



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL – PEI

ANE CAROLINE PEREIRA BORGES

CARACTERIZAÇÃO ENERGÉTICA DO CAVACO DE
***Eucalyptus grandis* “IN NATURA” E TORREFEITO**

Salvador
2015

ANE CAROLINE PEREIRA BORGES

**CARACTERIZAÇÃO ENERGÉTICA DO CAVACO DE
Eucalyptus grandis “IN NATURA” E TORREFEITO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial da Universidade Federal da Bahia como requisito para a obtenção de título de Mestre em Engenharia Industrial

Orientador: Prof. Dr. Ednildo Andrade Torres

Co-orientadora: Profa. Dra. Carine Tondo Alves

Salvador
2015

Borges, Ane Caroline Pereira
Caracterização Energética do Cavaco de Eucalyptus
grandis "in natura" e torrefeito / Ane Caroline Pereira Borges. –
Salvador, 2015.

40 f. : il. color. 80 p.

Orientador: Prof. Dr. Ednildo Andrade Torres
Co-orientador: Profa. Dra. Carine Tondo Alves
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal da Bahia.
Escola Politécnica, 2015.

1. Biomassa. 2. Cavaco. 3. Torrefação. 4. Caracterização
Energética I. Torres, Ednildo Andrade. II. Título.


**CARACTERIZAÇÃO ENERGÉTICA DO CAVACO DE *Eucalyptus grandis* IN
NATURA E TORREFEITO**

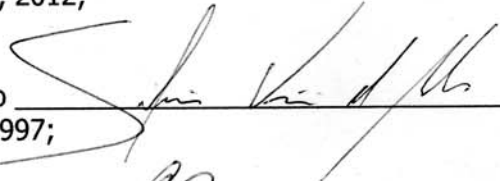
ANE CAROLINE PEREIRA BORGES

Dissertação submetida ao corpo docente do programa de pós-graduação em Engenharia Industrial da Universidade Federal da Bahia como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Industrial.

Examinada por:

Prof. Ednildo Andrade Torres 
Doutor em Engenharia Mecânica, Brasil, 1999;

Prof^a. Carine Tondo Alves 
Doutora em Engenharia Industrial, Brasil, 2012;

Prof. Silvio Alexandre Beisl Vieira de Melo 
Doutor em Engenharia Química, Brasil, 1997;

Prof^a. Lílian Lefol Nani Guarieiro 
Doutora em Química, Brasil, 2010;

Salvador, BA - BRASIL
Agosto/2015

Conforme resolução do Programa, o conjunto de orientadores teve a representação de 1 (um) único voto no parecer final da banca examinadora.

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida e por todas as bênçãos recebidas.

Aos meus pais e irmão pela dedicação, amor, carinho e apoio incondicional ao longo de toda vida.

Minha avó Alice e minha tia avó Julia, pelo amor e orações.

A Caio Costa pelo amor, paciência, cumplicidade e incentivo para eu continuar lutando pelos meus objetivos.

Aos meus orientadores Ednildo Andrade Torres e Carine Tondo Alves pelo incentivo, confiança e paciência durante todo o mestrado.

À Profa. Heloysa Andrade, por abrir as portas do LABCAT para a realização de alguns dos experimentos. A Raimundo, estudante de iniciação científica do LABCAT, pelo auxílio na execução da análise imediata.

Ao técnico Fernando pelo auxílio em algumas das análises.

Aos colegas do laboratório de Energia e Gás da Universidade Federal da Bahia, em especial, Luísa Trigo, Marcelo Silva, Ângela Lima e Airton Carneiro, por todo apoio e amizade ao longo de todo o mestrado.

Às minhas amigas, em especial Caroline Queiroz, Sylvia Menezes e Vanessa Pereira, por todo apoio e todo tipo de ajuda.

A todos que de alguma forma participaram do desenvolvimento desta dissertação.

RESUMO

A biomassa vem sendo estudada como uma alternativa de fonte de energia que provoca um menor impacto ambiental, para produção de biocombustíveis. Entretanto, a biomassa apresenta algumas desvantagens, tais como o alto teor de umidade, natureza higroscópica, baixa densidade energética, difícil armazenagem que, conseqüentemente, inviabiliza a logística e seu uso direto como combustível. Uma maneira de atenuar essas desvantagens é através do processo de torrefação, o qual converte a biomassa em um biocombustível sólido de alto potencial energético. A torrefação é um processo de conversão termoquímica que ocorre na fase endotérmica da pirólise, e tem como objetivo concentrar a energia da biomassa em curto tempo e obter altos rendimentos. O presente trabalho teve como objetivo caracterizar energeticamente as amostras de cavaco in natura e torrefeita para avaliar a influência os benefícios do processo de torrefação nas propriedades da madeira de *Eucalyptus grandis* para que seja usada como combustível. As amostras in natura e previamente torrefeitas (250, 290 e 310 °C) foram caracterizadas para comparação dos resultados. As amostras foram caracterizadas por análises físico-químicas: análise elementar (C, H, N, O), análise imediata (umidade, voláteis, cinza e carbono fixo) e poder calorífico (PCS e PCI). A determinação da faixa de decomposição da hemicelulose, celulose e lignina foi obtida por análise termogravimétrica (TGA) realizadas com N₂. De acordo com os resultados, verificou-se que o processo de torrefação melhorou de forma significativa as propriedades energéticas da biomassa estudada. O poder calorífico superior teve um acréscimo em torno de 25 %; o teor de carbono fixo e de cinzas também aumentou 60 % e 0,6 %, respectivamente. Devido à decomposição em grande parte da hemicelulose, a umidade (70 %) e os materiais volátil (60 %) reduziram. A partir da análise elementar observou-se um aumento no teor de carbono e uma redução na razão O/C, o que indica uma maior quantidade de energia retida no biocombustível. Através do TGA foi observada a influência da temperatura de torrefação na redução de massa das amostras. Uma grande perda de massa ocorreu entre 210 e 450 °C, que representa a decomposição da hemicelulose. A amostra in natura e torrefeita a 250 °C foram as que tiveram maior perda de massa. Desta forma pode-se verificar, de acordo com os resultados obtidos, que o processo de torrefação é um procedimento viável para o condicionamento de energia de biomassa de eucalipto. Esse tramamento provoca mudanças significativas nas propriedades e benefícios para o seu transporte. Com a logística viabilizada e as mudanças favoráveis das propriedades da biomassa torrefeita, esta possui diferentes finalidades para sua aplicação na geração de energia térmica e ou elétrica.

Palavras-chave: Biomassa. Cavaco de eucalipto. Torrefação. Caracterização energética.

ABSTRACT

Biomass has been studied as an alternative of source energy that causes less environmental impact for production of biofuel. However, biomass presents some difficulties to overcome, such as its high moisture content, hygroscopic nature, low energy density, which causes high costs during transportation, handling and storage and its direct use as fuel. One way to alleviate these constraints is to convert biomass into a solid biofuel with high potential energy by the torrefaction process. Torrefaction is a thermochemical conversion process which occurs in the endothermic phase of pyrolysis that aims to focus the energy of biomass in a short time and obtain high yields. This work aimed to study the benefits of the torrefaction process for the energetic properties of *Eucalyptus grandis* wood. The raw and previously torrefied samples (250, 290 and 310 ° C) were characterized to compare the results. The samples were characterized by physicochemical analysis: ultimate analysis (C, H, N, O), immediate analysis (moisture, volatile, ash and fixed carbon) and heating value (HHV and LHV). The range decomposition of hemicellulose, cellulose and lignin was obtained by thermogravimetric analysis (TGA) performed in N₂. According to the results, it was found that the torrefaction process has improved significantly the energy properties of biomass studied. The high heat value has increased around 25 %; fixed carbon (60 %) and ash (0.6 %) also increased. Due mostly to the decomposition of hemicellulose, the moisture (70%) and volatiles contents (around 60%) decreased. Based on the ultimate analysis, it was observed that fixed carbon content increased and ratio O/C reduced, which indicates a greater amount of energy retained in the biofuel. Through TGA analysis it was observed the influence of the torrefaction temperature on the of reduce sample weights. A large weight loss occurred between 210 and 450 °C, which indicates the decomposition of hemicellulose. The raw and torrefied (250 ° C) samples were the ones that had higher weight loss. Thus, based on the results presented, the torrefaction process is a viable procedure for energy conditioning of *Eucalyptus* biomass. This treatment causes significant changes in their properties and benefits for its transportation. Considering the viable logistics and favorable changes of the torrefied biomass properties, it has different purposes for its application in the generation of thermal or electric energy.

Keywords: Biomass. Eucalyptus chip. Torrefaction. Energy characterization.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Matriz energética brasileira 2013.....	17
Figura 2	Oferta interna de energia no Brasil.....	18
Figura 3	Esquema simplificado do ciclo de carbono.....	19
Figura 4	Estrutura da celulose.....	22
Figura 5	Estrutura da hemicelulose.....	22
Figura 6	Estrutura da lignina.....	23
Figura 7	Produtividade de árvores coníferas e folhosas no mundo (m ³ /há.ano).....	24
Figura 8	Percentual da área de plantios de eucalipto por estado em 2012.....	26
Figura 9	Processos de conversão energética da biomassa de madeira.....	28
Figura 10	Etapas do processo de torrefação.....	32
Figura 11	Esquema do processo TOP.....	38
Figura 12	Sistema de torrefação de cavaco de eucalipto.....	41
Figura 13	Comportamento dos macrocomponentes da biomassa durante a torrefação....	42
Figura 14	Amostras secas e trituradas.....	52
Figura 15	Teor de voláteis.....	55
Figura 16	Relação entre o teor carbono fixo e de voláteis.....	56
Figura 17	Teor de cinzas.....	58
Figura 18	Influência da temperatura e da umidade no poder calorífico superior.....	62
Figura 19	Variação do PCS em relação à temperatura de torrefação.....	63
Figura 20	Curva de deconvolução.....	64
Figura 21	Termogravimetria e termogravimetria derivativa da biomassa seca (a), torrefeita a 250 (b), a 290 (c) e 310 °C (d), sob fluxo de N ₂	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Composição química de folhosas e coníferas.....	21
Tabela 2	Caracterização de madeira torrefeita.....	34
Tabela 3	Análises realizadas.....	44
Tabela 4	Análise imediata.....	53
Tabela 5	Análise elementar.....	59
Tabela 6	Composição química elementar para biomassa torrefeita obtido na literatura.....	60
Tabela 7	Poder calorífico superior e inferior.....	61
Tabela 8	Resultado das análises estatísticas.....	67
Tabela 9	Valores de “F” (Análise de variância – ANOVA).....	68
Tabela 10	Resultados teste de Tukey.....	68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABRAF	Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas
ANOVA	Análise de Variância
ASTM	American Society for Testing and Materials
BEN	Balanco Energético Nacional
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CIENAM	Centro Interdisciplinar de Energia e Ambiente
CF	Carbono Fixo
C.V.	Coefficiente de Variação
CZ	Teor de Cinzas
d	Densidade
DESVPAD	Desvio Padrão
DTG	Análise Termogravimétrica Diferencial
ERB	Energias Renováveis do Brasil
GEE	Gases de Efeito Estufa
Labcat	Laboratório de Catálise e Materiais
LEN	Laboratório de Energia e Gás
MV	Materiais Voláteis
MME	Ministério de Minas e Energia
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico
OIE	Oferta Interna de Energia
PCI	Poder Calorífico Inferior (MJ mol ⁻¹)
PCS	Poder Calorífico Superior (MJ mol ⁻¹)
ρ	Massa Específica
TCD	Detector de Condutividade Térmica
tep	Toneladas Equivalentes de Petróleo
TGA	Análise Termogravimétrica
TOP	Combined Torrefaction and Pelletisation
U	Umidade

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	13
1.1.	OBJETIVOS.....	14
1.1.1.	Objetivo Geral	14
1.1.2.	Objetivos Específicos	15
2.	REVISÃO DO ESTADO DA ARTE	16
2.1.	MATRIZ ENERGÉTICA.....	16
2.2.	BIOMASSA.....	19
2.2.1.	Biomassa lignocelulósica: Madeira	20
2.2.1.1.	<i>O eucalipto como fonte de energia</i>	24
2.3.	PROCESSOS DE TRANSFORMAÇÃO ENERGÉTICA.....	27
2.3.1.	Desenvolvimento histórico da torrefação e densificação	28
2.3.2.	Tratamento térmico: Torrefação	30
2.3.2.1.	<i>Característica da biomassa torrefeita</i>	35
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	40
3.1.	MATÉRIA PRIMA.....	40
3.2.	TRATAMENTO TÉRMICO.....	40
3.3.	CARACTERIZAÇÃO DO CAVACO DE EUCALIPTO.....	43
3.3.1.	Teor de umidade	43
3.3.2.	Análise imediata	45
3.3.3.	Análise elementar	48
3.4.	PODER CALORÍFICO.....	49
3.5.	ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA.....	50
3.6.	ANÁLISES ESTATÍSTICAS.....	50
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	52
4.1.	CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DE CAVACO DE EUCALIPTO.....	52
4.1.1.	Análise imediata	52
4.1.2.	Análise elementar	59
4.2.	PODER CALORÍFICO.....	60
4.3.	ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA.....	63
4.4.	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	66
5.	CONCLUSÕES	70

6. SUGESTÕES DE PROJETOS FUTUROS.....	70
REFERÊNCIAS.....	73
APÊNDICE.....	79
A – ANÁLISE ESTATÍSTICA (ANOVA).....	79

1. INTRODUÇÃO

A situação ambiental atual, consequência do uso dos combustíveis fósseis como principal fonte de energia, estimula a busca por fontes alternativas na matriz energética e por combustíveis mais limpos. Uma alternativa promissora pode ser a biomassa, fonte de energia primária e renovável, capaz de garantir o desenvolvimento econômico com inclusão social, reduzindo a agressão ao meio ambiente.

Entretanto, a biomassa apresenta algumas características indesejáveis, o que dificulta seu uso direto como combustível. Um dos problemas básicos da biomassa como fonte de energia é a sua baixa densidade energética, que eleva o custo do transporte e inviabiliza a logística. Uma maneira de reduzir esta limitação consiste no aumento de seu poder calorífico através da pirólise, associada ao aumento de sua densidade aparente pela compressão.

O Brasil possui um grande potencial para produção de biomassa, é um dos países que possui maior abundância de energia renovável do mundo, e diferente dos outros países, possui algumas vantagens para liderar a agricultura de energia, entre as quais se destaca a capacidade de incorporar novas áreas à agricultura para geração de energia sem competir com a agricultura de alimento e com impactos ambientais limitados ao socialmente aceito.

O Brasil apresenta grandes plantações de eucalipto, uma cultura com manejo, controle de pragas e logística já conhecidos. A utilização do eucalipto para geração de energia é viável por se tratar de uma planta lenhosa. Por causa da estrutura fibrosa e da tenacidade das plantas lenhosas o consumo de energia na etapa de moagem é maior, mas com o tratamento térmico a mobilidade é melhorada (CHEN et al., 2011).

A pirólise pode ser dividida em três tipos em função da temperatura: torrefação (250 - 300 °C), carbonização (300 - 600 °C) e gaseificação (> 600 °C). A torrefação consiste em um tratamento térmico da madeira, para diminuir o teor de umidade e de voláteis, e aumentar o poder calorífico do produto. O processo, além de melhorar as características energéticas da

madeira, é capaz de produzir diversos tipos de combustíveis em função dos parâmetros de operação (DOAT, 1985; FELFLI et al., 1999).

