óleo é composto por várias substâncias complexa e de difícil determinação. Produtos ricos em oxigênio, de alta e baixa massa molar estão presentes em sua constituição. Possui diversas aplicações como a utilização em motores a combustão interna, caldeira e fornos. Podem ser utilizados na fabricação de produtos químicos como surfactantes glicosídicos e agroquímicos (fertilizantes e corretivos de solo). O “fumo líquido”, presente no bio-óleo, é utilizado na defumação artificial de carnes, sendo o produto comercial mais importante do bio-óleo (BERG et al., 2013).

Por estar em fase de estudo é pouco utilizado e sua produção apesar de ser um conceito simples é de difícil execução em nível industrial.

2.3 Processo de torrefação

A torrefação (pirólise suave) é um tratamento da biomassa a temperaturas entre 200 e 300°C na ausência de oxigênio e seu objetivo é aumentar o poder calorífico e tornar a biomassa mais hidrofóbica (BERGMAN et al., 2004; PRINS et al., 2006; BERGMAN, 2005).

A torrefação tem por objetivo render grande quantidade de massa, tornar a biomassa mais higroscópica e com maior poder calorífico.

Durante a torrefação as hemiceluloses sofrem grande degradação devido ao fato de ser a substância mais sensível a temperatura presente na madeira. Em seguida ocorre a degradação da celulose e por último a lignina que apresenta maior estabilidade quando aquecida. Essas degradações formam compostos condensáveis (COC) e não condensáveis (GNC), como na carbonização porém em menor quantidade.

O aumento do poder calorífico é explicado pelo aumento do teor de carbono fixo. O aumento da resistência a absorção de água é causado pela destruição dos grupos hidroxilas e formação de estruturas fibrosas insaturadas apolares (BERGMAN et al., 2005).

Os principais parâmetros que influenciam no processo de torrefação são: temperatura, taxa de aquecimento, teor de oxigênio, tempo de residência e tipo de matéria-prima.

A torrefação é muito similar a carbonização. O que difere a carbonização da torrefação são dois fatores principais: rendimento gravimétrico e, teor de carbono fixo. O rendimento gravimétrico da carbonização não é superior a 40% e o teor de carbono fixo do carvão é superior a 70%. Na torrefação espera-se rendimento gravimétrico superior a 60 % e teor de carbono fixo próximos de 40%.

Além de suas propriedades suas aplicações são distintas. O carvão é muito utilizado como fonte de carbono nas siderúrgicas e no preparo de alimentos na brasa, já o material torreficado produz chama quando queimado e pode ser utilizado como combustível para aquecimento residencial e comercial ou para geração de calor em indústrias.

2.3.1 Vantagem e aplicações

Podemos dizer que a biomassa torrificada tem a finalidade de substituir a biomassa *in natura* por ser um produto semelhante, porém com melhores características. Sua comercialização pode ser para aquecimento industrial, residencial ou comercial. O material torrificado pode ser transformado em energia das seguintes formas:

- Combustão direta

A biomassa torrificada, por ser de fácil moagem, atinge a granulometria desejada com menor consumo de energia, isso possibilita sua utilização como combustível pulverizado em fornalhas de leito fluidizado junto com o carvão mineral para geração de energia em processos industriais (ANDRADE et al., 2013).

- Processamento mecânico

Como dito os *pellets* tem o objetivo de aumentar a densidade da biomassa. Já se encontra *pellets* de carvão, contudo devido as altas temperaturas da carbonização a lignina (que atua como aglomerante na pelletização) sofre alterações o que dificulta e aumenta a potência requerida pela pelletizadora. O material torrificado conserva as propriedades da lignina e possui poder calorífico maior que a madeira, o que torna o *pellet* torrefeito mais competitivo que os *pellets* comuns e os *pellets* de carvão. A Tabela 6 mostra uma comparação entre esses combustíveis.

Tabela 6: Comparação entre diferentes tipos de *pellet*, madeira e carvão vegetal.

Parâmetros	Madeira	<i>Pellets</i> de madeira	<i>Pellets</i> de madeira torrefeita	Carvão vegetal
Teor de umidade (%)	30-40	7-10	1-5	1-5
Poder calorífico (MJ kg ⁻¹)	9-12	15-16	20-24	30-32
Materiais voláteis (%)	70-75	70-75	55-65	10-12
Carbono fixo (%)	20-25	20-25	28-35	85-87
Densidade (kg m ⁻³)	200-250	550-750	750-850	~200
Densidade energética (MJ m ⁻³)	2,0-3,0	7,5-10,4	15,0-18,7	6,0-6,4

Fonte: Kleinschmidt, 2011

Por ser mais limpo e emitir menos fumaça que a biomassa, os *pellets* torreficados são um grande atrativo para a geração de calor residencial e comercial. Com o aumento da energia elétrica e os contras de se utilizar gás (risco de explosão, custo, problemas ambientais), os *pellets* comuns e os *pellets* torreficados podem ganhar espaço no mercado de combustível para aquecimento.

- Gaseificação

Prins et al. (2006) e Basu (2010) afirmam que a relação O/C da biomassa diminui devido a torrefação, o que aumenta a eficiência da gaseificação produzindo gases com maior poder calorífico e menor teor de impurezas. Entretanto, devido a retirada dos materiais voláteis durante a torrefação, o rendimento da gaseificação com o material torrefeito é menor que o rendimento da gaseificação com madeira *in natura*.

Podemos dizer que a biomassa torreficada tem a finalidade de substituir a biomassa *in natura* por ser um produto semelhante, porém com melhores características. Sua comercialização pode ser para aquecimento industrial, residencial ou comercial.

2.3.2 Plantas industriais

O processo de torrefação exige equipamentos que possam controlar a temperatura, o tempo e a concentração de oxigênio de maneira rigorosa, pois caso contrário o rendimento gravimétrico diminui e o resultado seria um material mal torrefeado ou carvão. Este fato torna a torrefação uma tecnologia em desenvolvimento, sendo encontradas somente plantas piloto.

O Quadro 1 mostra um resumo dos principais reatores para torrefação e seus fabricantes para torrefação.

Quadro 1: Tipos e fabricantes de reatores para torrefação.

Técnicas (Reatores)	Principais Companhias Fornecedoras
Reator de 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-tec Producer (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 Technology (EUA)

Fonte: Keinschmidt, 2011.

O Quadro 2 mostra as principais unidades que já estão realizando a torrefação.

Quadro 2: Empresas produtoras de biomassa torrificada.

Empresa	Tecnologia	Data de implementação	Capacidade (t/h)
Toor-cal	Toor-cal	2010/11	4,5
4Energy	Stramproy	2012/11	5,5
Torssys	Torssys	2011/12	5,0
EBES	ACB	2012	1,5
Integro	Wyssmont	2010/11	2,0
Konza	Konza	2012	10,0
Tpell	Torped	2011	8,0
ETPC	BioEndev	2013	4,5
BTG	BTG	2014	5,0
Foxcoal	Foxcoal	2011/12	4,2
Biolake	ECN	2011	5,0
Agritech	Torre-tech	2011	5,0
RFT	RFT	2012	5,0
Stramproy	Stramproy	2010/11	5,5
New Earth	ECO-PYRO	2012	2,0
ECN	BO2	2012	5,0
IDEMA	Thermya	2011	2,5
Atmosclear	Airless	2011	5,0
Diacarbon	Diacarbon	2014	8,0
CanBiocoal	Rotawave	2011	12
C2SKY		2011	5,0
WPAC	TBA	2012	5,0

Fonte: Dutta, 2014.