O processo de densificação da biomassa consiste em comprimir uma massa de partículas a pressões elevadas, o que acarreta no aumento da temperatura, provocando a plastificação da lignina, resultando nos briquetes ou *pellets*.

A torrefação e a densificação podem ser complementares ao considerar os prós e os contras de seus produtos resultantes. A implantação da torrefação no processo de densificação, teoricamente, oferece soluções para os problemas encontrados com a degradação biológica e da durabilidade dos *biopellets*. O acréscimo do processo de compactação posteriormente ao de torrefação oferece soluções para certos problemas da biomassa torrefeita, como o baixo volume de densidade energética e a formação de poeira.

Após o processo de densificação, os produtos sólidos da biomassa apresentam um menor volume, maior estabilidade e uma maior densidade energética, o que torna o custo de armazenagem e transporte menor (CHEN e KUO, 2010). Com a logística viabilizada e as mudanças favoráveis das propriedades da biomassa torrefeita, esta possui diferentes finalidades para sua aplicação.

Dentro deste contexto, este estudo teve como objetivo caracterizar energeticamente as amostras de cavaco “in natura” e torrefeita para avaliar a influência do processo de torrefação nas propriedades da madeira para que esta seja usada como combustível.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

O presente trabalho teve como objetivo geral caracterizar energeticamente as amostras de cavaco in natura e torrefeita para avaliar a influência os benefícios do processo de

torrefação nas propriedades da madeira de *Eucalyptus grandis* para que seja usada como combustível.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar energeticamente as amostras de cavaco de eucalipto pela análise elementar, análise imediata, teor de umidade e poder calorífico;
- Comparar os resultados da caracterização das amostras de cavaco in natura e torrefeitas, avaliando os efeitos do processo de torrefação nas propriedades físico-químicas da madeira;
- Determinar a faixa de temperatura de decomposição da hemicelulose, celulose e lignina por termogravimetria;

2. REVISÃO DO ESTADO DA ARTE

2.1. MATRIZ ENERGÉTICA

A partir da matriz energética é possível conhecer os diferentes tipos de energia que são utilizados em um país. No Brasil, a lenha tem sido uma fonte de energia de grande importância presente, principalmente nas residências, para cocção e aquecimento. Durante o ciclo da cana de açúcar a lenha era usada no aquecimento do caldo de cana e produção do açúcar. A invenção da máquina a vapor proporcionou um grande salto tecnológico. Com isso, os novos processos produtivos exigiam uma maior contribuição energética, necessitando de um combustível mais eficiente e abundante. Com o uso do carvão mineral no Brasil, a lenha, que antes era utilizada nas locomotivas a vapor, foi substituída pelo carvão mineral. O carvão também foi destinado para iluminação pública, residências e na produção de gás (MOURA; GOMES; PANZERA, 2010).

Entre as décadas de 20 e 30, com o aumento do uso dos automóveis, o Brasil começou a importar petróleo e seus derivados. Apenas no final da década de 60 que se deu início as prospecções de petróleo no fundo do mar. A crise do petróleo nos anos 70 estimulou investimentos em novas tecnologias para o uso de recursos naturais renováveis, como também políticas públicas foram criadas, como no caso do Proálcool em 1975. A implantação do Proálcool proporcionou mudanças significativas na matriz energética brasileira. A produção de biodiesel, a importação e descoberta de maiores jazidas de gás natural também foram fatores que provocaram alterações na matriz energética brasileira (RODRIGUES, 2009).

A Figura 1 representa a proporção de energia renovável e não renovável da matriz energética brasileira até o ano de 2013. Verifica-se que a matriz energética brasileira apresenta uma maior quantidade de energia renovável que a dos demais países em geral. Mas com uma pequena redução devido à menor oferta de energia hidráulica O Brasil possui a matriz

energética mais renovável do mundo industrializado com 41 % de sua produção proveniente de fontes como recursos hídricos, biomassa e etanol, além da energia eólica e solar (BEN, 2014).

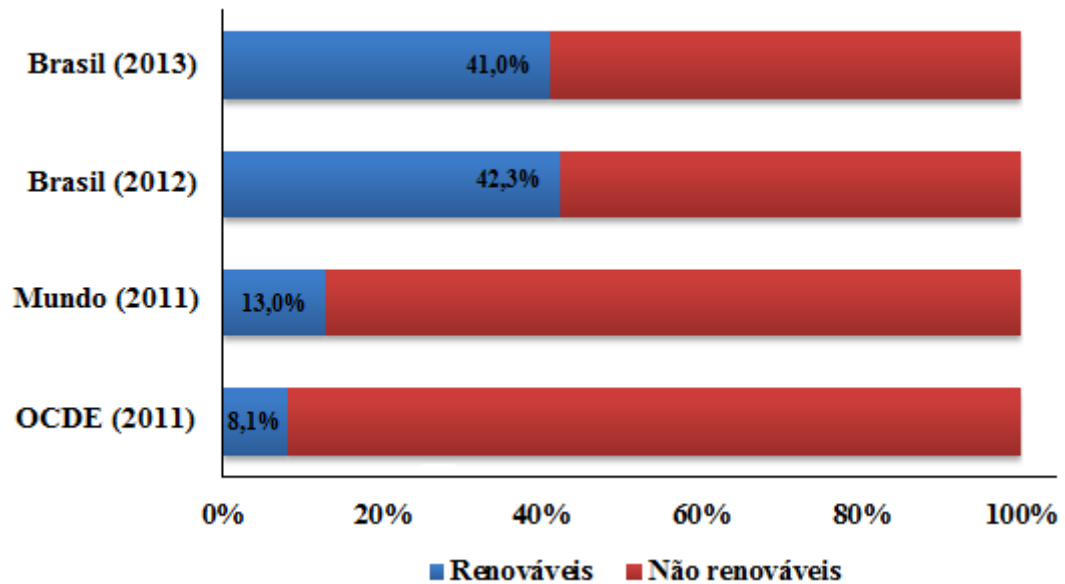


Figura 1 – Matriz Energética Brasileira 2013.

Fonte: BEN, 2014 (Ano base 2013) (Adaptado).

Além do uso da lenha, do álcool e do biodiesel, no Brasil, praticamente toda a eletricidade é gerada em fontes hídricas, e não a partir do carvão, como ocorre na maioria dos outros países. A matriz energética mundial está se reorientando para o aumento da contribuição de fontes renováveis de energia, que são, em geral, produzidas localmente, como energia eólica, captação direta de energia solar e o uso de biomassa sob diversas formas, como o etanol da cana de açúcar ou diretamente a partir de celulose.

Em 2012, a oferta interna de energia – OIE, atingiu o montante de 283,6 milhões de tep – toneladas equivalentes de petróleo, na matriz energética brasileira, sendo que a fatia que corresponde à biomassa contribui com uma oferta interna de energia de 28,6 %, como ilustrado na Figura 2 (MME, 2012). Dessa fatia que corresponde à biomassa, 4,1% representa outras fontes, como por exemplo, os briquetes e os *pellets*, biocombustíveis sólidos.

A valorização da biomassa como insumo energético moderno surgiu na década de 70 com as crises do petróleo (1973 e 1979), passando a ser considerada uma alternativa viável para atendimento das demandas por energia térmica e de centrais elétricas. Entretanto, a partir de 1985, os preços do petróleo voltaram a despencar, diminuindo novamente o interesse em energias alternativas. Mas já na década de 90, a biomassa voltou a ganhar destaque no cenário energético mundial devido ao desenvolvimento de tecnologias mais avançadas de transformação, pela ameaça de esgotamento das reservas de combustíveis fósseis, pela incorporação definitiva da temática ambiental nas discussões sobre desenvolvimento sustentável e pela assinatura do Protocolo de Kyoto em 1997 (BORGES, 2011; SILVA, 2013).

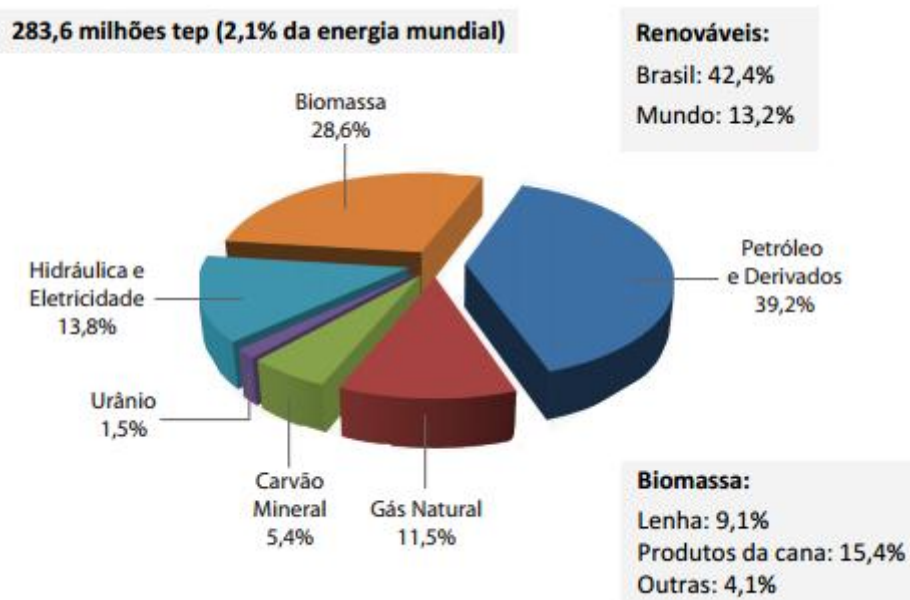


Figura 2 – Oferta Interna de Energia no Brasil

Fonte: MME, 2012 (Ano base 2011).

O Brasil é um dos países que possui maior abundância de energia renovável do mundo, e, diferente dos outros países, possui algumas vantagens para liderar a agricultura de energia. Desta forma, o país possui a possibilidade de utilizar a agricultura para geração de energia

sem intervir na agricultura para alimentação. Além da disponibilidade de terras e condições climáticas favoráveis.

2.2. BIOMASSA

A biomassa é uma alternativa de fonte primária e renovável, que favorece a diminuição do aquecimento global e do efeito estufa, entre outras vantagens. Segundo Rodrigues (2009), a biomassa é o produto da conversão da energia luminosa em energia química através da reação de fotossíntese.

A biomassa possui grandes vantagens ambientais, já que pode ser reciclada e reutilizada, favorecendo a diminuição do aquecimento global e do efeito estufa, entre outras vantagens. Se utilizada da maneira correta, pode ser também uma fonte de energia sustentável. O processo de renovação realiza-se pelo ciclo de carbono, em que as plantas capturam o CO₂ da atmosfera (Figura 3). A utilização da biomassa de madeira torna-se sustentável quando a oferta do insumo se dá por meio de manejo florestal adequado ou de resíduos florestais, industriais ou urbanos. Entretanto, em muitos países, uma parcela da oferta de madeira ainda é oriunda de desmatamentos. Outro fator importante para a sustentabilidade do uso da biomassa como energia é a correta contabilização de todas as emissões de gases causadores do efeito estufa, ao longo de toda a cadeia, incluindo as rotas de conversão utilizadas (BNDES, 2011; VAN DER STELT et al., 2011).

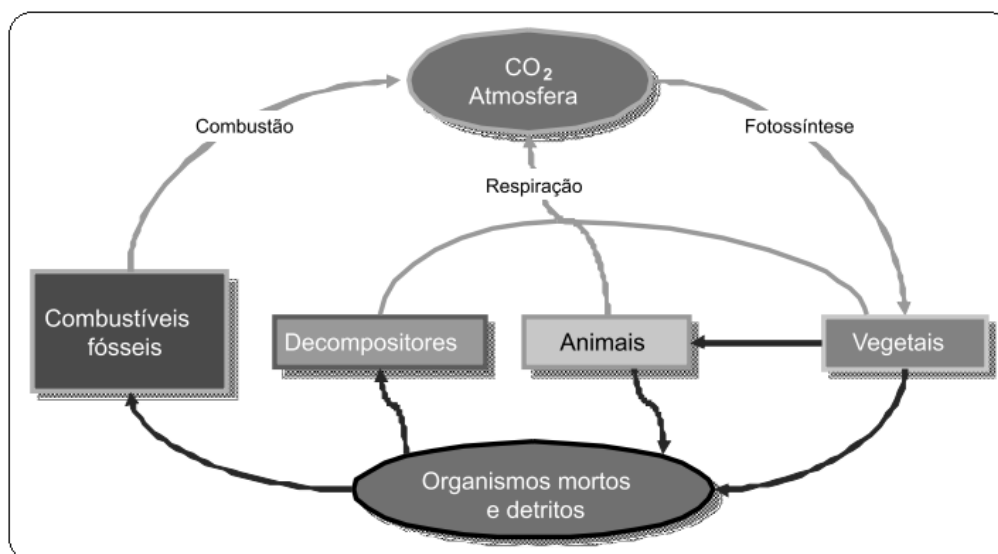


Figura 3 - Esquema Simplificado do Ciclo de Carbono

Fonte: BNDES, 2011

De acordo com Vieira (2005), a utilização da energia da biomassa consiste no uso de resíduos florestais, agrícolas; lenha; resíduos orgânicos industriais ou domésticos; outras fontes de matérias orgânicas para a geração de calor, eletricidade.

O aproveitamento de biomassa para produção de energia vem despertando cada vez mais interesse no Brasil. Um país que tem um grande potencial para utilização de fontes renováveis. Porém, ainda convive com o desperdício e a falta de consciência de grande parte da população. Nesse âmbito, o peso das metas governamentais se faz presente, colocando o mercado europeu como destaque no âmbito global. O aumento do uso de *pellets* (combustível orgânico cilíndrico obtido a partir da compressão da biomassa) na União Europeia é cada vez maior. Os países da Europa mais desenvolvidos no setor de *pellets* são a Alemanha, Suécia e Áustria, os quais desenvolveram seus próprios padrões de pelletização, enquanto outros países importantes, como a Finlândia e a Dinamarca, optaram por utilizar uma norma europeia comum para biocombustíveis sólidos CEN/TS 14961. Do lado das rotas de conversão, a tendência é que, de forma crescente, a produção de energia de biomassa ocorra em biorrefinarias, nas quais os biocombustíveis para transporte, energia elétrica, calor, químicos e outros produtos de mercado serão produzidos por meio de diferentes tipos de biomassa,

extraindo o máximo aproveitamento dos insumos utilizados (BNDES, 2011; FELFLI *et al.*, 2011; KARKANIA; FANARA; ZABANIOTOU, 2012).

2.2.1. Biomassa lignocelulósica: Madeira

Em geral, pode-se afirmar que a madeira é quimicamente constituída, sem considerar as quantidades mínimas de inorgânicos, por carbono (C), oxigênio (O), hidrogênio (H) e pequenas quantidades de nitrogênio (N). A ausência de enxofre na sua composição é uma das vantagens para seu uso como combustível, pois garante a não formação de dióxido de enxofre (SO₂), não contribuindo assim, com o aquecimento do planeta e as chuvas ácidas. A combinação dos elementos orgânicos (C, H, O) forma os principais constituintes da madeira: celulose, hemicelulose e lignina. As quantidades desses polímeros variam de acordo com o tipo de madeira (folhosa ou conífera), como pode ser visto na Tabela 1 (TSOUMIS, 1991).

Tabela 1 – Composição Química de Folhosas e Coníferas

Tipo	Celulose	Hemicelulose	Lignina
	%		
Coníferas	40 – 45	7-14	26 - 34
Folhosas	38 – 49	19 – 26	23 - 30

Fonte: RODRIGUES, 2009 (Adaptado).