Como vemos no Quadro 2 a maior produtora é a CanBiocoal com capacidade de 12 t h^{-1} (aproximadamente 30 mil toneladas por ano). Segundo Kiel (2011) a torrefação em escala industrial (60 a 100 mil toneladas por ano) será alcançada em 2016.

3 MATERIAIS E MÉTODO

A matéria-prima utilizada foi a madeira de *Pinus elliottii* na forma de sarrafos cedidos por uma empresa do setor madeireiro.

A matéria-prima e os produtos da torrefação foram analisados no laboratório de Análise Instrumental do Câmpus Experimental da Unesp de Itapeva.

3.1 Preparação da matéria-prima

Para os ensaios de caracterização e para o processo de torrefação foram confeccionados corpos de prova em serra circular nas dimensões média de 39,52 X 17,80 X 22,65 mm e foram eliminados os defeitos como nó, grã reversa, bolsão de resina e etc.

Posteriormente os corpos de prova foram enumerados para identificação e secos em estufa a $103\pm 2^{\circ}\text{C}$, até se obter massa constante.

3.1.1 Densidade básica da madeira *in natura*

A densidade básica (DB) é a relação entre a massa seca e o volume saturado. Ela foi determinada segundo o método da balança hidrostática.

Os corpos de prova foram colocados em um recipiente com água. Após a saturação, os corpos de prova foram pesados imersos em água (massa hidrostática), normalmente (massa saturada) e secos, após serem secos em estufa a $103\pm 2^{\circ}\text{C}$. A densidade básica foi calculada pela Equação 01:

$$DB = \frac{Ms}{Msat - Mi} \times 1000 \quad [01]$$

Onde:

DB = densidade básica, em kg m^{-3}

Ms = massa da madeira seca, em g

$Msat$ = massa da madeira saturada em água, em g

Mi = massa da madeira imersa em água, em g

3.2 Processo de torrefação

As variáveis estudadas no processo de torrefação foram o tempo e a temperatura. Foram realizados ensaios em nove temperaturas: 150, 200, 225, 250, 275, 300, 350, 400, 450°C, e em dois tempos de residência (torrefação): 30 e 60 min. Os ensaios realizados nas temperaturas de 350, 400 e 450°C produzem carvão e são para comparações.

O reator de torrefação utilizado foi um cadinho de porcelana com tampa e enrolado em papel alumínio para evitar a entrada de oxigênio. A fonte de aquecimento foi um forno tipo mufla.

O material livre de umidade (seco) foi pesado e posto dentro do cadinho de porcelana. Em seguida, colocou-se os cadinhos de porcelana em um forno mufla pré-aquecida a 100°C. Aqueceu-se por 15 min até atingir a temperatura de torrefação. Após atingir a temperatura desejada, deixou-se os cadinhos no forno por 30 min. Repetiu-se o mesmo processo para o tempo de torrefação de 60 min.

Ao final de cada tempo, os cadinhos eram retirados e colocados para esfriar em dessecador.

3.2.1 Rendimento gravimétrico

O rendimento gravimétrico (RG) um parâmetro que mostra o quanto de massa se conservou após a torrefação, e é o que determina o balanço de massa da torrefação.

O RG do processo de torrefação foi determinado pela Equação 02:

$$RG = \frac{Mt}{Ms} \times 100 \quad [02]$$

Onde:

RG = Rendimento gravimétrico, em %

Mt = massa de madeira torrefeita, em g

Ms = massa da madeira seca, em g

3.3 Ensaio de absorção de umidade

Uma das principais vantagens do material torrefeito é a resistência a absorção de umidade. Para realizar esse estudo foram propostos dois ensaios de absorção de umidade: estufa climatizada e ao ar livre.

Com a massa seca após a torrefação e a massa umidade após o ensaio foi calculado o teor de umidade em base úmida (TU_u) conforme a Equação 03:

$$TU_u = \frac{Mu - Ms}{Mu} \times 100 \quad [03]$$

Onde:

TU_u = teor de umidade em base úmida, em %

Ms = massa seca, em g

Mu = massa úmida, em g

3.3.1 Ensaio de absorção de umidade em estufa climatizada

Seis corpos de prova de cada tempo e temperatura de torrefação e carbonização foram colocados em uma estufa climatizada a 80% de umidade relativa do ar e 25°C. Após 24, 48 e 72 horas foram calculados a absorção de umidade (teor de umidade base úmida) de cada corpo de prova.

O ensaio teve por objetivo analisar a absorção de umidade em uma situação crítica, como um longo período chuvoso.

3.3.2 Ensaio de absorção de umidade ao ar livre

Os corpos de prova de todos os tempos e temperaturas de torrefação (exceto 400 e 450°C) foram deixados em uma bandeja exposto ao ambiente dentro do laboratório de química. Após 3 semanas foi determinado o ganho de massa e calculado a absorção de umidade em ar livre (teor de umidade base úmida).

Este ensaio mostra qual a umidade de equilíbrio do material torrefeito, quanto menor a umidade de equilíbrio maior será a resistência a absorção da umidade do ambiente e maior o conteúdo energético do combustível.

3.4 Análise energética

As propriedades energéticas estudadas foram o poder calorífico superior, inferior e líquido. A partir do poder calorífico determinou-se o rendimento energético. A análise energética foi realizada para todos os tempos e temperaturas de torrefação e carbonização.

3.4.1 Poder calorífico

Os materiais torreficados e carbonizados foram secos em estufa e moídos para ser caracterizado quanto ao poder calorífico superior (PCS) conforme descrito na norma ABNT NBR 8633/84. O calorímetro utilizado foi um IKA WERKE, modelo C 5000 Contro.

Para quantificar o PCI, o calor liberado durante a condensação da água de constituição presente na amostra é desconsiderado, sendo considerado apenas o calor do combustível realmente usado. O valor do PCI foi calculado de acordo com a Equação 04.

$$PCI = PCS - 1357 \quad [04]$$

Onde:

PCI = Poder calorífico inferior (kJ kg^{-1})

PCS = Poder calorífico superior (kJ kg^{-1})

1357 = Energia necessária para evaporar 540g de água formada durante a combustão considerando o teor de 6% de hidrogênio na amostra

O poder calorífico líquido (PCL) foi calculado a partir do PCI e do teor de umidade em base úmida contido na amostra segundo a Equação 05:

$$PCL = PCI \frac{(100 - TU_u)}{100} - 2512 \frac{TU_u}{100} \quad [05]$$

Onde:

PCL = Poder calorífico líquido na respectiva umidade que se encontra a amostra, em kJ kg^{-1}

PCI = Poder calorífico inferior em kJ kg^{-1}

TU_u = teor de umidade da em base úmida, em %

2512 = calor latente de vaporização da água, em kJ kg^{-1} (

3.4.2 Rendimento energético

O rendimento energético (RE) é a relação do quanto se conservou de energia após a torrefação. O RE foi calculado tendo como base o RG e o PCI, a partir da seguinte Equação 06:

$$RE = \frac{PCI_t}{PCI_m} \times RG \quad [06]$$

Onde:

PCI_t = Poder calorífico inferior do material torrefeito, em kJ kg^{-1}

PCI_m = Poder calorífico da madeira *in natura*, em kJ kg^{-1}

RG = Rendimento gravimétrico, em %

RE = Rendimento energético, em %

O RE mostra qual a porcentagem de energia que se conservou na massa residual torrefeita, e é quem fornece o balanço de energia durante o processo de torrefação.

3.5 Análise imediata

A análise imediata das amostras de madeira torrificada e carbonizada foram determinadas de acordo com a norma ABNT NBR 8112/86. Neste procedimento determinou-se o teor de cinzas (CZ), teor de materiais voláteis (MV) e teor de carbono fixo (CF), no qual realizou-se três repetições para cada amostra.