As coníferas se caracterizam principalmente por ter suas sementes expostas e folhas em formas de agulhas. Já as folhosas possuem folhas largas e suas sementes são cobertas.

Segundo Rodrigues (2009), mesmo existindo diferença macroscópica entre os diferentes grupos de árvores e dos indivíduos da mesma espécie, as células vegetais que compõe a madeira apresentam o mesmo padrão.

A parede das células vegetais é formada por diversos carboidratos e proteínas solúveis. Mas, a maior parte é tipicamente formada por uma rede de fibras cristalina de celulose entrelaçadas por fios de hemicelulose e os espaços vazios dessa trama são preenchidos por uma substância chamada lignina.

- **Celulose**

A celulose é um homopolímero linear composto por unidades de β -D-glicose ($C_6H_{12}O_6$). Um polissacarídeo formado pela polimerização de milhares de monômeros de glicose. Representa cerca de 40 a 45 % da massa seca da madeira, sendo o principal constituinte da parede celular. Por ter uma forte tendência em formar ligações de hidrogênio intramoleculares e intermoleculares, as moléculas de celulose se associam em microfibrilas, formando assim, regiões cristalinas e amorfas. As microfibrilas se agregam em fibrilas, formando as fibras de celulose (TSOUMIS, 1991; SJÖSTRÖM; WESTERMARK, 1999).

A celulose é o principal componente celular vegetal. É o polímero que age como barreira seletiva e tem a capacidade de suportar tensões mecânicas externas e pressões osmóticas (BARRETO, 2009).

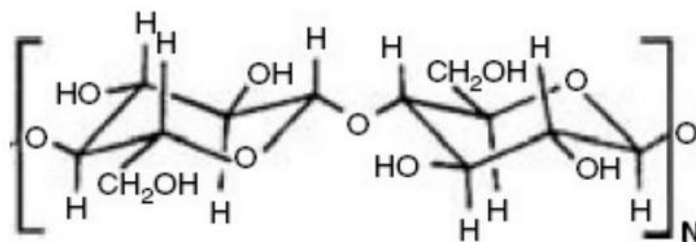


Figura 4 – Estrutura da Celulose

Fonte: RODRIGUES, 2009

- **Hemicelulose**

A hemicelulose é um polissacarídeo essencialmente linear de baixo peso molecular. Responsável por aproximadamente 20-30 % da massa seca da madeira. É constituída pela

polimerização de um número muito grande de açúcares, principalmente as pentoses, possuindo assim, uma estrutura menos regular que as celulosas. Sua principal função é proporcionar a sustentação da parede celular. Devido à presença de várias unidades de açúcares distintos na sua composição a hemicelulose envolve as fibras de celulose (SJÖSTRÖM; WESTERMARK, 1998). Browing (1963) relata que as hemiceluloses são mais higroscópicas que os demais componentes e são facilmente hidrolisadas por ácidos.

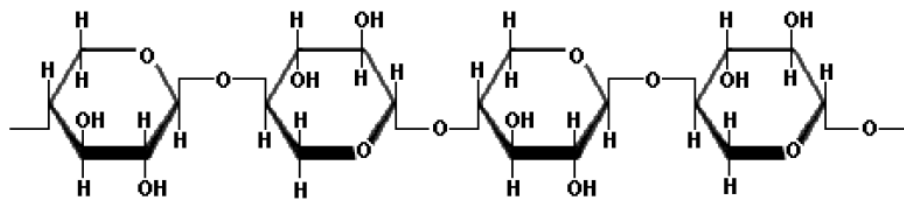


Figura 5 – Estrutura da Hemicelulose

Fonte: BORGES, 2011

- **Lignina**

A lignina mesmo sendo constituída por um número grande de açúcares possui diversos anéis aromáticos na sua estrutura (unidades de fenil-propano), o que a torna um polímero de alto peso molecular, amorfa e hidrófoba. Normalmente, o teor da lignina na madeira varia entre 20 a 33 %, de massa da madeira seca. Sabe-se que a lignina tem como função o reforço da estrutura celular (SJÖSTRÖM; WESTERMARK, 1998). Segundo Barreto (2009) a lignina é responsável pela impermeabilidade e resistência a ataques microbiológicos e mecânicos aos tecidos vegetais. Pelo fato de proporcionar rigidez mecânica à planta, a lignina é comumente encontrada em vegetais lenhosos.

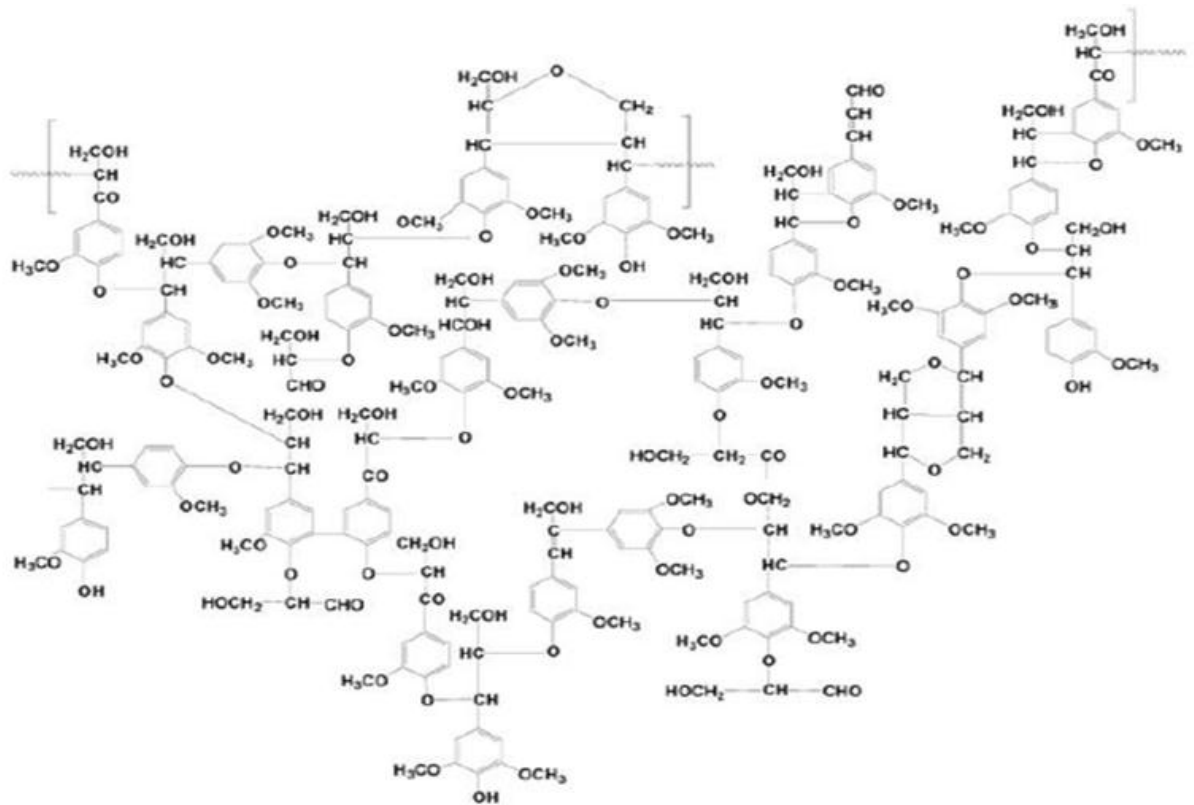


Figura 6 – Estrutura da Lignina

Fonte: SILVA, 2013

2.2.1.1. *O eucalipto como fonte de energia*

O Brasil é um dos poucos países que fazem uso de florestas plantadas destinadas para produção de biomassa para energia (florestas energéticas) em larga escala, principalmente pela excepcional produtividade dessas florestas. Além de o país ter as condições edafoclimáticas necessárias, outro fator que também proporcionou o desenvolvimento do setor de árvores plantadas no Brasil foi o salto tecnológico industrial, onde as técnicas de implantação, manejo e exploração foram aprimoradas. De acordo com a Figura 7, observa-se que o Brasil obteve melhores produtividades de árvores folhosas e coníferas, em relação aos demais países. Todo esse desenvolvimento qualifica o país para a exploração de florestas

plantadas, por meio do aproveitamento da sua biomassa, sem promover o desflorestamento (ABRAF, 2013; BNDES, 2011).

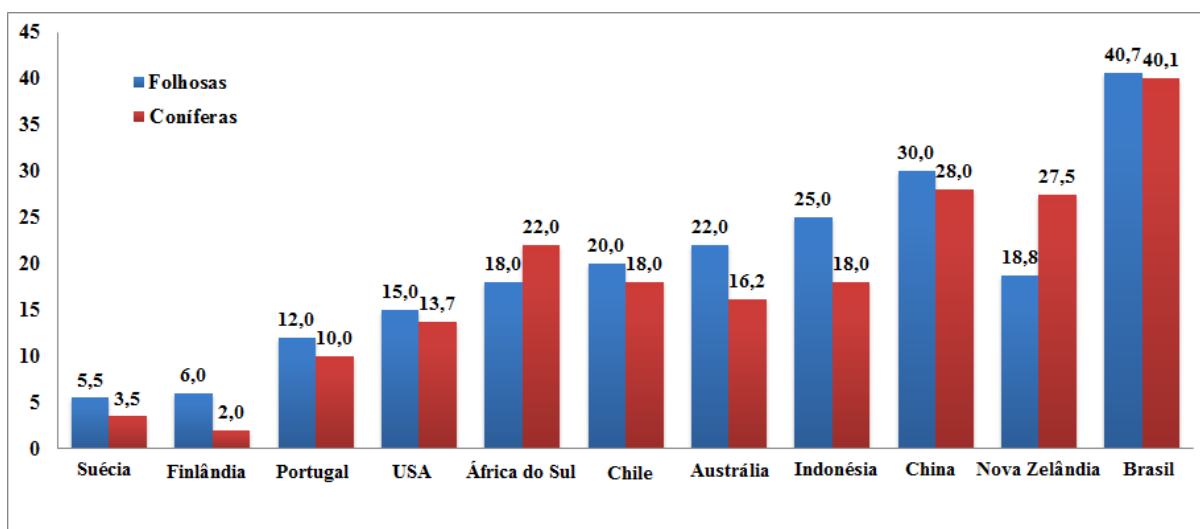


Figura 7 – Produtividade de árvores coníferas e folhosas no mundo (m³/ha.ano).

Fonte: ABRAF, 2013 (Adaptado).

Segundo Pires (2007), o eucalipto foi introduzido no Brasil em 1825. Mas somente em 1903 teve início a sua utilização para fins econômicos, utilizado com a finalidade de produção de dormentes ferroviários. A partir de 1940, a cultura de eucalipto passou a ser utilizada como uma alternativa de insumo energético (carvão vegetal), na alimentação das caldeiras das locomotivas, na substituição do coque no setor siderúrgico (BOAS, 2011).

O gênero *Eucalyptus* ocorre naturalmente na Austrália e as espécies se adaptam às diversas condições de solo e clima. Além da alta capacidade de regeneração por brotação, o que facilita a sua dispersão (PIRES, 2007).

Segundo Oliveira et al. (1999), o eucalipto é um gênero representado por árvores com alta taxa de crescimento, grande capacidade de adaptação às condições ambientais, forma retilínea do fuste, desrama natural e madeira com variações nas propriedades tecnológicas, adaptadas às mais variadas condições de uso.

Por ser uma cultura que não precisa de terrenos de alta fertilidade, que não exige muitos defensivos agrícolas e, principalmente pelo Brasil apresentar condições ambientais favoráveis ao seu plantio, todas as espécies de eucalipto são cultivadas aqui. Segundo Barcellos (2007), as espécies mais utilizadas são o *E.grandis*, *E. tereticornis*, *E. citriodora*, *E. saligna*, *E. camaldulensis*.

Em 2012, a área de plantios florestais com *Eucalyptus* no Brasil totalizou 5.102.030 ha, 53,0 % estava concentrado na região sudeste. Para o mesmo ano, tem-se a distribuição da área plantada por estado, em que os estados de Minas Gerais, São Paulo, Bahia, Mato Grosso do Sul, Rio Grande do Sul, Espírito Santo e Paraná detinham 83,6 % dos plantios do gênero *Eucalyptus*, como ilustrado na Figura 8 (ABRAF, 2013).

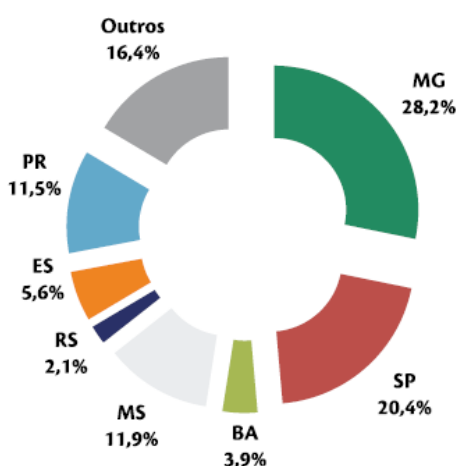


Figura 8 - Percentual da área de plantios de eucalipto por estado em 2012.

Fonte: ABRAF, 2013.

A espécie mais cultivada no Brasil é o *Eucalyptus grandis*. Essa espécie apresenta elevada produtividade, rápido crescimento, densidade básica em torno de 500 kg/m³, sua madeira apresenta usos múltiplos e baixa estabilidade dimensional (BARCELLOS, 2007). A plantação de eucalipto no Brasil é na grande maioria destinada para indústria de papel e celulose, atuando também no setor de carvão vegetal para o uso siderúrgico e metalúrgico (BOAS, 2011).

Por se tratar de uma planta lenhosa, o eucalipto apresenta um grande potencial energético. A biomassa de eucalipto pode ser usada para geração de energia com vantagens, como baixo custo de aquisição e alto potencial energético. Mas no Brasil ainda são poucas as empresas que já começaram a pesquisar e investir neste potencial. Como exemplo, a ERB – Energias Renováveis do Brasil, que em parceria com a Dow Brasil inaugurou, em março de 2014, uma planta de cogeração de vapor e energia gerados a partir de biomassa de eucalipto na unidade de Aratu. A energia limpa substituirá parte do gás natural que abastece esta unidade (SITE DOW ¹).

Devido ao crescimento rápido o eucalipto ajuda a absorver o gás carbônico da atmosfera devolvendo oxigênio à natureza, minimizando assim, os gases de efeito estufa. O efeito estufa é um fenômeno natural. Consiste, basicamente, na ação dos gases de efeito estufa (GEE) sobre os raios infravermelhos refletidos pela superfície da terra, reenviando-os para ela, mantendo assim uma temperatura estável no planeta. Porém, com o aumento da utilização dos combustíveis fósseis a emissão dos gases estufa na atmosfera aumentou, potencializando esse fenômeno natural, causando um aumento da temperatura da terra. Os principais gases desse efeito são: dióxido de carbono (CO₂), clorofluorcarbono (CFC), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O) e ozônio (O₃).

A produção de madeira com finalidade energética é associado a impactos negativos, como o desmatamento e degradação de uso de solo, subemprego e condições insalubres de trabalho. Entretanto, a madeira é uma forma de energia renovável que apresenta vantagens ambientais, como a conservação de solo e proteção dos mananciais, e caráter global, pois atenua as emissões de gases de efeito estufa. Uma das grandes vantagens quando se utiliza biomassa de madeira, é o uso dos resíduos para produção de coprodutos. Não competindo assim, com o mercado de celulose, que utiliza os troncos da madeira.

Para que o eucalipto se transforme em material energético é necessário que passe por um processo de conversão energética, pois a biomassa “in natura” apresenta algumas características que restringem o seu uso direto como combustível, tais como a alta umidade,

¹ Disponível em < <http://www.dow.com/brasil/noticias/release.aspx?id=190>>. Acessado em: 20 abr. 2014.

baixo poder calorífico e baixa densidade (GONÇALVES, 2010). Os processos de transformação energética podem ser: pirólise, gaseificação, densificação, combustão direta, fermentação e torrefação, variando de acordo com o produto desejado.

2.3. PROCESSOS DE TRANSFORMAÇÃO ENERGÉTICA

O uso de biomassa tem como vantagens as suas técnicas de utilização. A transformação energética da biomassa de madeira está alicerçada a processos químicos, termoquímicos, físicos e biológicos. As possíveis vias de transformação energética da biomassa em seus principais produtos estão ilustradas na Figura 9. Esses sistemas de conversão podem ser comparados em termos de eficiência energética, emissões de carbono e custo. A adequação de cada processo depende mais da infraestrutura existente e das condições de mercado do que das condições intrínsecas de cada processo. As tecnologias de aproveitamento energético da biomassa que serão descritas e discutidas no presente trabalho são a torrefação e a densificação (BNDES, 2011; RODRIGUES, 2009).

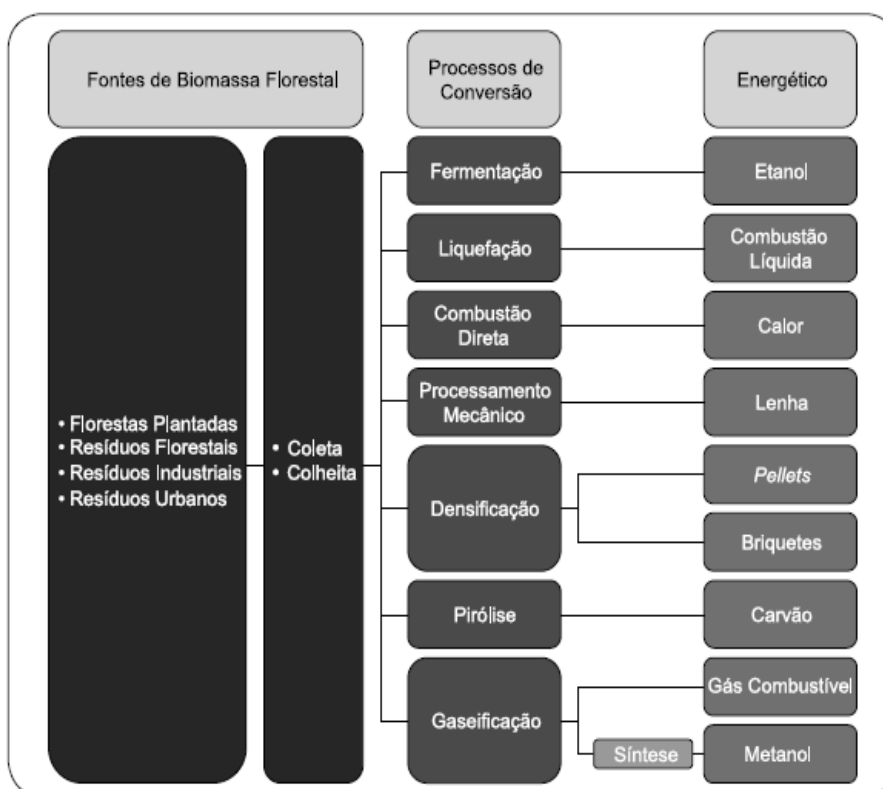


Figura 9 – Processos de Conversão Energética da Biomassa de Madeira

Fonte: BNDES, 2011.

2.3.1. Desenvolvimento histórico da torrefação e densificação

As primeiras publicações sobre tecnologias de torrefação de madeira datam de início do século XX, mas o termo “torrefação” já era utilizado na França para designar o processo de aquecimento intenso de matérias para eliminar umidade. O termo “torreficado” tem origem na palavra francesa *torréfié* que, por sua vez, deriva do latim *torrere*. (LUENGO; FELFLI; BEZZON, 2006).

Na década de 40, propostas de diferentes tecnologias para produção de combustíveis torrefeitos já eram analisadas. Durante a Segunda Guerra Mundial havia uma necessidade estratégica de busca de novas alternativas de fontes energéticas. Foi durante essa época que essas novas tecnologias foram propostas. E é nesse cenário que o processo de torrefação se

encaixa como um método de melhoria da qualidade da madeira usada nos gasogênios, que eventualmente poderia produzir gás para substituir os derivados do petróleo. No entanto, com o fim da guerra os preços do petróleo caíram e a torrefação deixou de ser conveniente, e os gasogênios entraram em desuso (LUENGO; FELFLI; BEZZON, 2006).

Já na década de 80, devido às crises existentes do petróleo, o interesse na torrefação ressurgiu, mas, agora, a busca de aplicações é mais ampla. No entanto, mesmo com uma gama maior de pesquisas sendo realizadas, ainda são poucas as plantas de torrefação em escala comercial. Como exemplos de empresas que produzem e vendem biomassa torrefeita e compactada (pellets) com finalidade energética, podem-se citar a Topell Energy², na Holanda; New Biomass³, nos Estados Unidos; e Andritz⁴, que está construindo uma nova planta piloto na Dinamarca.

Brito (1993) apresentou, no Brasil, as primeiras referências sobre o emprego do tratamento térmico de madeira, referente ao processo de torrefação. Todavia, a grande maioria dos trabalhos realizados na área é de países europeus, sendo a França pioneira nessa linha de pesquisa e uso dessa tecnologia.

Já em relação aos processos de densificação, em 1848 foi concedida uma patente (US Pat. 5739, 29 ago. 1848) para Willian Easby nos Estados Unidos, para um método, através de pressão, de conversão de carvão moído em torrões sólidos. Somente quatorze anos depois, em Paris, que surgiu a palavra briquete como sendo uma mistura de turfa, água e argila plástica. Desde então, a tecnologia do briquete de madeira avançou lentamente transformando-se em um biocombustível sólido com apelo ambiental (GENTIL, 2008).

Segundo Gentil (2008) desde 1924 os briquetes de madeira são produzidos pelas Indústrias Ford Motor Company, na cidade de Kingsfors, nos Estados Unidos. Era utilizada para produção das carrocerias dos automóveis aquela época. Na década de 1940, a primeira briquetadeira brasileira foi importada da Alemanha, da marca Hansa, para uma indústria do

² Disponível em: < <http://www.topellenergy.com/>>. Acessado em: 05 mar. 2015.

³ Disponível em: < <http://newbiomass.com/>>. Acessado em: 05 mar. 2015.

⁴ Disponível em: < <http://www.andritz.com/group.htm>>. Acessado em: 05 mar. 2015.

estado de Santa Catarina. Já a fabricação da primeira briquetadeira brasileira ocorreu em 1985, fabricada pela empresa Biomas Indústria de Máquinas Ltda.

Segundo Couto (2004), citado por Gentil (2008), os briquetes estão sendo cada vez mais utilizados nas empresas de serviços alimentares. Isso é devido a sua qualidade ambiental, menor produção de fumaça, fácil manuseio e estocagem ou cheiro para os ambientes onde é demandado. O maior mercado de briquete no Brasil é São Paulo, onde os briquetes são utilizados normalmente em pizzarias, padarias. A maior parte da demanda é feita pelas indústrias e agroindústrias para uso em fornalha para calor e caldeiras para vapor.

2.3.2. Tratamento térmico: Torrefação

Existem várias técnicas aplicadas no tratamento térmico da biomassa, no entanto, a base principal é a mesma, ou seja, a madeira é aquecida a alta temperatura e na ausência de oxigênio. Mas não é somente o nível da temperatura que influencia no produto final desejado, outros fatores também influenciam nas transformações sofridas pela madeira ao longo do processo, tais como a velocidade de aquecimento, o tempo de aquecimento, o tipo de biomassa, a atmosfera, a pressão etc. (PINCELLI; BRITO; CORRENTE, 2002).

Durante o tratamento, ocorrem mudanças na natureza dos constituintes químicos da madeira, que se decompõem em diferentes formas, dependendo da temperatura do processo. As hemiceluloses, por serem mais sensíveis ao calor, se degradam mais facilmente, assim como os extrativos da madeira. Mas estes podem se volatilizar durante o aquecimento. Já a celulose e a lignina se degradam mais lentamente (OLIVEIRA, 2009).

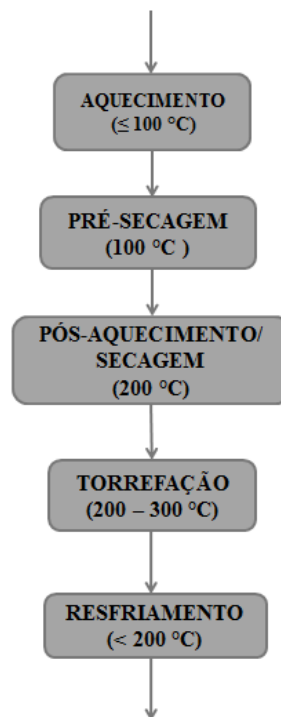
Segundo Figueroa e Moraes (2009), as hemiceluloses além de serem menos resistentes ao calor possuem uma estrutura heterogênea e baixo peso molecular, em relação aos demais constituintes. Por isso, as hemiceluloses são os primeiros polímeros da madeira a sofrer alterações sob a ação do calor, fenômeno que ocorre entre 160 e 260 °C. A celulose se decompõe entre 200 e 280 °C, já a lignina, por ser o polímero mais resistente, sofre alterações significativas entre 225 e 245 °C, dando origem a produtos fenólicos (BOAS, 2011).

A torrefação tem como finalidade a obtenção de um produto sólido, um intermediário entre a biomassa “in natura” e o carvão, para fins energéticos. O processo de torrefação é uma tecnologia capaz de melhorar as características da biomassa para a combustão e aplicações de gaseificação. Trata-se de um pré-tratamento térmico realizado à pressão atmosférica, na ausência de oxigênio.

A torrefação é um pré-tratamento térmico que ocorre na fase endotérmica da pirólise, entre 250 e 300 °C. O objetivo do processo é concentrar a energia da biomassa em curto tempo e obter altos rendimentos, operando a baixas taxas de aquecimento e com temperaturas moderadas, para permitir que os voláteis de maior poder calorífico fiquem retidos no produto sólido final. O produto final sólido final é denominado biomassa torrefeita ou torrificada, um produto com características entre a biomassa in natura e o carvão (DOAT, 1985).

De acordo com Bergman et al. (2005a), o processo de torrefação é dividido em cinco etapas principais, como pode ser visto na Figura 10. Inicialmente, a biomassa é aquecida até que o estágio de secagem seja atingido. A partir de 100 °C, a água livre é evaporada em temperatura constante. Na etapa pós-aquecimento e secagem, a temperatura é aumentada até 200 °C, para que água ainda seja liberada. Nessa fase pode ocorrer perda de massa por evaporação. A temperatura de torrefação é definida como a temperatura máxima constante (acima de 200 °C), em que ocorre maior perda de massa. Durante a torrefação, a hemicelulose volatiliza, e a massa resultante torna-se hidrofóbica, modificação benéfica para o transporte da biomassa. O processo volatiliza os compostos orgânicos da madeira, perdendo parte do conteúdo energético mas ocorre aumento da densidade energética da massa resultante. Por fim, o produto torrefeito, um produto intermediário entre a madeira seca e o carvão vegetal, é resfriado abaixo de 200 °C. (VAN DER STELT et al., 2011).

BIOMASSA



BIOMASSA TORREFEITA

Figura 10 – Etapas do processo de torrefação

Fonte: BERGMAN et al., 2005a (Adaptado).

Em uma torrefação típica, 70 % da massa permanecem como produto sólido com 90 % da energia inicial e 30 % é formado por subprodutos que contêm apenas 10 % do conteúdo energético da biomassa (BERGMAN, 2005).

O processo de torrefação apresenta um rendimento gravimétrico médio de 75 %, com um poder calorífico de 5.200 a 6.000 kcal/kg (22.000 a 25.000 kJ/kg). A madeira torrefeita retém 70 a 90% da massa inicial, o tratamento também diminui o teor de matérias voláteis de 80 % para 60-75% e o teor de umidade de 10 % para 0-3 % (PRINS; PTASINSKI; JANSSEN, 2006).

Uma das grandes dificuldades da gaseificação da biomassa relaciona-se à redução do tamanho das partículas e, posteriormente, ao transporte pneumático da biomassa em pó. A estrutura fibrosa da biomassa dificulta a redução das partículas. A torrefação é um tratamento

térmico capaz de melhorar as características de redução de tamanho. Segundo Felfli; Luengo e Suarez (2000), o processo de torrefação gera modificações em algumas propriedades da madeira, juntamente com ajustes de temperatura e do tempo de processo, e obtêm-se produtos com propriedades energéticas diferentes, devido à diferença na quantidade de carbono fixo e dos teores de voláteis.

As variações de tempo e temperatura do processo de tratamento térmico estão de acordo com a finalidade da madeira torrefeita. Segundo Rodrigues (2009), esta madeira, para o uso energético, é benéfica à diminuição da higroscopicidade, pois garante melhor eficiência na geração de energia térmica. Já, no caso da construção civil, a madeira supramencionada não é favorável à diminuição das propriedades mecânicas, pois impede que a mesma seja utilizada para funções estruturais, contudo, é adequado o aumento da durabilidade biológica e da estabilidade dimensional.

Bergman et al. (2005a) realizaram um programa experimental de torrefação com reatores múltiplos em escala laboratorial. O trabalho revelou a influência da temperatura e do tempo de residência. Foi observada também uma melhoria substancial da moabilidade e do comportamento de fluidez da biomassa após a torrefação. Deng et al. (2009) também verificaram que a temperatura e o tipo de matéria-prima têm forte influência no processo de torrefação. O aumento de temperatura aumenta a produção de materiais voláteis, incluindo líquidos e gases condensáveis.

Pentananunt et al. (1990) estudaram as características de combustão da madeira em um processo de torrefação em unidade de bancada. Verificou-se que a madeira torrificada apresentou, de forma significativa, uma maior taxa de combustão e produziu menos fumaça que a madeira sem tratamento. Prins, Ptasinki e Janssen (2006) realizaram uma análise termodinâmica da combinação do processo de torrefação com a gaseificação de biomassa. A pesquisa foi focada na cinética do processo de torrefação e na análise dos produtos. De acordo com o balanço de massa e de energia. Eles concluíram que, entre 250 e 300 °C, o processo de torrefação é levemente endotérmico.

O processo de torrefação reduz a razão O/C da biomassa, assim como aumenta a fração de carbono elementar. Na Tabela 2, pode-se verificar que, com o aumento da temperatura, a quantidade de carbono fixo aumenta e a quantidade de voláteis retidos na biomassa diminui, o que faz o Poder Calorífico Superior (PCS) aumentar, tornando a biomassa torrefeita mais energética. Além disso, pode-se verificar que a variação do tempo, para uma mesma temperatura, também ocasiona alteração na caracterização dos briquetes.