3.5.1 Teor de materiais voláteis

O teor de materiais voláteis (MV) foi calculado pela seguinte Equação 07:

$$MV = \frac{Ms - (M_{lv+c} - M_c)}{Ms} \times 100 \quad [07]$$

Onde:

MV = Teor de materiais voláteis, em %

Ms = massa seca da amostra (torrefeita ou *in natura*), em g

M_{lv+c} = massa de material livre de voláteis + cadinho, em g

M_c = massa do cadinho (obtida após ensaio de teor de cinzas), em g

3.5.2 Teor de cinzas

O ensaio do teor de cinzas (CZ) foi realizado após o ensaio de materiais voláteis. O cadinho com o material livre de volátil é levado ao interior da mufla a 500°C por 5 horas. O teor de cinzas é determinado pela Equação 08:

$$CZ = \frac{(M_{cz+c} - M_c)}{Ms} \times 100 \quad [08]$$

Onde:

M_{cz+c} = massa de cinzas + cadinho (obtida ao final do ensaio), em g

M_c = massa do cadinho, em g

Ms = massa seca da amostra (a mesma para o ensaio de Mv), em g

CZ = Teor de cinzas, em %

3.5.3 Teor de carbono fixo

O teor de carbono fixo (CF) é determinado pela análise somatória. A diferença percentual da soma dos materiais voláteis e do teor de cinzas é o teor de carbono fixo, e pode ser calculado pela Equação 09:

$$CF = 100 - MV - CZ \quad [09]$$

Onde:

MV = Teor de materiais voláteis, em %

CZ = Teor de cinzas, em %

CF – Teor de carbono fixo, em %

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

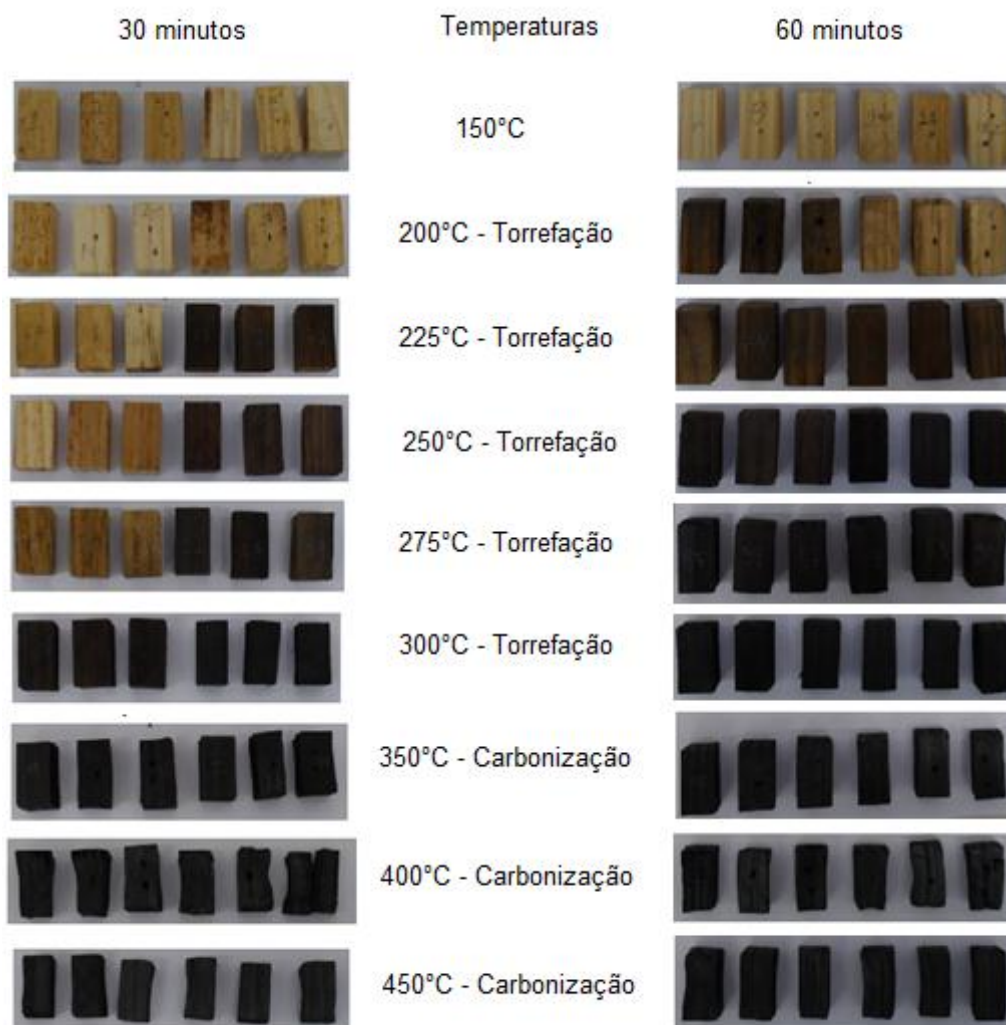
4.1 Densidade básica da madeira *in natura*

A madeira de *Pinus elliottii* utilizada como matéria-prima neste trabalho apresentou densidade básica de 417 kg m^{-3} (desvio padrão de 44,8),

4.2 Material torreficado

A Figura 3 mostram os corpos de prova da madeira após o processo de torrefação.

Figura 3: Material torreficado e carbonizado durante 30 e 60 minutos.



Podemos notar que quanto maior a temperatura mais escura a madeira fica. O material torreficado durante 30 minutos apresentou coloração mais clara que o torreficado durante 60 minutos. Podemos concluir que até 275°C o material possui cor marrom escuro, a partir de 300°C o material passa a possuir cor de grafite, caracterizando o carvão.

4.2.1 Rendimento gravimétrico

Na Tabela 7 são apresentados valores médios e desvio padrão do rendimento gravimétrico para os tempos de 30 e 60 min de torrefação e carbonização.

Tabela 7: Valores médios e desvio padrão do rendimento gravimétrico para os tempos de 30 e 60 min de torrefação e carbonização.

Tratamento	Temperatura (°C)	30 (min)	60 (min)
-	150	99,38 (0,22)	99,24 (0,11)
Torrefação	200	99,47 (0,27)	95,46 (2,73)
	225	94,88 (5,89)	91,87 (4,05)
	250	95,67 (4,54)	84,31 (2,94)
	275	92,14 (7,63)	67,85 (8,58)
	300	67,10 (21,55)	45,49 (4,83)
	Média Torrefação		82,42
Carbonização	350	45,27 (5,65)	39,35 (2,80)
	400	29,04 (1,24)	27,40 (1,66)
	450	27,51 (2,19)	27,09 (1,34)
	Média Carbonização		33,94