Tabela 2 – Caracterização de Madeira Torrefeita

Temperatura (°C)	Tempo	Voláteis	Carbono Fixo	Cinzas	PCS
	Horas	% b.s.	% b.s.	% b.s.	kJ/kg
220	0,5	75,2	18,2	6,6	20426
	1	74,6	19	6,4	20989
	1,5	73,6	19,8	6,6	21065
250	0,5	65,2	27	7,8	21209
	1	65	27,2	7,8	22061
	1,5	60	32,1	7,9	22674
270	0,5	55,7	34,6	9,7	22772
	1	52,1	38,2	9,7	22981
	1,5	41	49,2	9,8	23066

Fonte: FELFLI, 1999 (Adaptado).

Durante o início da combustão ocorre desprendimento dos componentes mais voláteis (gases de torrefação), que são principalmente: hidrogênio, hidrocarbonetos, monóxido de carbono e dióxido de carbono. Como as temperaturas do processo não são tão altas, não acontece reações secundárias, logo não ocorre craqueamento do alcatrão. O alcatrão é obtido através da queima do carvão vegetal, mas as condições do processo de torrefação não levam à formação de carvão vegetal.

Após o processo de torrefação, os produtos de biomassa sólida têm um menor volume e maior densidade de energia do que a biomassa “in natura” e, portanto, o custo de armazenamento e transporte é reduzido. Se os produtos sólidos são prensados em briquetes, sua densidade energética é melhorada. Com o aumento da boa afiação dos produtos sólidos que compõem a biomassa, este combustível pode ser usado em larga escala em uma caldeira.

Lipinsky (2002) relata que uma das alternativas para melhorar o mercado de combustíveis alternativos é através da combinação do processo de torrefação com outros processos, como a compactação, co-combustão e gaseificação, de forma a aumentar ainda mais o potencial da torrefação. O processo de torrefação, combinado ou não com outro processo, faz com que a biomassa sofra alterações benéficas nas suas propriedades, para que assim possa ser utilizada de forma mais eficiente nos processos desejados.

O processo de torrefação possibilita a produção de combustíveis para diferentes finalidades. Felfli; Luengo e Suarez (2000) destacam algumas aplicações para este produto: como combustível de uso doméstico por possuir baixas emissões de fumaça durante a combustão; combustível de uso industrial em caldeiras para a produção de vapor, podendo substituir o carvão mineral através do “co-firing” em caldeiras; redutor em processos metalúrgicos devido ao seu alto teor de carbono fixo, pois a madeira torrefeita é um redutor reativo e de alta resistência mecânica; uso em gaseificadores, pois sua padronização facilita a regulação e a otimização do processo de gaseificação.

2.3.2.1. *Característica da biomassa torrefeita*

O processo de torrefação provoca mudanças nas propriedades da madeira. As características alteradas são o aumento da estabilidade dimensional, o aumento da resistência a ataques de organismos xilófagos (bactérias e fungos), a diminuição da higroscopicidade e a diminuição das propriedades mecânicas. Essas propriedades variam especialmente com o aumento da temperatura, como também da velocidade de aquecimento, das propriedades iniciais da madeira e do tempo de campanha (RODRIGUES, 2009).

As características da madeira torrefeita variam principalmente em função da temperatura e do tempo de processamento (FELFLI; LUENGO; SUAREZ, 2000). Bergman (2005) afirma que a definição do tempo de torrefação pode causar dificuldades na interpretação do processo, pois muitas vezes não há como distinguir o aquecimento da secagem.

A madeira torrefeita é um produto intermediário entre a madeira seca e o carvão vegetal. Durante a torrefação, as hemiceluloses volatilizam, e a massa resultante torna-se hidrofóbica. O processo volatiliza os compostos orgânicos da madeira, perdendo alguma energia, mas ocorre aumento da densidade energética da massa resultante. Além das melhorias das propriedades energéticas é esperada que a madeira torrefeita seja mais fragmentável, devido à redução da sua resistência físico-mecânica, característica favorável para transformação do material para a forma pulverizada, como na fabricação de briquetes e/ou *pellets*.

O tratamento térmico da madeira aumenta a resistência à degradação fúngica, não tendo efeito sobre a resistência à degradação de térmitas (cupins). Outras características da madeira após o processo de torrefação são o aumento da dureza, redução à flexibilidade da madeira, alteração de composição e redução de higroscopicidade, conferindo-lhe uma melhor estabilidade dimensional (RODRIGUES, 2009).

A temperatura e a umidade relativa do ar são alguns dos principais fatores para o equilíbrio da madeira. Com o aumento de temperatura, o teor de umidade diminui, principalmente quando as temperaturas são acima de 100 °C. As pequenas modificações químicas, em especial a degradação parcial das hemiceluloses, resultam na redução da característica higroscópica da madeira. Embora a umidade não seja considerada uma característica intrínseca da madeira, o seu estudo é indispensável por se tratar de um parâmetro que afeta o comportamento da biomassa, quanto à durabilidade natural, estabilidade dimensional e resistência mecânica (SILVA; OLIVEIRA, 2003).

Segundo Silva e Oliveira (2003) a madeira é um material orgânico e de estrutura complexa e heterogênea, extremamente higroscópica, contraindo ou inchando de acordo com a umidade do ambiente. Quando a madeira não perde e nem absorve água do ambiente, a

madeira está em equilíbrio com a umidade do ar, o que é chamado de umidade de equilíbrio da madeira. A madeira deverá sempre ser utilizada com uma umidade próxima ao teor de umidade de equilíbrio higroscópico. Nessa condição a madeira não irá mais apresentar problemas associados à retratibilidade.

A torrefação é uma maneira de se obter madeiras com maior estabilidade dimensional, pela diminuição da sua característica higroscópica. Uma alternativa para aumentar a densidade energética do combustível e viabilizar a logística do mesmo é a combinação do processo de torrefação seguida de um processo de densificação.

A densificação é um processo de compactação que consiste, basicamente, na aplicação de pressão a uma massa de partículas, com ou sem adição de ligante, produzindo combustível de alta qualidade, com maior densidade, poder calorífico elevado, umidade uniforme, queima uniforme e maior rendimento na eficiência de queima e liberação de calor.

Briquetagem e peletização são os processos de densificação energética da biomassa mais comuns. Esses processos ocorrem a elevadas temperaturas e pressões, tendo como produto um biocombustível sólido, denominado de briquete ou *pellet*. O princípio de ambos os processos é o mesmo, a plastificação da lignina, que atua como o elemento aglomerante das partículas da madeira. A peletização é um processo de extrusão mais exigente que a briquetagem, e o tamanho dos briquetes são maiores que a dos *pellets* (MIGLIORINI, 1980).

Segundo Gentil (2008), o processo de densificação pela briquetagem consiste na compactação em elevadas pressões, elevando a temperatura da serragem acima de 250 °C. A lignina, por ser um polímero termoplástico, atua como aglomerante das partículas da madeira, não sendo necessária, a utilização de produtos aglomerantes. Após o resfriamento, as partículas adensadas se colam. Segundo Bartkowiak; Zakrzewski e Ksiazczak (2006), pelo fato da lignina se solidificar na superfície, o briquete apresenta maior resistência à umidade. O processo de compactação reduz o custo de transporte, facilita o armazenamento e melhora as propriedades de combustão.

A densificação por meio da peletização é uma tecnologia comprovada para melhorar as propriedades da biomassa com vista a sua conversão em calor e energia. *Pellets*, a partir de

biomassa torrefeita, são atraentes em relação à moabilidade, combustão, armazenamento, transporte e manuseio, o que os torna atraentes como substituto do carvão. Segundo Bergman (2005), os *pellets* torrefeitos mostram melhor comportamento hidrofóbico, maior densidade que o *pellet* convencional. O processo *TOP* – *Combined Torrefaction and Pelletisation*- é a combinação do processo de torrefação com a pelletização.

Em experimentos realizados por Bergman (2005), os *pellets TOP* produzidos tiveram uma densidade energética de 14 a 18,5 GJ/m³ contra 7,8 a 10,5 GJ/m³ para biomassa não torreficada, o que demonstra a presença de vantagens na combinação desses processos. Além disso, verificou-se que os *pellets TOP*, em contraste com os biopellets convencionais, podem ser produzidos a partir de uma ampla variedade de matéria-prima com propriedades físicas semelhantes (BERGMAN, 2005). A Figura 11 ilustra as etapas de funcionamento do processo *TOP*.

Uslu, Bergman e Faaij (2008), em estudo comparativo realizado, verificaram que a densidade energética do produto do processo *TOP* é três vezes maior que a biomassa torrefeita e 1,75 vez maior que a dos *pellets* convencionais, confirmando, assim, algumas das vantagens da combinação do processo de torrefação com de peletização.

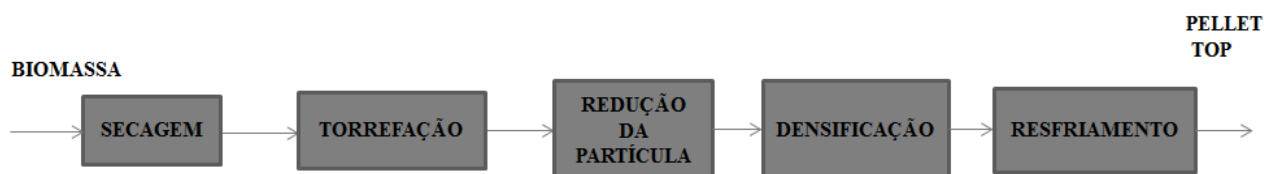


Figura 11– Esquema do Processo TOP

Fonte: BERGMAN, 2005.

Após a torrefação, os produtos de biomassa sólida têm um menor volume e maior densidade de energia do que a biomassa não tratada e, portanto, o custo de armazenamento e transporte é reduzido. Se os produtos sólidos são prensadas em briquetes/*pellets* sua densidade energética é melhorada. Com a melhora na estrutura da biomassa, o caráter hidrofóbico aumenta, e essa biomassa torrefeita pode ser utilizada como combustível em larga escala em caldeira ou em um pulverizado gaseificador de fluxo aprisionado.

A revisão do estudo da arte permite observar que o maior destino da biomassa de eucalipto é para produção de celulose, e que os resíduos não são tão aproveitados, estudados. É diante dessa limitação que se torna necessário mais estudo relacionado com o aproveitamento desses resíduos para produção de coprodutos, sem competir com o mercado de celulose, e ainda assim, contribuir socialmente, tecnologicamente e ambientalmente para sociedade. Diante desse contexto, o estudo sobre tratamentos que melhorem as propriedades energéticas desses resíduos é necessário. O processo de torrefação é um tratamento que garante essas melhorias, mas é necessário realizar uma caracterização energética para verificar a influência desse tratamento nas propriedades da biomassa.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. MATÉRIA PRIMA

Na presente dissertação foi utilizado como matéria-prima o cavaco de *Eucalyptus grandis*. O cavaco de eucalipto foi adquirido pela UFBA com aproximadamente 30% de umidade e tamanho de 2x10x12 mm.

A pesquisa foi desenvolvida no Laboratório de Energia e Gás (LEN), da Escola Politécnica; no Laboratório de Catálise e Materiais (LabCat), localizado no Instituto de Química; e nos laboratórios do Centro Interdisciplinar de Energia e Ambiente (CIENAM) da Universidade Federal da Bahia (UFBA).

3.2. TRATAMENTO TÉRMICO

Para realização da caracterização energética, foram utilizadas amostras in natura e torrefeitas. As amostras torrefeitas são provenientes de uma pesquisa realizada anteriormente no LEN. O tratamento térmico dessas amostras in natura foi dividido em duas etapas: primeiramente a secagem e em seguida o processo de torrefação (TORRES, 2011).

Durante a etapa de secagem, as amostras úmidas foram acondicionadas em caixas metálicas e posteriormente aquecidas numa mufla elétrica automática, visando à redução da umidade ao máximo possível antes do processo de torrefação. O procedimento de secagem foi realizado num patamar de temperatura de 180 °C com duração de 2 horas.

Com as amostras secas, foi possível realizar o processo de torrefação (Figura 12). As amostras foram acondicionadas em tonéis metálicos de 0,2 m³ isolados termicamente com lã de rocha, cujo aquecimento se deu pela exaustão de um motor ciclo Otto. O gás quente foi conectado lateralmente na parte inferior do tonel abaixo da tela metálica de sustentação da biomassa. Ao passar pelo leito de cavaco, o gás de combustão saía pela parte superior através

de uma conexão com rosca de 2” instalada na tampa superior do tonel. O perfil de temperatura foi monitorado ao longo da altura do tonel.

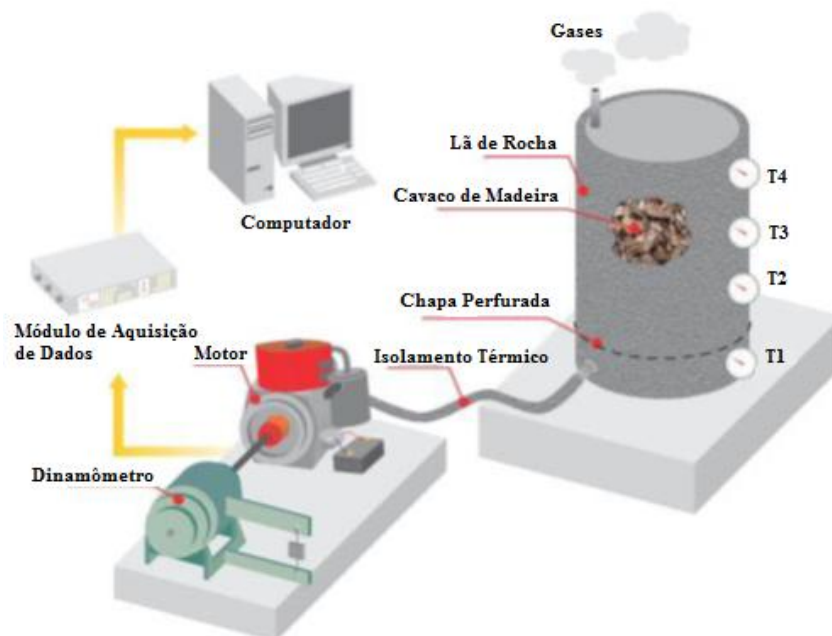


Figura 12 – Sistema de Torrefação do Cavaco de Eucalipto

Fonte: TORRES, 2011

O perfil de temperatura ao longo da altura do tonel foi monitorado por quatro termômetros bi metálicos instalados em sua lateral, sendo: 1 termômetro na entrada dos gases parte inferior do leito de secagem; 1 termômetro na saída dos gases de exaustão após passar pelo leito do experimento e 2 termômetros equidistantes em posições intermediárias do leito.

O fluxo de gases e a temperatura do gás quente foram controlados pela rotação e pela carga do motor. A rotação do motor foi manipulada pelo acelerador deste e a carga pela atuação da carga no dinamômetro hidráulico acoplado no motor. Ao atingir sua temperatura final o tonel com a amostra foi desconectado do motor isolado do contato com o ar pela instalação de *caps* nos bocais de entrada e saída e mantido abafado até atingir a temperatura ambiente. O motor com capacidade de carga de até 300 kW operou acoplado ao dinamômetro hidráulico Shenck com tacômetro para medição da rotação e com célula de carga para medição de torque.

O gráfico apresentado na Figura 13 demonstra as mudanças que ocorrem com os macrocomponentes da biomassa durante o processo de torrefação. Pode-se observar que as principais mudanças ocorrem principalmente sobre a hemicelulose, seguido pela celulose e lignina. Tumuluru et al (2010), em experimentos com resíduos (palha de arroz e de trigo) verificaram que as reações que ocorrem na faixa de temperatura de 200-300 °C são basicamente a desvolatilização e carbonização da hemicelulose; desvolatilização e despolimerização de parte da celulose e de uma pequena parte da lignina.