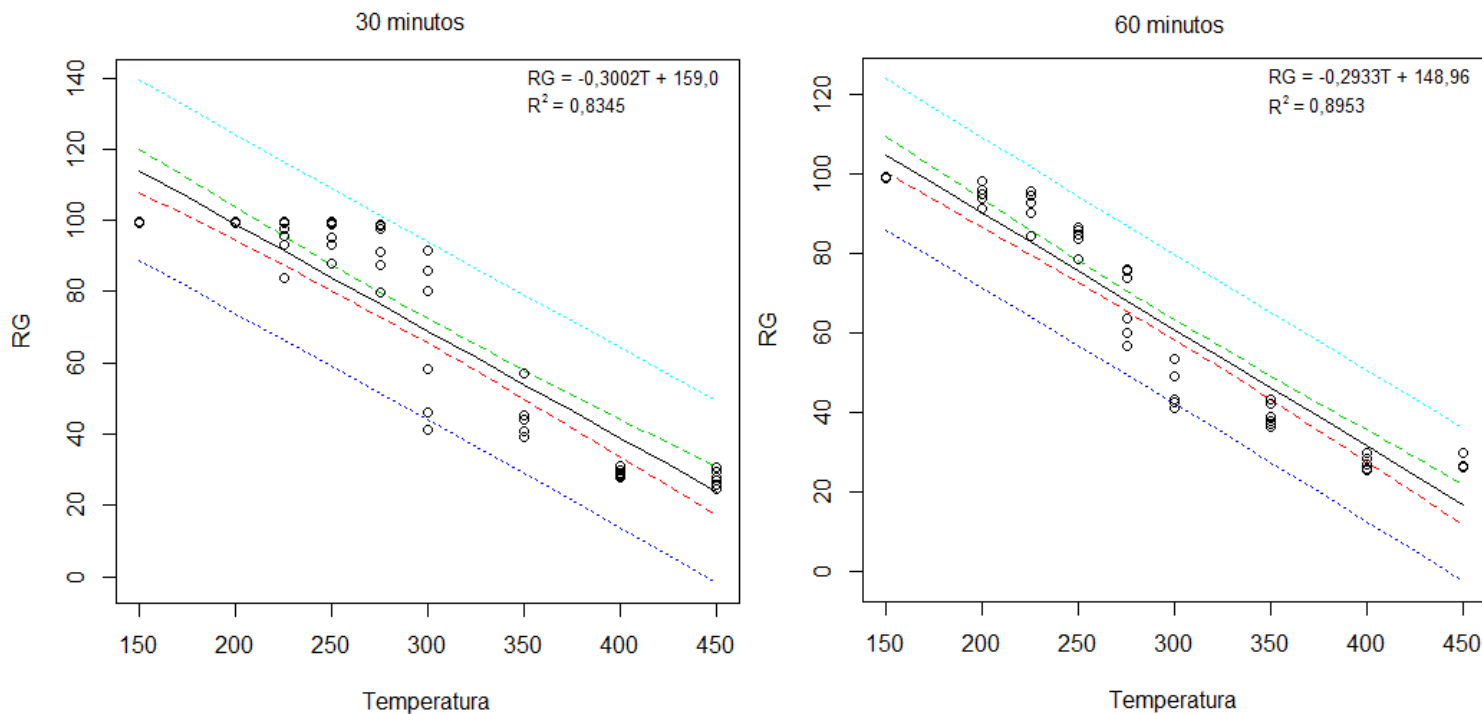
O tratamento a 150°C, tanto a 30 como a 60 min, mostrou alta conservação de massa (99%). Para os tratamento a 350, 400 e 450°C (carvão) obteve-se um RG médio de 33,94% para 30 min e 31,28% para 60 min, sendo o valor máximo 45,27% (300°C, 30min).

Para a torrefação (200 a 300°C) o RG médio é de 82,42% para 30 min e 70,72 % para 60 min. Para 30 minutos obteve-se valores próximos e superior a 90% até 275°C, 300°C apresentou alto desvio padrão (21,55) por ser a temperatura intermediária entre a carbonização e a torrefação. Para 60 minutos o RG decai de forma acentuada a partir de 250°C e para 300°C o RG (45,49%) é similar ao da carbonização, o que mostra que a torrefação durante 60 min é recomendável até 275°C.

Como RG mostra grande dependência da temperatura é possível realizar uma análise de regressão linear para determinar qual será RG em função da temperatura do tratamento. A Figura 4 mostra os gráficos, as

equações das retas e o R^2 do RG em função da temperatura para os tempos de 30 e 60 minutos.

Figura 4: Gráficos do RG do material torreficado e carbonizado em função da temperatura.



Como se pode observar na Figura 4, o RG é função da temperatura de torrefação. Quanto maior a temperatura menor o rendimento gravimétrico e para 30 min obtém-se valores de rendimento gravimétrico maiores que para 60 min.

O RG mostrou que a torrefação conserva grande quantidade de massa, sendo essa uma das principais diferenças entre torrefação e carbonização.

A torrefação durante 30 minutos gera grande conservação de massa, o que pode causar poucas alterações em suas propriedades. A torrefação durante 60 minutos se mostra eficaz até 275°C , pois valores acima tornam o RG similar ao da carbonização.

4.3 Absorção de umidade

Menor teor de umidade da biomassa significa aumento na energia útil e maior rendimento térmico do combustível. Com os estudos de absorção de umidade podemos notar que o caráter hidrofóbico do material torreficado é uma característica real e importante e que em condições severas de umidade o material torreficado se comporta de maneira positiva.

4.3.1 Absorção de umidade em estufa climatizada

O ensaio em estufa climatizada a 25°C e 80% de umidade relativa do ar teve o objetivo de analisar uma situação extrema e determinar qual a umidade que o material absorver após uma condição severa. O teor de umidade em base úmida após 24, 48 e 72 horas em estufa climatizada pode ser encontrado na Tabela 8.

Tabela 8: Teor de umidade do material torreficado após ensaio de absorção de umidade em estufa climatizada.

Tratamento	Temperatura (°C)	TU _u (%) 30 min			TU _u (%) 60 min		
		24 h	48 h	72 h	24 h	48 h	72 h
-	<i>In natura</i>	15,90		17,77	18,07 a		
-	150	15,13	16,69	16,82	14,46	15,59	16,67
Torrefação	200	14,64	16,23	16,84	12,58	13,97	14,24
	225	11,39	13,04	13,40	9,24	10,43	10,80
	250	11,70	12,99	13,83	8,58	9,64	9,44
	275	10,28	11,68	12,00	6,59	6,81	6,97
	300	6,66	7,25	7,35	5,58	5,77	5,87
Média Torrefação após 72 h		12,68 b			9,46 b		
Carbonização	350	7,32	7,47	7,54	7,46	7,72	7,78
	400	7,94	7,95	8,15	7,82	7,87	8,04
	450	8,37	8,38	8,55	7,26	7,27	7,46
Média Carbonização após 72 h		8,08 c			7,76 c		

O teor de umidade após 72 horas em estufa climatizada da madeira *in natura*, do material torreficado e do carvão foi analisado pelo teste Tukey de comparação das médias a um nível de significância de 5%, e podemos

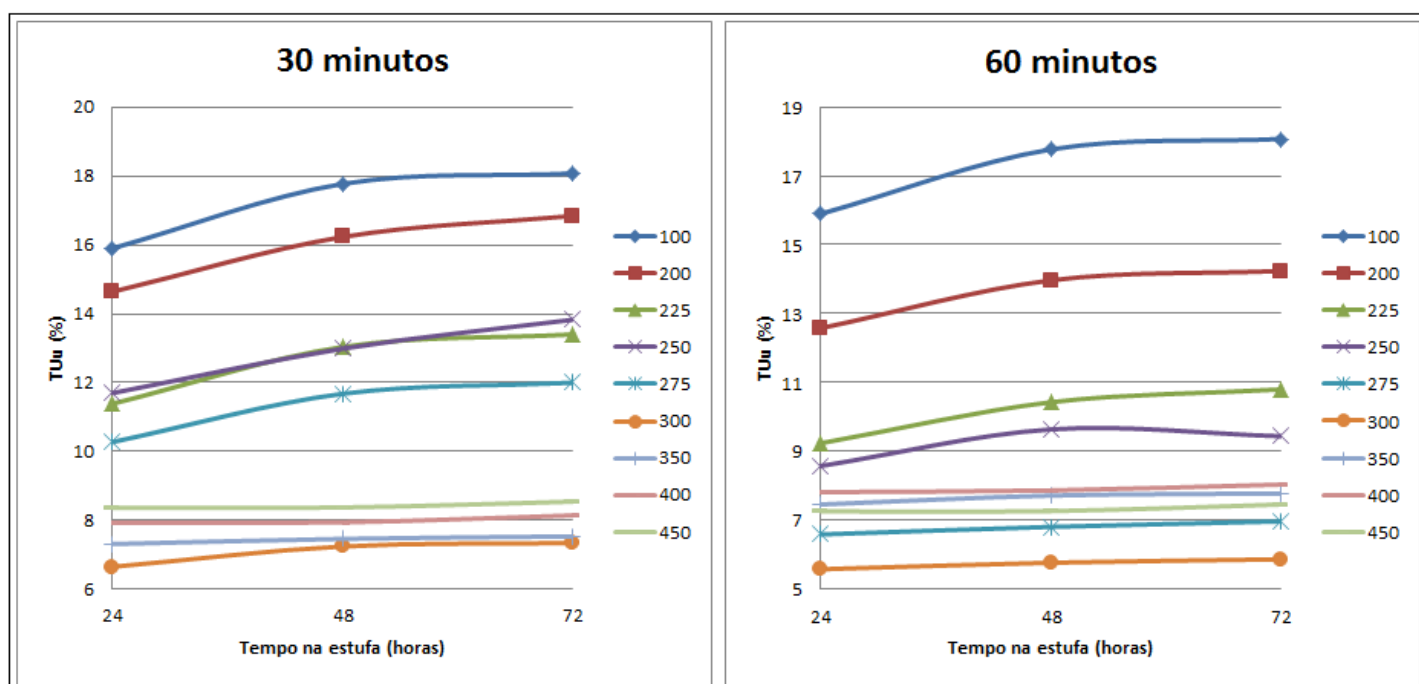
constatar que o material torreficado possui teor de umidade intermediário entre a madeira *in natura* e o carvão. O teor de umidade médio após 72 horas em estufa climatizada do material torreficado durante 30 e 60 minutos é, respectivamente, 70% e 52% do teor de umidade da madeira *in natura*, em quanto que para 250°C (temperatura média da torrefação) esses valores são 76% e 52%, o que mostra que o material torreficado é significativamente mais higroscópico que a madeira *in natura*.

Notamos que para 30 minutos de torrefação o teor de umidade para as temperaturas de torrefação (200, 225, 250, 275, 300) são mais próximos que para 60 minutos, o que mostra que o tempo de torrefação influencia em como a temperatura de torrefação afeta o teor de umidade.

O teor de umidade do material torreficado durante 30 minutos a 300°C e durante 60 minutos a 275 e 300°C é menor que o teor de umidade do carvão. Esse fato pode ser explicado pela maior porosidade do carvão, o qual contribui para absorver umidade de maneira física.

A figura 5 mostra os gráficos do teor de umidade em função do tempo de permanência na estufa para os tempos de 30 e 60 minutos.

Figura 5: Teor de umidade da madeira *in natura*, do material torreficado e do carvão em função do tempo de permanência em estufa climatizada a 25°C e 80% UR.



Podemos notar que para as maiores temperaturas (a partir de 300°C) o teor de umidade se estabiliza mais rápido que para temperaturas menores. Esse fato pode ser explicado devido a baixa degradação das hemiceluloses e celulose nos materiais processados a temperaturas menores. As hemiceluloses e a celulose possuem grupos hidroxilas (OH) que são hidrofílicos e causam maior troca de umidade com o ambiente.

Podemos concluir que o material torreficado apresenta maior resistência e estabilidade à absorção de umidade durante uma situação crítica que a madeira *in natura*, sendo sua utilização indicada para regiões de clima úmido e chuvoso. O material torreficado durante 30 minutos obteve maior teor de umidade que o material torreficado durante 60 minutos, o que sugere uma menor remoção de hemiceluloses e justifica o alto RG deste tratamento. Os teores de umidade do material torreficado durante 60 minutos foram mais atrativos e se mostraram mais eficientes. O material torreficado a 275°C obteve somente 38% do TU_u da madeira *in natura*, e se mostrou o melhor tratamento.

4.3.2 Absorção de úmida ao ar livre

O ensaio de absorção de umidade ao ar livre teve por objetivo avaliar a umidade de equilíbrio, ou seja, a umidade que o material absorve do ar. Este ensaio é o que melhor representa a umidade que a biomassa torrificada terá e é um parâmetro importante na avaliação de um biocombustível sólido. A umidade de equilíbrio do material após ser exposto ao ambiente durante três semanas se encontra na Tabela 9,

Tabela 9: TU_u da madeira *in natura*, material torrificado e carvão após três semanas exposto ao ambiente.

Tratamento	Temperatura (°C)	TU_u (%)	
		30 min	60 min
-	<i>In natura</i>	8,73	
-	150	8,6	8,58
Torrefação	200	8,68	7,68
	225	6,52	5,5
	250	7,45	5,28
	275	7,07	4,54
	300	4,85	4,63
Média Torrefação		6,91	5,53
Carbonização	350	5,11	5,6

Esse ensaio é o que melhor representa a umidade que o material torrificado terá. Podemos notar que para 30 minutos a temperatura influencia a umidade de forma mais relevante somente a partir de 300°C. Para 60 minutos o TU_u é menor e a partir de 225°C já se nota uma diminuição significativa do teor de umidade. O carvão produzido a 350°C teve maior TU_u que 300°C 30 min, 275°C e 300°C 60 min, o que mais uma vez mostra que a maior porosidade do carvão contribui para a absorção física da umidade.

Podemos concluir que o tempo de torrefação contribui para a umidade que o material absorverá do ambiente, sendo mais eficiente a torrefação durante 60 min. Os tratamentos a 250 e 275°C 60 min tiveram respectivamente 60% e 52% do teor de umidade da madeira *in natura* e se mostram os melhores tratamentos.

4.4 Análise energética

4.4.1 Poder calorífico

Os resultados obtidos quanto ao poder calorífico são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10: PCS e PCI (kJ kg^{-1}) dos materiais após processo de torrefação e carbonização durante 30 e 60 min.

Tratamento	Temperatura (°C)	30 (min)		Aumento PCI (%)	60 (min)		Aumento PCI (%)
		PCS	PCI		PCS	PCI	
-	<i>In natura</i>	20384	19027	100,00	20384	19027	100,00
-	150	20394	19037	100,05	20104	18747	98,53
Torrefação	200	20356	18999	99,05	20706	19349	101,69
	225	20588	19231	101,07	21149	19792	104,02
	250	20416	19059	100,17	21999	20642	108,49
	275	21067	19710	103,59	23635	22278	117,09
	300	23863	22506	118,28	28945	27588	144,99
	Média Torrefação		21258	19901	104,59	23287	25679
Carbonização	350	27777	26420	138,86	28033	26676	140,20
	400	29265	27908	146,67	29339	27820	146,21
	450	29614	28257	148,51	29933	28576	150,19
	Média Carbonização		28885	27528	144,68	29936	27690