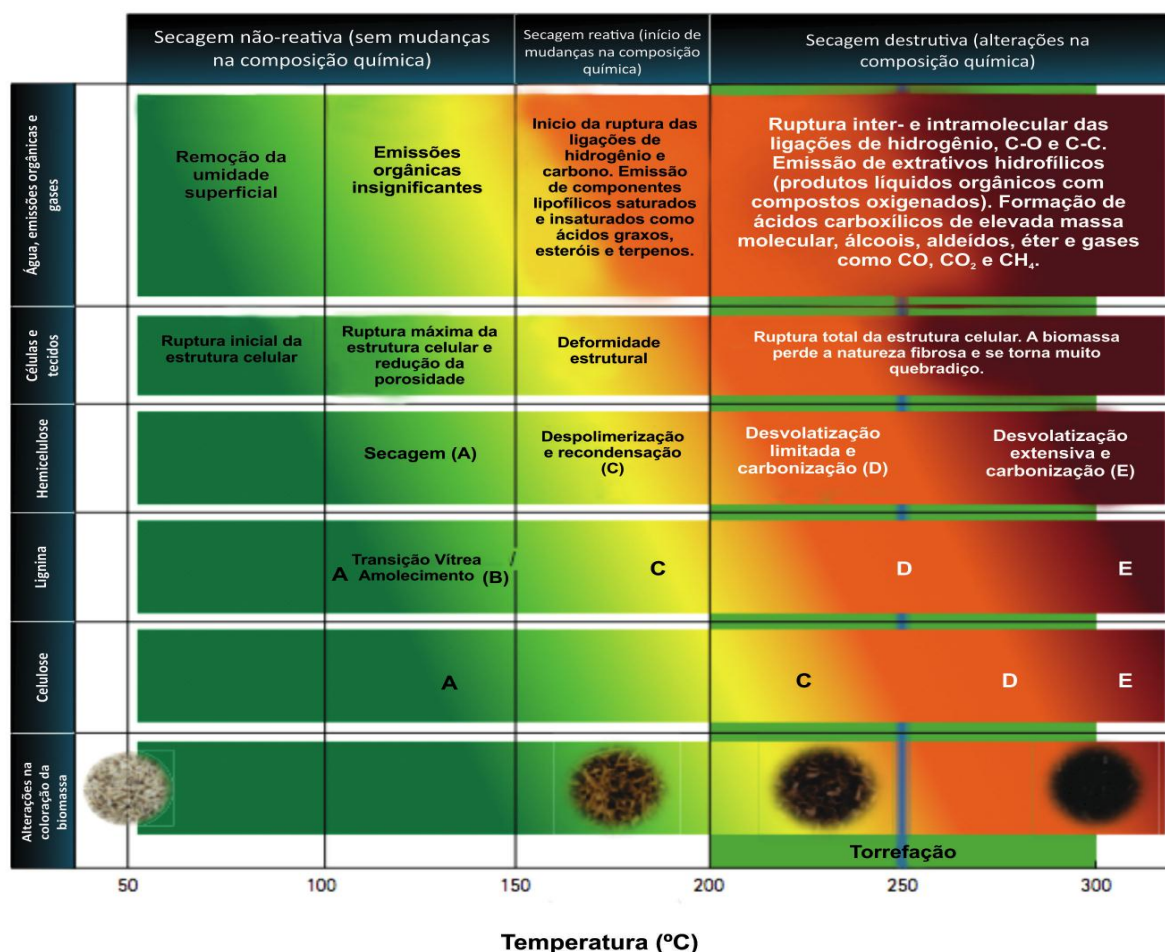


Figura 13 – Comportamento dos macrocomponentes da biomassa durante a torrefação

Fonte: MACÊDO, 2012

Após a conclusão das etapas de secagem e torrefação, foram realizadas as análises de caracterização das amostras. Para cada tipo de amostra foram separados três pequenos pacotes de 10 g. Foi analisado o poder calorífico, análise elementar, umidade, análise imediata e análise termogravimétrica.

3.3. CARACTERIZAÇÃO DO CAVACO DE EUCALIPTO

Para avaliação do potencial de um combustível, é necessário primeiramente, conhecer as características fundamentais do mesmo, que são: composição imediata, composição elementar e o poder calorífico. Essas características são consideradas, por alguns autores, as mais importantes na análise do desempenho da madeira para geração de energia.

No trabalho de Xu, Linnber e Wang (2014) além de fazerem uma avaliação técnica e econômica do processo de torrefação, eles caracterizaram as amostras de biomassa torrefeitas. A composição elementar foi determinada usando o equipamento CHNS/O; o teor de celulose, hemicelulose e lignina foram determinados através do TGA (Análises Termogravimétricas) e o poder calorífico a partir de uma bomba colorimétrica.

No presente trabalho, as amostras, “in natura” (testemunha) e torrefeita, foram secas a 105 °C por 24 horas, em uma estufa da marca Quimis, seguindo a norma ASTM E 871-82 (*Standard Test Method for Moisture Analysis of Particulate Wood Fuels*). Estas amostras foram utilizadas como referência para todos os testes.

Após a etapa de secagem, as amostras foram trituradas em frações em um liquidificador e, em seguida classificadas em uma peneira A Bronzinox de 20 MESH, para separar o material de granulometria mais grossa.

Com as amostras secas e trituradas foi possível realizar a análise imediata, a análise do teor de umidade, a análise elementar, o poder calorífico e pôde-se determinar a faixa de decomposição da hemicelulose, celulose e lignina por termogravimetria. Todas as análises foram realizadas em triplicatas e as suas metodologias estão descritas abaixo. Na Tabela 3 encontram-se as normas e equações utilizadas para realização das análises.

Tabela 3 – Análises realizadas

Análise	Norma	Equações	Nomenclatura
Teor de Umidade	ASTME 1756-08 (Standard Test Method for determination of Total Solids in Biomass)	$U (\%) = \frac{(M_U - M_S) \times 100}{M_U}$	U= teor de umidade, em %; M _U = Massa úmida (g) M _S = Massa seca (g)
Teor de Voláteis	ASTMD 5832 - 98 (Standard Test Method for volatile matter content of Activated Carbon Samples)	$MV = \frac{(m_i - m_f)}{m} \times 100$	MV = teor de voláteis (%) m _i = massa inicial do cadinho + amostra(g) m _f = massa final do cadinho + amostra(g) m = massa da amostra(g)
Teor de Cinzas	ASTMD1102-84 (Standard Test Method for Ash in Wood)	$CZ = \frac{(m_i - m_f)}{m} \times 100$	CZ = teor de cinzas (%) m _i = massa do cadinho(g) m _f = massa do cadinho + residuo(g) m = massa da amostra(g)
Carbono Fixo	Medida indireta	$CF = 100 - (CZ + MV)$	CF = teor de carbono fixo (%) CZ = teor de cinzas (%) MV = teor de voláteis (%)

3.3.1. Teor de umidade

O procedimento realizado seguiu a norma ASTM E 1756-08 (*Standard Test Method for determination of Total Solids in Biomass*) para determinação do teor de umidade.

Em cadinhos previamente secos e foram colocados de 1 a 2 g de biomassa seca a 105 °C e triturada. Em seguida, os cadinhos foram colocados em uma estufa a 105 °C e permanecem por 1 hora. Após esse tempo, os cadinhos foram pesados. O procedimento foi repetido até se obter um valor de massa constante. O teor umidade foi calculado pela Equação 1:

$$U(\%) = \frac{(M_U - M_S) \times 100}{M_U} \quad \text{eq. (1)}$$

Onde:

M_U = Massa úmida

M_S = Massa seca

3.3.2. Análise imediata

Foi calculado o teor de voláteis, cinzas e carbono fixo. Para realização das análises foram utilizados: uma balança analítica Adventurer da marca Ohaus; uma mufla EDG 3P-S da marca EDG e uma estufa da marca Quimis. Todos os experimentos foram realizados em triplicata.

- **Teor de voláteis**

O teor de voláteis é quantificado através da medição das frações de biomassa que volatilizam durante o aquecimento de uma amostra padronizada e previamente seca. Segundo Paulucio (2012), o teor de material volátil é o responsável pela estabilidade da chama e pela velocidade da combustão, pois dele decorre o aumento da permeabilidade e a diminuição da reatividade do carvão em alto-forno.

O teor de voláteis é determinado de acordo com a norma ASTM D 5832 - 98 (*Standard Test Method for volatile matter content of Activated Carbon Samples*).

Inicialmente, os cadinhos foram levados para a mufla regulada a 950 °C durante 30 minutos. Em seguida, foram retirados e colocados em um dessecador para serem resfriados até a temperatura ambiente. Com os cadinhos já tratados e à temperatura ambiente, colocou-se 1-2 g da amostra em uma mufla regulada a 950 ± 25 °C e mantidos durante 7 minutos. Após o tempo determinado, retiraram-se os cadinhos da mufla, sendo conduzidos para um dessecador para resfriar e em seguida pesados e obter o teor de voláteis. Através da diferença entre a massa final e inicial obtive-se o teor de voláteis. O teor de voláteis foi calculado pela Equação 2:

$$MV = \frac{(m_i - m_f)}{m} \times 100 \quad \text{eq. (2)}$$

Onde:

MV = teor de voláteis, em %;

m_i = massa inicial do cadinho + amostra, em g;

m_f = massa final do cadinho + amostra, em g;

m = massa da amostra, em g.

- **Teor de cinzas**

Resíduos inorgânicos resultantes da combustão dos componentes orgânicos e oxidações dos inorgânicos. O teor de cinzas da madeira corresponde, geralmente, a menos de 1 % da base de madeira seca, podendo variar dependendo da idade da madeira. As cinzas são constituídas de compostos de magnésio (Mg), potássio (K), silício (Si), cálcio (Ca) e fósforo (P) (ASSIS *et al.*, 2012).

Segundo Vieira (2012), é necessária a remoção das cinzas, pois esta em alta concentração pode diminuir o poder calorífico, causar perda de energia e interferir na transferência de calor.

O teor de cinzas foi determinado de acordo com a norma ASTM D1102-84 (*Standard Test Method for Ash in Wood*). Colocou-se de 1-2 g da amostra nos cadinhos. Em seguida, os cadinhos foram conduzidos para uma mufla pré-aquecida a 750 °C permanecendo durante 6 horas até que a amostra queimasse completamente. Após serem retirados da mufla, os cadinhos foram colocados em um dessecador até resfriarem e em seguida pesados. De acordo com a Equação 3 foi calculado o teor de cinzas:

$$CZ = \frac{(m_i - m_f)}{m} \times 100 \quad \text{eq.(3)}$$

Onde:

CZ = teor de cinzas, em %;

m_i = massa do cadinho, em g;

m_f = massa do cadinho + resíduo, em g;

m = massa da amostra, em g.

- **Teor de carbono fixo**

Segundo Santos (2008), o carbono fixo é o combustível residual da liberação dos compostos voláteis, excluindo os teores de umidade e as cinzas. Os altos índices de carbono fixo causam maior degradação térmica, conseqüentemente, reduzem o rendimento em carvão vegetal.

O teor de carbono fixo (CF) foi obtido através de uma medida indireta. Considerou-se que o teor de carbono fixo é a fração mássica que foi queimada, formando CO₂ e H₂O. Para a determinação do teor de CF foi utilizado a Equação 4:

$$CF = 100 - (CZ + MV) \quad \text{eq. (4)}$$

Onde:

CF = teor de carbono fíco, em %;

CZ = teor de cinzas, em %;

MV = teor de voláteis, em %.

3.3.3. Análise elementar

A composição elementar é uma das características mais importantes do combustível, como também é a base para análise dos processos de combustão. Esse ensaio fornece os percentuais mássicos de carbono (C), hidrogênio (H), enxofre (S), oxigênio (O), nitrogênio (N), umidade e material residual (cinzas) contidos na amostra. Uma das características técnicas mais importantes do combustível.

Segundo Nogueira (2008), a análise elementar também fornece as razões atômicas de O/C e H/C. Estas razões possibilitam o cálculo do Poder Calorífico Superior (PCS) e Poder Calorífico Inferior (PCI).

A análise elementar foi realizada utilizando o equipamento CHNS/O, analisador elementar - Perkin Elmer 2400 series II, na Central Analítica do Instituto de Química da Universidade de São Paulo (USP). Foi aplicado o método de Pregl-Dumas, em que as amostras são sujeitas à combustão em uma atmosfera de oxigênio puro, e os gases resultantes dessa combustão são quantificados em um detector TCD (detector de condutividade térmica). O teor de oxigênio foi obtido por diferença, somando-se os percentuais de carbono, hidrogênio, nitrogênio e subtraindo de 100%.

3.4. PODER CALORÍFICO

Indica a quantidade de energia, em forma de calor, que é liberada pelo combustível por unidade de massa, em sua combustão completa. Em geral, essa propriedade depende da composição da biomassa e do seu grau de umidade, relacionada diretamente com o teor de carbono fixo (VALE et al., 2002).

Segundo Vieira (2012) o poder calorífico pode ser dividido em superior e inferior. O Poder Calorífico Superior (PCS) representa a quantidade máxima de energia que pode ser obtido a partir da transferência de calor do combustível, podendo ser determinado através de uma bomba calorimétrica ou a partir da fração mássica dos componentes da biomassa. O Poder Calorífico Inferior (PCI) é a quantidade de calor liberado durante a combustão com a água no estado vapor. É obtido a partir do PCS, levando em consideração o teor de umidade presente no combustível.

O poder calorífico superior foi determinado segundo a norma ASTM D-2015 (*Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke by the Adiabatic Bomb Calorimeter*). As amostras secas inicialmente foram conduzidas a uma bomba calorimétrica, IKA (C2000 Basic), para obtenção do poder calorífico superior. O procedimento foi realizado em triplicata.

O poder calorífico inferior (PCI) foi determinado a partir da composição química elementar das amostras de acordo com a Equação 5 (Couto e Barcellos, 2011):

$$\text{PCI} = 34,03 * \text{C} + 121,64 * \text{H} - 12,54 * \text{O} \quad \text{eq. (5)}$$

Onde:

PCI = poder calorífico inferior (MJ/kg)

C = carbono (%)

H = hidrogênio (%)

O = oxigênio (%)

3.5. ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA

A análise termogravimétrica (TGA) demonstra o comportamento energético da biomassa, ou seja, os efeitos das variáveis, temperatura e tempo, do processo de torrefação sobre a perda de massa da biomassa. A partir desta análise é possível determinar os macrocomponentes da biomassa (hemicelulose, celulose e lignina). Segundo Silva (2013), a termogravimetria está baseada no estudo da variação de massa de certa amostra devido à mudança física em função da temperatura e/ou tempo.

As características de decomposição da biomassa foram analisadas por termogravimetria. As análises termogravimétricas foram realizadas em um equipamento TGA-50 Shimadzu (precisão de medida de temperatura, ± 2 °C; sensibilidade da microbalança, 0,001mg), na faixa de 250-1000 °C. As análises foram realizadas à pressão atmosférica, cerca de 10mg da amostra foi analisada a uma taxa de aquecimento de 10 °C/min sob fluxo de nitrogênio.

3.6. ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Para os dados obtidos em cada ensaio realizado, adotou-se um delineamento experimental casualizado, com apenas 1 espécie e 4 temperaturas (testemunha e biomassa tratada a 250, 290 e 310 °C), com 3 repetições, totalizando 4 tratamentos e 12 unidades amostrais. Com o propósito de verificar a influência do processo de torrefação nestes ensaios, calculou-se o coeficiente de variação e realizou uma análise de variância (ANOVA) a 5 % de probabilidade.