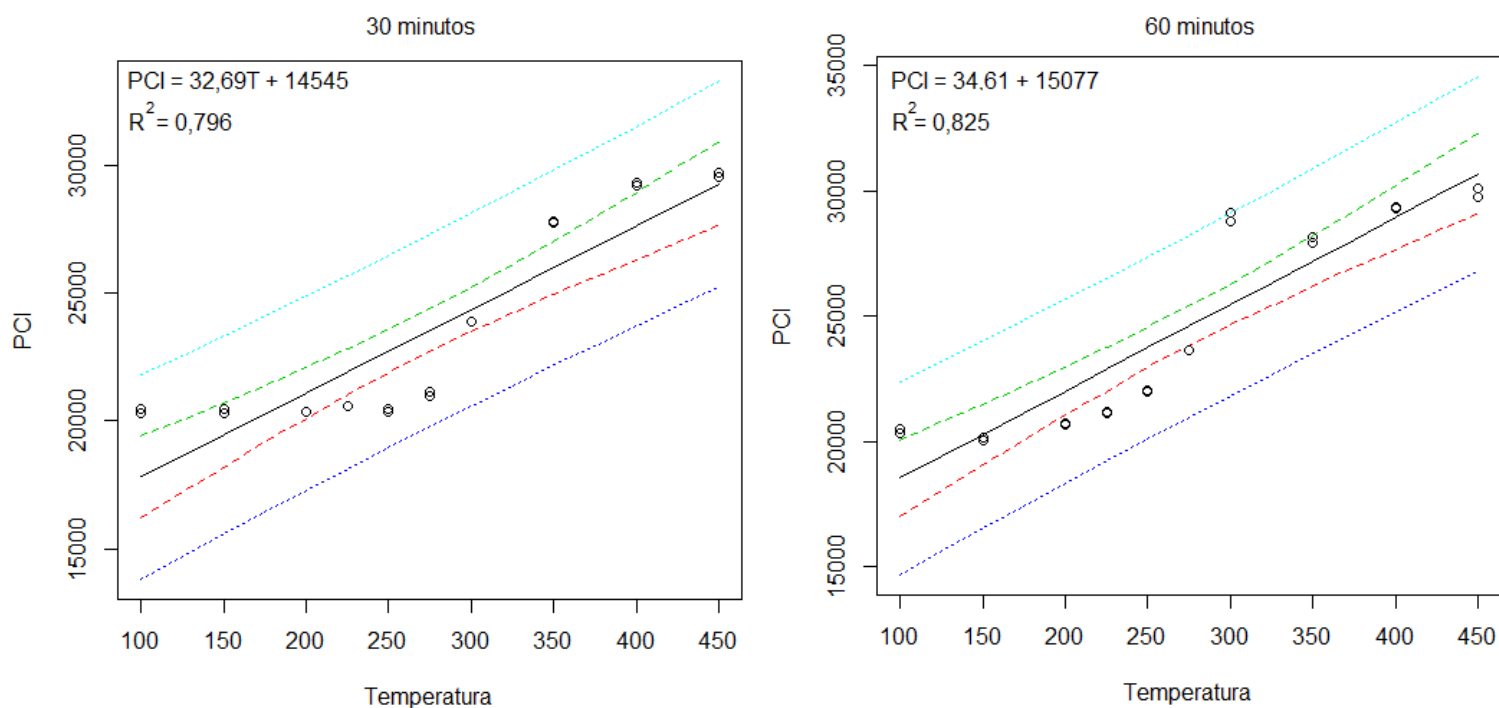
Podemos observar que quanto maior a temperatura maior o poder calorífico. O poder calorífico do carvão é maior que o do material torreficado tanto para 30 quanto 60 min, pois na carbonização ocorre maior degradação dos materiais voláteis e aumento do teor carbono fixo do que na torrefação.

Tanto para 30 quanto 60 minutos o carvão apresentou em média valores próximos a 45% a mais de PCI que a madeira *in natura*. Para torrefação o PCI variou com o tempo, o aumento do PCI médio para 30 minutos foi de apenas 4,6% e para 60 minutos o aumento do PCI foi próximo de 35%. Esses valores médios comprovam o que o RG havia sugerido, baixo tempo de torrefação gera grande conservação de massa por não eliminar quantidades expressivas de materiais voláteis, o que acarreta em pouco aumento do PCI.

Já para 60 min o PCI aumenta significativamente a partir de 250°C (8,5%), e se mostra uma melhoria consistente

Como o PCI apresenta forte dependência da temperatura pode-se fazer uma regressão linear e analisar a dependência dessas duas variáveis. A Figura 6 mostra o gráfico, as equações da reta e o R^2 do PCI em função da temperatura do processo para os tempos de 30 e 60 minutos.

Figura 6: PCI em função da temperatura e tempo de pirólise.



As equações das retas nos permite estimar o PCI do material torreficado ou carbonizado em função da temperatura e tempo do processo. Notamos que o R^2 para o tempo de 30 minutos foi menor que o para 60 minutos, outro indicio de que a temperatura influencia de forma mais intensa o PCI do material submetido a pirólise durante 60 minutos do que durante 30 minutos.

Com o teor de umidade proveniente do ensaio de absorção de umidade foi possível calcular o poder calorífico líquido e comprovar se o caráter hidrofóbico do material torreficado tem efeito significativo no PCL. A Tabela 11 e a Tabela 12 mostram o PCL calculado para a umidade de equilíbrio (ensaio de

absorção de umidade ao ar livre) e para umidade após o ensaio em estufa climatizada.

Tabela 11: Valores de poder calorífico líquido para 30 min de torrefação em função do teor de umidade e seu aumento porcentual.

Tratamento	Temperatura (°C)	TU _u Ar livre	PCL Ar livre	Aumento PCL (%)	TU _u Estufa	PCL Estufa	Aumento PCL (%)
-	<i>In natura</i>	8,73	17148	100,0	18,07	15136	100,0
-	150	8,58	17189	100,2	16,67	15446	102,0
Torrefação	200	7,68	17347	101,2	14,24	15936	105,3
	225	5,50	18036	105,2	10,8	16884	111,5
	250	5,28	17921	104,5	9,44	17024	112,5
	275	4,54	18702	109,1	6,97	18162	120,0
	300	4,63	21348	124,5	5,87	21038	139,0
Carbonização	350	5,60	24800	144,6	7,78	24170	159,7
	400	-	-	-	8,04	25463	168,2
	450	-	-	-	7,46	25963	171,5

Tabela 12: Valores de poder calorífico líquido para 60 min de torrefação em função do teor de umidade e seu aumento porcentual.

Tratamento	Temperatura (°C)	TU _u Ar livre	PCL Ar livre	Aumento PCL (%)	TU _u Estufa	PCL Estufa	Aumento PCL (%)
-	<i>In natura</i>	8,73	17148	100,0	18,07	15136	100
-	150	8,6	16903	98,6	16,82	15172	100,2
Torrefação	200	8,68	17925	104,5	16,84	15668	103,5
	225	6,52	18131	105,7	13,4	16804	111,0
	250	7,45	19006	110,8	13,83	17441	115,2
	275	7,07	21076	122,9	12,00	19304	127,5
	300	4,85	26050	151,9	7,35	25376	167,7
Carbonização	350	5,11	26677	155,6	7,54	24476	161,7
	400	-	-	-	8,15	25497	168,5
	450	-	-	-	8,55	25918	171,2

Podemos notar que quando o material torreficado a 30 e 60 min é deixado em uma condição severa de umidade (ensaio de absorção em estufa climatizada) o valor de PCL é maior que o da madeira. Para 250°C e 60 min de torrefação o PCL é 15% maior (PCI 8,5%) e para 250°C e 30 min de torrefação o PCL é 12% maior (PCI o mesmo da madeira).

O teste ao ar livre mostra a umidade de equilíbrio que o material terá e o PCL a esta umidade é o que melhor representa a energia possível de ser usada em processos térmicos. Para 250°C e 60 min de torrefação o PCL é 10% maior que o a madeira *in natura* (PCI 8%) e para 250°C e 30 min o PCL é 4,5% maior (PCI o mesmo da madeira).

Esta análise permite concluir que o poder calorífico aumente com a torrefação e o caráter hidrofóbico do material causa significativa melhora no PCL, sendo assim é aconselhável o uso do material torreficado em regiões com alta umidade relativa do ar e ocorrência de chuva.

Para 30 min de torrefação o PCI não aumente significativamente, porém a resistência absorção de umidade faz com que o PCL aumente, o que justifica a torrefação nesse tempo.

4.4.2 Rendimento energético

O rendimento energético foi calculado em função do poder calorífico inferior e os resultados são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13: Rendimento energético para 30 e 60 min de torrefação.

Tratamento	Temperatura (°C)	RE – 30 min (%)	RE – 60 min (%)
-	150	99,43	97,78
Torrefação	200	99,32	97,08
	225	95,90	95,56
	250	95,83	91,47
	275	95,44	79,44
	300	79,37	65,96
	Média Torrefação		93,17
Carbonização	350	62,86	55,17
	400	42,59	40,29
	450	40,85	40,68
	Média Carbonização		48,00

Notamos que o RE para 30 minutos é maior que para 60 minutos. Isso ocorre, pois durante 30 minutos há maior conservação de massa (maior RG). Os valores de RE para 30 minutos são superiores a 90%, já para 60 min o RE decai para menos de 90% a partir de 275°C. Podemos dizer que a torrefação conserva cerca de 80% de energia, em quanto que a carbonização rende somente 40 a 50%.

O rendimento energético mostra quanto da energia inicial da madeira se conservou na massa residual do material torrefeito. Quanto menor o rendimento energético maior será a remoção dos voláteis, o que acarreta em menor rendimento gravimétrico e melhor propriedade do material torreficado (maior PCI e maior resistência absorção de umidade).

O carvão, como já mencionado, é muito utilizado na siderurgia e cocção, que são processos em que o combustível necessita de altos teores de carbono fixo, sendo assim o RE não é um parâmetro limitante na carbonização. Já para a torrefação, que tem por objetivo a geração de calor (industrial, residencial, etc) e a presença de chama é aceitável o RE deve ser considerado,

pois baixo RE (assim como baixo RG) torna o balanço de energia negativo o que faria da torrefação um processo insustentável.

O RE da torrefação se mostrou muito superior ao da carbonização, e a partir dele podemos concluir que a torrefação durante 60 minutos é viável até 275°C, pois valores acima haveria perda de energia maior que 20%. Vale ressaltar que as plantas industriais de torrefação sempre visam utilizar essa energia que é liberada.

4.5 Análise imediata

Os resultados da análise imediata para madeira *in natura*, material torrefeito e carvão são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14: Valores médios do teor de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas após o processo de torrefação.

Tratamento	Temperatura (°C)	Tempo					
		30 (min)			60 (min)		
		MV (%)	CZ (%)	CF (%)	MV (%)	CZ (%)	CF (%)
-	<i>In natura</i>	82,76 a		0,29 a		16,95 a	
-	150	81,33	0,17	18,50	80,63	0,21	19,16
Torrefação	200	81,74	0,23	18,02	80,17	0,26	19,57
	225	80,77	0,31	18,92	79,90	0,18	19,92
	250	80,05	0,32	19,64	74,20	0,36	25,43
	275	77,62	0,27	22,10	67,47	0,34	32,19
	300	67,18	0,27	32,55	41,90	0,64	57,46
Média Torrefação		77,47 b	0,28 b	22,25 b	68,73 b	0,36 b	30,91 b
Carbonização	350	45,69	0,60	53,71	37,86	0,68	61,46
	400	27,41	0,89	71,70	27,21	0,73	72,05
	450	25,48	1,09	73,43	25,40	0,96	73,64
Média Carbonização		32,86 c	0,86 c	66,28 c	30,16 c	0,79 c	69,05 c

Os dados foram analisados pelo teste Tukey de comparação das médias com nível de significância de 5%. O teste Tukey mostra que o material torrefeito, tanto a 30 quanto 60 min de torrefação (200 a 300°C), possui maior teor de carbono fixo que a madeira *in natura*, porém entre eles não houve aumento significativo (somente para 300°C). Comparando o material torrefeito com o carvão (300, 350 e 450°C) houve diferença significativa, o que mostra que o carvão possui maior teor de carbono fixo.

Essa análise mostra que o material torrefeito não apresenta as mesmas características que o carvão e não pode ser utilizado em siderurgia e processos que utilizam brasa, pois sua combustão libera chama, devido ao alto

teor de materiais voláteis, sendo o seu uso restrito a processos em que a chama é aceitável.

O teor de cinzas aumenta devido a eliminação dos materiais voláteis, o que faz com que o teor de cinzas por unidade de massa do combustível aumente.

5 CONCLUSÃO

Após o estudo sobre a torrefação para fins energéticos podemos concluir que a torrefação causa efeitos positivos na biomassa de madeira. Seu processo de produção e produtos são distintos da carbonização e seu desempenho quando comparado com a madeira *in natura* é melhor.

Podemos elencar as seguintes conclusões com os ensaios realizados:

- O RG da torrefação é superior ao da carbonização. Para 30 min o RG é superior a 90%. É recomendado torrefação durante 60 minutos até 275°C, pois valores acima geram RG similar ao da carbonização;
- A umidade depende do tempo e temperatura de torrefação sendo 60 min o tempo que gera maior resistência absorção de umidade durante uma situação crítica (quase metade da umidade da madeira *in natura*);
- O PCI é pouco incrementado para 30 min de torrefação. 60 minutos geram mais de 8% de aumento do PCI para temperaturas superiores a 250°C;
- O poder calorífico líquido é superior ao da madeira, o que faz com que o caráter hidrofóbico seja uma característica significativa, principalmente para torrefação durante 30 minutos;
- O rendimento energético é superior a 90 % para 30 e 60 min, valor muito superior ao carvão (~40%), o que torna a torrefação um processo ecologicamente aceitável;
- O teor de matérias voláteis é pouco menor, o que mostra que a torrefação elimina de forma suave os voláteis;
- O teor de carbono fixo do material torreficado (20 a 40%) não é superior ao do carvão (~70%), o que mostra que o material torreficado não pode ser utilizado em siderúrgicas.
- O teor de cinzas aumenta com a temperatura de torrefação devido a diminuição de massa do material.

No geral todos os ensaios mostram melhoras em seus resultados. O material torreficado se mostrou mais energético e resistente a umidade que a biomassa *in natura*, sendo essas suas principais características.

A torrefação durante 30 minutos rendeu alta conservação de massa, o que acarretou em baixa remoção de voláteis e conseqüentemente baixo aumento do PCI. Entretanto podemos constatar que, mesmo sendo baixa, a resistência a absorção de umidade do material torreficado o aumentou o PCL. Este aumento somado ao fato que quanto menor o tempo de torrefação mais produtiva será a indústria, leva a concluir que a torrefação durante 30 minutos ainda não foi descartada completamente.

As propriedades do material torreficado durante 60 minutos foram mais atrativas, 250 e 275°C mostram aumentos significativos no PCI, PCL e resistência a absorção de umidade. A principal diferença entre essas temperaturas foram os rendimentos. Sendo assim a escolha entre ambas deve ser tomada com base na tecnologia utilizada para realizar a torrefação. Reatores onde não se recupera eficientemente a energia liberada recomenda-se a temperatura de 250°C, reatores tecnológicos e precisos recomenda-se a temperatura de 275°C.

A torrefação ainda está em fase de desenvolvimento e as plantas industriais que produzem o material torrefeido são de pequena escala. Entretanto este trabalho mostra que a torrefação tem o potencial de melhorar uma biomassa que é abundante no Brasil e que ainda não tem valor agregado, podendo se tornar um mercado sólido e fonte de desenvolvimento sustentável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, R. V.; LORA, E. E. S. **Gaseificação da madeira**. IN: COLODETTE, J; QUEIROZ, J. H; SANTOS, J. Ed. **Bioenergia & Biorefinaria: Cana-de-açúcar & Espécies Florestais**. Viçosa. Suprema Gráfica e Editora Ltda, 2013. p. 483-508.