O coeficiente de variação (C.V.) é uma medida de dispersão relativa, que representa o desvio-padrão expresso como porcentagem da média (Equação 6). Foi empregada para estimar a precisão dos experimentos realizados, e comparar as distribuições diferentes.

$$C. V. = \frac{DESVPAD}{Média} \times 100$$

eq. (6)

Quando necessário, realizou-se o teste de TUKEY a 5 % de probabilidade para comparação das médias. A presença de letras diferentes ao lado dos resultados indica diferença significativa entre os tratamentos analisados, já as letras iguais indicam que não houve diferenças significativas. Todos os cálculos foram realizados com o auxílio do Software Microsoft Excel 2007.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DE CAVACO DE EUCALIPTO

Os resultados apresentados a seguir foram obtidos visando à avaliação do potencial da biomassa de eucalipto torrefeita para o seu uso como biocombustível sólido. Analisando os resultados da caracterização, observou-se que as condições do processo de torrefação, influenciam nas características, assim como na estrutura da biomassa.

Na Figura 14 observa-se a influência da temperatura do processo de torrefação, também na mudança de coloração das amostras. Quanto mais alta a temperatura, mais escura fica a biomassa. Isto é devido à mudança na estrutura da biomassa, principalmente da degradação da hemicelulose.

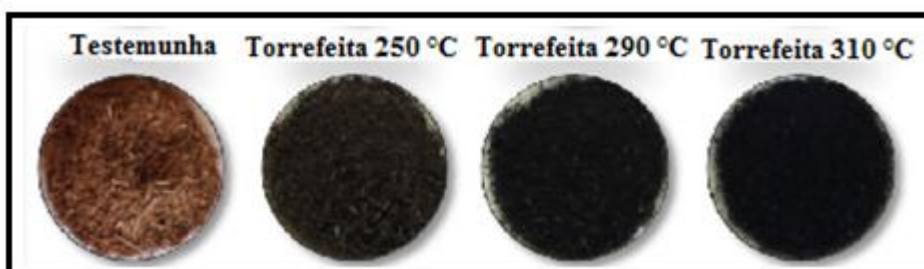


Figura 14 – Amostras torrefeitas e trituradas

4.1.1. Análise imediata

Na Tabela 4 são apresentados os valores da análise imediata do cavaco de eucalipto in natura e torrefeito.

A umidade influencia significativamente na qualidade da combustão e no poder calorífico da biomassa. Pode ser definida como a medida de quantidade de água livre na biomassa, podendo ser avaliada pela diferença entre os pesos de uma amostra, antes e logo após ser submetida à secagem (VIEIRA, 2012). A presença de água na madeira representa a

redução do Poder Calorífico Inferior (PCI), pois é necessária uma energia para evaporá-la. Além disso, se o teor de umidade for muito variável, o controle do processo de combustão pode se tornar difícil.

Analisando os resultados apresentados na Tabela 4, pode-se observar a influência da temperatura no tratamento térmico sobre os parâmetros avaliados. Com o aumento da temperatura do processo de torrefação há uma tendência da redução da umidade. O aumento da temperatura de torrefação, leva à produção da biomassa torrefeita com melhor caráter hidrofóbico. Isto pode ser explicado devido à degradação da hemicelulose, que por apresentar grupos hidroxilas na sua estrutura favorece a interação com as moléculas de água. Com a redução dos grupos hidroxilas, o teor de umidade da biomassa diminui e, conseqüentemente, o caráter hidrofóbico aumenta.

Tabela 4 – Análise imediata

Análise Imediata	Cavaco de Eucalipto Seco	Torrefeito 250 °C	Torrefeito 290 °C	Torrefeito 310 °C
Umidade (%)	9,40	3,52	3,30	2,93
Teor de Voláteis (%)	83,23	82,13	48,13	40,51
Cinzas (%)	0,56	0,34	0,84	1,26
Carbono Fixo (%)	16,42	17,36	51,02	58,22

Para Bergman et al. (2005b) o teor de umidade da biomassa torrefeita varia de 1 a 4 % em massa, dependendo das condições do processo de torrefação. Já Prins, Ptasinki e Janssen (2006) relataram que a madeira torrefeita retém 70 % a 90% da massa inicial e que seu teor de umidade reduz de 10 % para 0-3 %. Pode-se observar que os valores do teor de umidade encontrados para as amostras torrefeitas estão de acordo com a literatura. Silva (2013) também estudou a influência do processo de torrefação nas características da biomassa de eucalipto, e observou percentuais de umidade variando de 9,9 a 1,6 %.

Observa-se que, com o aumento da temperatura do processo de torrefação, o teor de matérias voláteis (MV) diminui e o teor de carbono fixo (CF) aumenta. Este comportamento

foi mais pronunciado nos tratamentos a 290 e 310 °C. O mesmo foi observado por Pincelli (2011), em tratamentos com resíduos de eucalipto e pinus, onde a maior intensidade do aumento de CF e da diminuição de MV ocorreu à temperatura de 300 °C. Já Bridgeman et al. (2008), além da temperatura, também observou a influência do tempo de residência do processo nos parâmetros analisados.

- **Voláteis**

Com relação aos voláteis, também se observa uma diminuição do seu teor de acordo com o aumento da temperatura, como pode ser observado no gráfico da Figura 15. Isso ocorre devido à degradação da hemicelulose e da celulose. Somente os voláteis de maior poder calorífico ficam retidos na biomassa torrefeita.

Os gases majoritários produzidos durante a torrefação são os: CO₂, CO, H₂ e CH₄. A produção de CO₂ durante o processo pode ser explicado pela descarboxilação de grupo ácidos ligados à hemicelulose, enquanto que o CO pode ser produzido na reação de CO₂ e de vapor de água com biochar a temperaturas mais altas.

Segundo Moraes et al. (2004), citado em BOAS (2011), o teor de voláteis varia entre 76 e 86 % em base seca. Essa faixa mencionada pelos autores é variável em função da composição química do material em estudo. Rodrigues (2009) realizou o processo de torrefação para três diferentes temperaturas (220, 250 e 280 °C) e observou que com o aumento da temperatura os materiais voláteis reduziam, sendo encontrados percentuais de 80,15 % para amostra seca e de 69,77 % na temperatura de 280 °C.

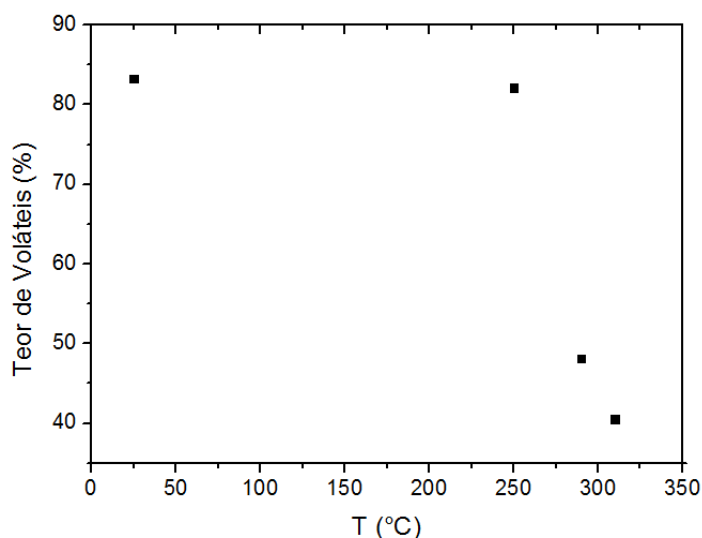


Figura 15 – Teor de voláteis

Para tratamentos com temperaturas superiores a 250 °C, os resultados estão de acordo com os encontrados por Prins, Ptasinki e Janssen (2006), que obteve uma diminuição de 80 % para 60 %, e com os de Felfli et al. (2005), que para uma hora de tratamento encontrou teores de matérias voláteis de 65 % a 250 °C e 52,1 % a 270 °C. Bridgeman et al. (2008) e Arias et al. (2008) trabalharam com espécies diferentes do *Eucalyptus grandis*. Bridgeman et al. (2008) trabalhou com a madeira de *Salix sp* e para os tratamentos realizados a 250 °C, 270 °C e 290 °C, obteve os teores de 79,8, 79,3 e 77,2 %, respectivamente. Já Arias et al. (2008) estudaram a madeira de *Eucalyptus sp*, que foi tratada durante uma hora a 280 °C, e obtiveram 61,5 % de materiais voláteis.

- **Carbono Fixo**

O teor de carbono fixo, diferente do de voláteis e do de umidade, aumentou com o aumento da temperatura. Segundo Brito e Barrichelo (1982), o teor de carbono fixo para madeira varia entre 15 e 25 %, o que mostra que os resultados encontrados para a amostra seca estavam de acordo esses autores. No entanto, pode-se observar que com o tratamento térmico esse teor aumenta, e mais ainda, com o aumento da temperatura da torrefação.

O teor de carbono fixo tem uma relação inversamente proporcional ao teor de voláteis, como pode ser visto no gráfico da Figura 16. Devido ao alto teor de extrativos voláteis na composição química da madeira, com o aumento da temperatura do tratamento térmico, o teor de carbono fixo também aumentou.

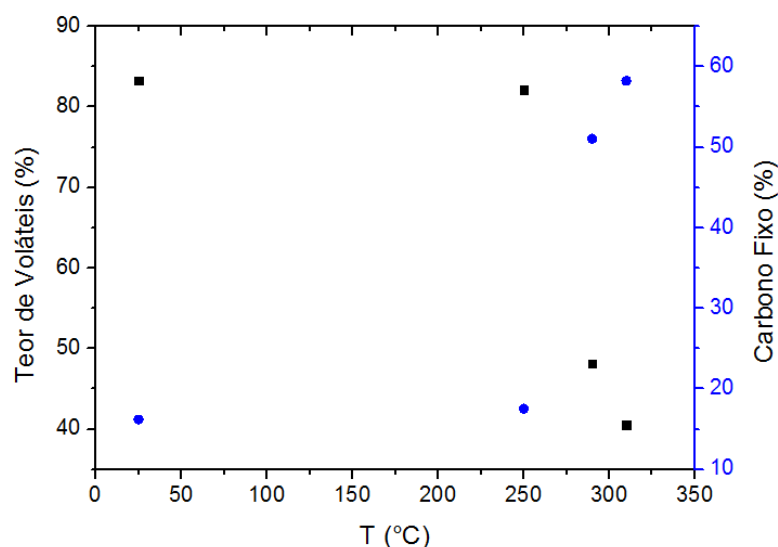


Figura16 – Relação entre o teor de carbono fixo e de voláteis

Rodrigues (2009), que estudou o efeito do processo de torrefação para fins energéticos, também verificou o aumento do carbono fixo à medida que o teor de voláteis se reduzia, devido ao aumento de temperatura. Em seu trabalho encontrou teores de 19,56 % para testemunha e de 30,06 % na temperatura de 280 °C.

Silva (2013) também estudou o condicionamento da biomassa de eucalipto para fins energéticos. Nos resultados da sua análise imediata também se observou a relação inversamente proporcional do teor de voláteis e de carbono fixo. Os resultados encontrados foram de 16,4 %, 22,2 %, 47,9 %, para as temperaturas de 200 °C, 250 °C e 300 °C, respectivamente.

Brito e Barrichelo (1978) avaliaram diferentes espécies de eucalipto e encontraram valores de carbono fixo entre 9,6 e 24,3 %. Já Felfli et al. (2003) avaliaram o efeito da

torrefação nos briquetes de madeira, e o valor médio do teor de carbono fixo, na temperatura de 270°C, foi de 38,2 %. Bridgman et al. (2008) encontraram valores de 18,6 % a 270 °C e 20,5 % a 290 °C. Arias et al. (2008) obtiveram como resultado um teor de 34,8% na temperatura de 280 °C.

- **Teor de cinzas**

Analisando-se os resultados observa-se que o teor de cinzas também aumentou com o aumento da temperatura, como pode ser visto no gráfico da Figura 17. Isso ocorre devido a maior decomposição da matéria orgânica, fazendo com que a quantidade de inorgânicos aumente. No entanto, verificou-se que houve um decréscimo com relação à amostra seca e tratada termicamente a 250 °C, valores equivalentes a 0,50 e 0,34 %, respectivamente. Segundo Rodrigues (2009), esse decréscimo pode ser devido a alguma contaminação prévia da amostra, que foi eliminada na torrefação. Ou devido à heterogeneidade da amostra e a fração de madeira que não foi totalmente torrefeita.

Pincelli (2011), também constatou que o teor de cinzas aumentou com o aumento da temperatura do processo de torrefação. No trabalho realizado por Pimchuai, Dutta e Basu (2010) com resíduos agrícolas torrificadas na faixa de 250-300 °C em nitrogênio, também foi observada a influência da temperatura do processo no aumento do teor de cinzas, concluindo-se que o teor de cinzas diminuiu com o aumento do tempo de residência (1-2 horas).

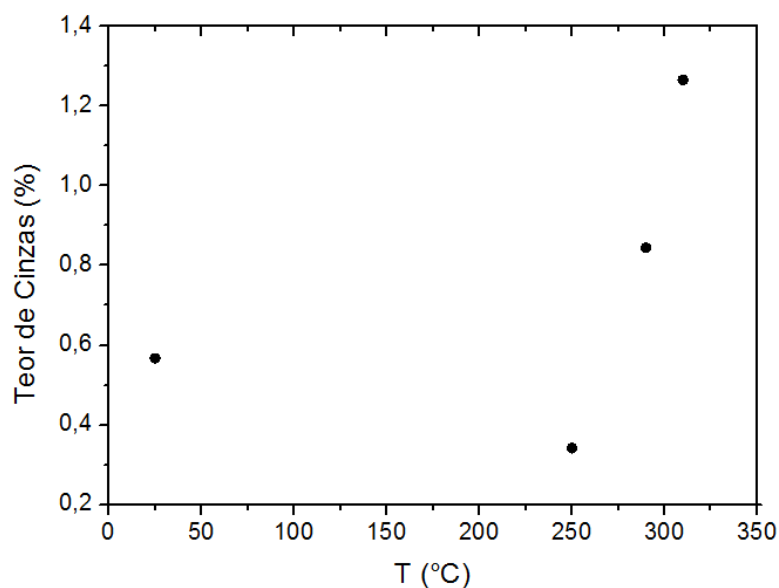


Figura 17 – Teor de cinzas

Em estudos realizados por Silva (2013), os teores de cinzas variaram de 0,2 a 0,6 %. Semelhante aos resultados obtidos por Brito e Barrichelo (1978) com espécies de eucalipto, os teores de cinzas variaram de 0,30 a 0,53 %, e por Rodrigues (2010), 0,77 % para resíduos de madeira. Esses diferentes valores evidenciam que não somente o tipo de material em estudo influencia nos resultados, mas também as propriedades e condições de processo.

O teor de cinzas é um parâmetro importante e que deve ser avaliado quando se utiliza madeira com a finalidade energética, pois quanto maior o teor de cinzas, maior a influência negativa no poder calorífico da biomassa, e maior porcentagem de impurezas no combustível. Além disso, o teor de cinzas também afeta nos custos de processamento da conversão global da biomassa em energia (PINCELLI, 2011).