ANDRADE, R. V.; LORA, E. E. S; VENTURINI, O. J. **Torrefação da madeira**. IN: COLODETTE, J; QUEIROZ, J. H; SANTOS, J. Ed. **Bioenergia & Biorefinaria: Cana-de-açúcar & Espécies Florestais**. Viçosa. Suprema Gráfica e Editora Ltda, 2013. p. 401-428.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8112 - **Carvão vegetal – Análise imediata**. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8633 - **Carvão vegetal – Determinação do poder calorífico**. Rio de Janeiro, 1984.

BASU, P. **Biomass Gasification and pyrolysis: practical design**. EUA: Elsevier, 2010.

BERG, A; GRANDÓN, H; MÜLLER, N; SEGURA, C; TESSIN, C. **Pirólise rápida da madeira para produção de bio-óleo**. IN: COLODETTE, J; QUEIROZ, J. H; SANTOS, J. ED. **Bioenergia & Biorefinaria: Cana-de-açúcar & Espécies Florestais**. Viçosa. Suprema Gráfica e Editora Ltda, 2013. p. 459-482.

Bergman, P. C. A. **Torrefaction in combination with pelletisation: the TOP Process**. Energy Energy Research Center OF Netherlands – ECN Biomass, 2005.

BERGMAN, P. C. A.; BOERSMA, A. R.; KIEL, J. H. A.; PRINS, M. J.; PTASINSKI, K. J.; JANSSEN, F. **Torrefaction for entrained-flow gasification of biomass**. Energy Research Center OF Netherlands – ECN Biomass, 2004.

BRAME, J. S. S.; KING, J. G. 1942 - **Fuel Solid, Liquid and Gaseous**. London, 4a. ed., Edward Arnold & Co. 422 p.

BRAND, M. A. **Qualidade da biomassa florestal para o uso na geração de energia em função da estocagem**. 169f. Dissertação (mestrado em Ciências Florestais). Centro de Ciências Florestais e Agrárias. UFPR, Curitiba, 2007.

BRITO, J. O. Expressão da produção florestal em unidade energéticas. In: CONGR ESO FLORESTAL PANAMERICANO, 1,; CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 7., 1993, Curitiba. **Floresta para o**

desenvolvimento: política, ambiental, tecnológica e mercado: anais. São Paulo: SBS; [S.I.]: SBEF, 1993, v. 3. p. 280-282.

CARNEIRO, A. C. O; OLIVEIRA, A. C; PEREIRA, B. L. C; SANTOS, R. C. **Conversão direta da madeira em calor e energia.** IN: COLODETTE, J; QUEIROZ, J. H; SANTOS, J. Ed. **Bioenergia & Biorefinaria: Cana-de-açúcar & Espécies Florestais.** Viçosa. Suprema Gráfica e Editora Ltda, 2013. p. 355-378.

CARNEIRO, A. C. O; OLIVEIRA, A. C; PEREIRA, B. L. C; VITAL, B. R. **Pirólise lenta da madeira para a produção de carvão vegetal.** IN: COLODETTE, J; QUEIROZ, J. H; SANTOS, J. Ed. **Bioenergia & Biorefinaria: Cana-de-açúcar & Espécies Florestais.** Viçosa. Suprema Gráfica e Editora Ltda, 2013. p. 429-457.

CARNEIRO, A. C. O; PEREIRA, B. L. C; VITAL, B. R. **Qualidade da madeira para fins energéticos.** IN: COLODETTE, J; QUEIROZ, J. H; SANTOS, J. Ed. **Bioenergia & Biorefinaria: Cana-de-açúcar & Espécies Florestais.** Viçosa. Suprema Gráfica e Editora Ltda 2013. p. 321-354.

CETEC – Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais. **Teoria simplificada da combustão.** Belo Horizonte, 1988. 30p.

DUTTA, A. **Torrefaction and other processing options.**

GARCIA, D. P. **Caracterização química, física e térmica de pellets de madeira produzidos no Brasil.** 2010. 101 f. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista UNESP, câmpus de Guaratinguetá, Guaratinguetá. 2010.

GARCIA, D. P. PELLETS: Uma questão de competitividade e preço. [Editorial]. Revista da madeira: Guia brasileiro de biomassa. Edição especial 138, p. 32-34. jan., 2014.

INSTITUTO DE PESQUISA TECNOLÓGICAS (São Paulo). ***Pinus elliottii*.** Disponível em: < http://www.ipt.br/informacoes_madeiras3.php?madeira=7>. Acessado em: 23 nov. 2015.

KIEL, J. **Prospects of Torrefaction to optimize bioenergy value chains.** Energy Research Central of Netherlands – ECN Biomass (report n° ECN-L-11-120), 2011.

KITANI, O.; HALL, C. W. **Biomass Handbook.** New York: Gordon and Breach science Publishers, 1989. 963p.

KLEINSCHMIDT, C. **Overview of International Developmenst in Torrefaction.** Central European Biomass Conference, 2011.

LIN, S. Y.; DENCE, C. W. **Methods in lignin chemistry**. Berlin: Springer Verlag, 1992. 578p.

MAGALHÃES, E. A. **Desenvolvimento e análise de uma fornalha para aquecimento direto e indireto de ar utilizando biomassa polidispesa**. 2007. 213 f.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Balço Energético Nacional (BEM)**. 2015.

MONTEIRO, C.; SILVA, F. G.; SEGURA, T. E. S.; VASCONCELLOS P. S. P. **Potencial energético da lignina extraída do licor negro de *Eucalyptus***.

PEREIRA, B. L. C. **Qualidade da madeira de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal**. 2012. 92 f. Dissertação (mestrado em Ciências Florestais). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 2012.

PRINS, M. J.; PTASINSKI, K. J. JSNDDRN, F. J. More Efficient Biomass Gasification Via Torrefaction. **Energy**, v. 31, p.3458-3470, 2006

RICHARDSON, J.; BJÖRHEDEN, R.; HAKKILA, P.; LOWE A. T.; SMITH, C. T. **Bioenergy from sustainable forestry: Guiding principles and practice**. Forestry Sciences v.71. Kluwer Academic Publishers, 2002, 364p.

SANTOS, M. A. S. Parâmetros de qualidade do carvão vegetal para uso em alto-forno. In: FÓRUM NACIONAL SOBRE CARVÃO VETEGAL, 1., 2008, Belho Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: UTMG, 2008.

SEDEROFF, R.; CHANG, H. Lignin **Biosynthesis**. IN: LEWIS, M.; GOLDSTEIN, I.S.(ed.) **Wood structure and composition**, N.i. ; Marcel Dekker, 1991p.

SIMPSON, W. T. Equilibrium moisture content prediction of wood. **Forest Products Journal**, Madison, v.21, n.5, p.48-9, mai.1971.

SJÖSTRÖM, E. **Wood Chemistry – Fundamentals and applications**, Academic Press, Inc. 1992. 293p.

SMITH, A. D. 1976 - **Wood as fuel**. Foster Wheeler Limited. Mimeograph. 32 p.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE SILVICULTURA. **Fatos e Números do Brasil Floresta**. 2006. Disponível em: < <http://www.ipef.br/estatisticas/relatorios/SBS-2005.pdf>> . Acessado em: 01 nov. 2015.

WENGERT, G. Measuring moisture content. **Cabinet Maker**, v.19, n.2, p. 26-27, 2005.