Segundo Browning (1963) e Barcellos et al. (2005), os teores de cinzas na madeira correspondem geralmente a menos de 1 % na base seca. Os resultados encontrados estão de acordo com os desses autores, exceto para biomassa torrefeita na temperatura de 310 °C, cujo teor de cinzas foi de 1,26 %. Esse valor superior a 1% é pelo fato de toda matéria orgânica ter sido decomposta, restando apenas o material inorgânico. Com base na literatura e nos

resultados obtidos, o material em estudo pode ser considerado apto para aplicação como combustível em relação aos teores encontrados.

4.1.2. Análise elementar

Na Tabela 5 pode-se observar que, com o aumento da temperatura, a quantidade de carbono fixo aumenta e a quantidade de voláteis retidos na biomassa diminui o que faz o poder calorífico superior aumentar, tornando a biomassa torrefeita mais energética.

Tabela 5. Análise Elementar

Análise Elementar	Cavaco		Cavaco Torrefeito		
	“in natura”	250 °C	290 °C	310 °C	
C (%)	46,81	47,35	63,76	69,64	
H (%)	6,11	6,08	4,24	4,30	
O (%)	46,76	46,28	31,68	25,80	
N (%)	0,12	0,11	0,13	0,07	
S (%)	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	
Cl (%)	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	
Razão O/C	1,00	0,98	0,50	0,37	
Razão H/C	0,13	0,13	0,07	0,06	

Também se pode observar uma diminuição do teor de oxigênio bem como de hidrogênio nas amostras à medida que a temperatura de torrefação aumenta, acompanhada de um aumento do teor de carbono. A perda de H e O está ligada a formação de água, CO e CO₂ durante a degradação da hemicelulose e da celulose. A principal consequência é o aumento do poder calorífico, em função do enriquecimento do carbono fixo. Com o aumento da fração de carbono elementar, devido ao aumento da temperatura do processo de torrefação, as razões O/C e H/C diminuem, o que garante uma maior quantidade de energia retida no produto sólido final.

Os valores encontrados na análise elementar estão de acordo com os valores do trabalho de Prins; Ptasinski e Janssen (2006), sobre o processo de torrefação para produção de bioenergia. Esses autores também concluíram que com o aumento da temperatura de torrefação o teor de carbono aumenta e a razão O/C diminui. Estes autores obtiveram como resultado da composição elementar 55 a 60 % de carbono, 5 a 5,5 % de hidrogênio, 0,1 a 0,2 % de nitrogênio e 35 a 38 % de oxigênio.

Na Tabela 6 encontram-se os resultados da análise elementar de alguns autores para comparar com os valores obtidos. É possível notar que os valores obtidos também estão de acordo com esses outros autores.

Tabela 6 – Composição química elementar para biomassa torrefeita obtida na literatura

Temperatura (°C)	Análise Elementar (%)				Fonte
	C	H	N	O	
200	48,61	6,44	5,41	39,54	Silva (2013)
250	52,61	6,12	5,27	36,00	
300	61,00	5,47	5,35	28,17	
200	52,30	6,30	–	41,40	Wenzl (1970) citado em Rodrigues (2009)
300	73,20	4,90	–	21,90	
–	55-60	5-5,5	0,1-0,2	35-38	Doat (1985)

4.2. PODER CALORÍFICO

O poder calorífico da madeira de eucalipto, com 30% de umidade (típico de um eucalipto após o corte e um período de manejo antes do uso como combustível), é de 3850 kcal/kg (16,12 MJ/kg). Esse valor varia de 3700 a 4000 kcal/kg (15,49 a 16,74 MJ/kg). Após o processo de torrefação a biomassa apresenta um poder calorífico que varia de 4700 a 5300 kcal/kg (19,68 a 22,19 MJ/kg) (JENKINS, 1990). Analisando a Tabela 7 é possível perceber que os poderes caloríficos das amostras tratadas não se encontram na faixa citada, com exceção da amostra torrefeita a 250 °C.

Tabela 7 - Poder Calorífico Superior e Inferior

TORREFAÇÃO	PCS (MJ/kg)		PCI (MJ/kg)	
	Média	Erro padrão	Média	Erro padrão
"in natura"	17,957	0,097	17,483	0,365
250 °C	18,412	0,045	17,685	0,004
290 °C	24,291	0,004	22,865	0,171
310 °C	25,975	0,031	25,682	0,062

De acordo com a Tabela 7 observa-se que a menor média de poder calorífico foi para o tratamento de 250 °C (18,412 MJ/kg). Já a maior média de PCS obtido foi de 25,975 MJ/kg a 310 °C. Estes resultados estão de acordo com os resultados encontrados por Almeida; Brito e Perre (2009), que citaram valores médios de 5182 kcal/kg (21,7 MJ/kg) e 5493 kcal/kg (23,0 MJ/kg) para *Eucalyptus grandis* nas temperaturas de 250 e 280 °C. Todos os trabalhos citados evidenciaram a tendência do aumento do poder calorífico com o aumento da temperatura do processo de torrefação.

De acordo com Bergman e Kiel (2005), o aumento do poder calorífico após o processo de torrefação é devido à grande perda de oxigênio durante o tratamento, que ocorre através da eliminação da água de desidratação de todos os produtos da reação orgânica (ácido acético, metanol, furfural) e dos gases, principalmente, o CO₂ e CO.

Conforme mostrado na Figura 18, observa-se uma relação inversamente proporcional entre o poder calorífico superior e o teor de umidade. À medida que a temperatura aumenta, o PCS aumenta e o teor de umidade diminui. Isto é devido às modificações da estrutura dos macrocomponentes da biomassa. Com a degradação de hemicelulose e a degradação parcial da celulose e da lignina, reduz a quantidade de hidroxilas, diminuindo o teor de umidade e de voláteis, e aumentando o teor de carbono fixo. Conseqüentemente, o poder calorífico superior aumenta.

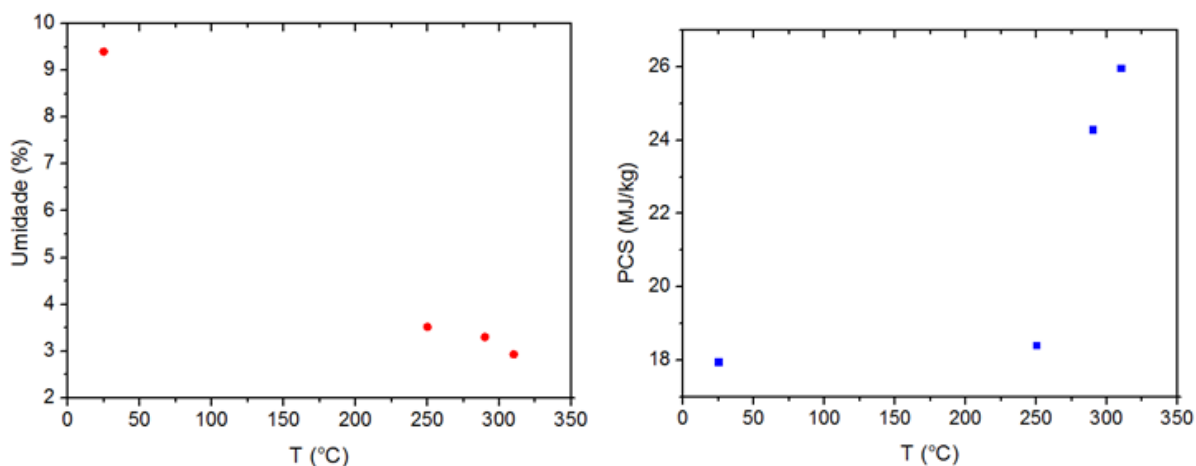


Figura 18 – Influência da temperatura e da umidade no poder calorífico superior

Analisando-se a Figura 18 pode-se perceber que o PCS aumenta à medida que a umidade diminui. Isto ocorre devido ao aumento da temperatura do processo de torrefação, que faz com que reduza o teor de água na biomassa torrefeita, tornando mais fácil a decomposição da biomassa (SILVA, 2013). A menor quantidade de água na composição da biomassa contribui para que uma menor energia seja necessária para vaporizá-la antes de iniciar a decomposição da biomassa.

Jara (1989), citado em Pincelli (2011), concluiu que, além da umidade, a constituição química da madeira também influencia no poder calorífico superior da mesma, e que quanto maior o teor de lignina e de extrativos, maior o PCS. Browning (1963) explica que o motivo do poder calorífico superior ser maior para madeira de maior teor de lignina e extrativos é pelo fato destes constituintes apresentarem menor oxigênio que os polissacarídeos na celulose e hemicelulose.

Os resultados evidenciam uma tendência do aumento do poder calorífico superior com o aumento da temperatura (Figura 19). Com o aumento da temperatura, o teor de carbono aumenta e, conseqüentemente, o poder calorífico também. Segundo Phanphanich e Mani (2011), a faixa de temperatura em que se constatou o aumento do poder calorífico com o aumento da temperatura foi entre 225 e 300 °C e 30 minutos de tempo de residência.

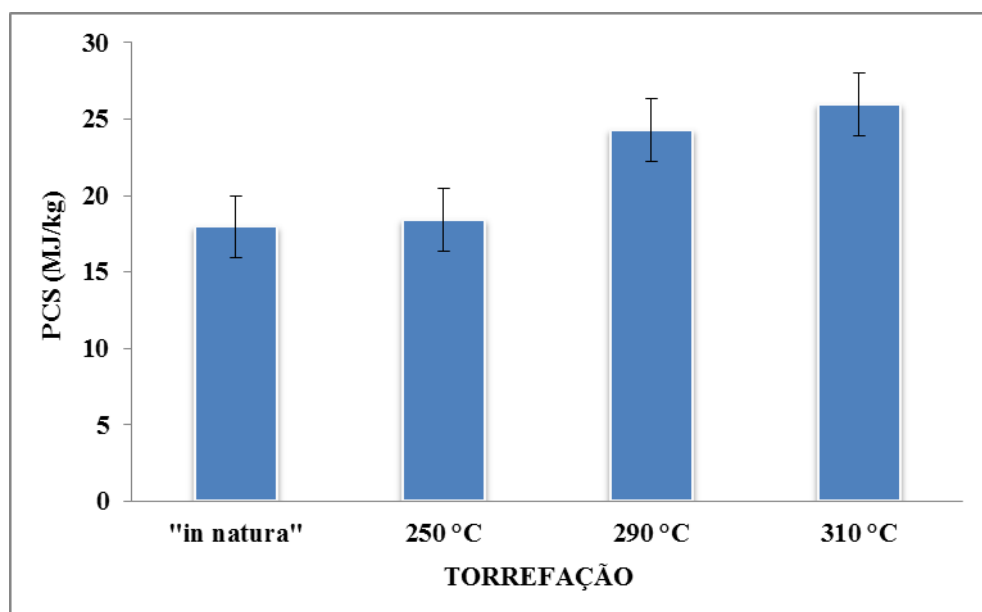


Figura 19 – Variação do PCS em relação à temperatura de torrefação

Os valores obtidos estão de acordo com a literatura. Doat (1985) relatou que o poder calorífico superior para madeira torrificada variava de 21,8 a 25,1 MJ/kg. Uslu, Bergman e Faaij (2008) observaram que o PCS do biocombustível torrificado foi de 19 MJ/kg. Já Felfli et al (2005) encontraram que o poder calorífico para briquetes de madeira tratados por 1 hora foi de 21 MJ/kg a 220 °C e 22,1 MJ/kg a 250 °C. Arias et al (2008) verificaram que o PCS para amostras de *Eucalyptus sp* tratadas por 60 minutos a 260 e 280 °C foi, respectivamente, 22,8 MJ/kg e 25MJ/kg.

4.3. ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA

Os macrocomponentes que constituem a biomassa (hemicelulose, celulose e lignina) possuem comportamentos térmicos diferentes e, a partir das análises termogravimétricas, é possível compreender melhor os efeitos da temperatura no processo de torrefação. Os resultados obtidos no TGA indicam que esses macrocomponentes se degradam em faixas distintas de temperatura. A hemicelulose, por ser mais sensível aos efeitos da temperatura é o polímero que se decompõe primeiro, entre 200 e 300 °C. Em seguida a celulose entre 300 -

400 °C, e por fim a lignina, que se decompõe mais lentamente, em uma ampla faixa de temperatura, entre 250 e 500 °C (MACEDO, 2012).

Orfão et al. (1999), constataram que a biomassa se decompõe através de três reações independentes de seus três componentes denominadas de pseudocomponentes. A celulose e a hemicelulose iniciam a decomposição em temperaturas próximas a 160 °C e a lignina em temperaturas menores, aproximadamente 110 °C, se estendendo até 900 °C, em taxas relativamente baixas quando comparadas às taxas da celulose e da hemicelulose.

As faixas de decomposição dos macrocomponentes da biomassa puderam ser apresentadas a partir da deconvolução das curvas obtidas por TG/DTG. As frações relacionadas com a decomposição dos macroconstituintes foram chamadas de: reação 1 (hemicelulose), reação de 2 (celulose), e reação de 3 (lignina) (Figura 20). Como pode ser observada na Figura 20, a decomposição térmica da biomassa de eucalipto começou em cerca de 200 °C, seguida por uma grande perda de peso em uma zona entre 210 e 450 °C e uma área plana até 600 °C, o que mostra que a desvolatilização está completa. A área de maior perda de massa corresponde a decomposição de hemicelulose (reação 1), o pico de celulose (reação 2), e a pequena área correspondente à lignina (reação 3).

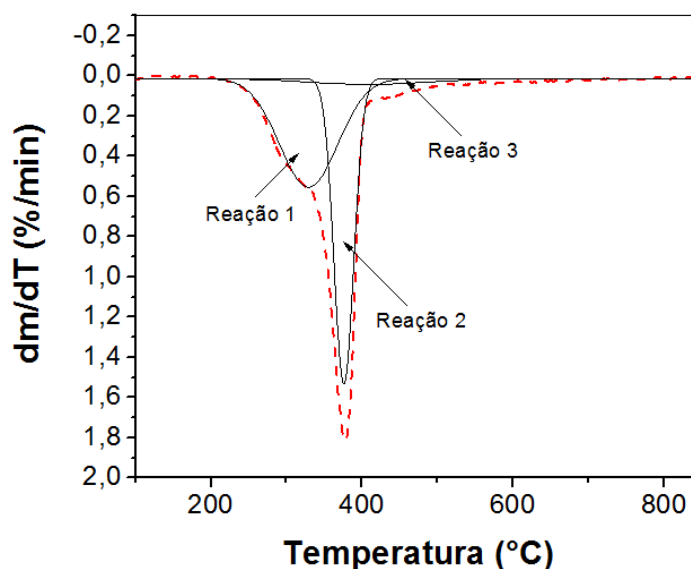


Figura 20 – Curva de deconvolução

Assim como Silva (2013), visando simular a pirólise da amostra seca e torrefeita, as curvas de TGA foram obtidas sob fluxo de N_2 . Os resultados estão apresentados nas Figuras 21 a, b, c e d.

Foi observado que, à medida que a temperatura do processo de torrefação aumentava a massa de biomassa diminuía. As tendências das curvas de TGA para a amostra testemunha e torrefeita a 250 °C são semelhantes, pois foram as amostras que sofreram maior redução de massa. Isto pode ser explicado devido à elevada quantidade de hemiceluloses que foram volatilizadas durante o tratamento térmico, o que mostra a influência da temperatura no processo de torrefação. Para maiores temperaturas, menor é a probabilidade de hemiceluloses na composição da biomassa. Na fase de 260 a 300 °C, celulose e lignina são os principais componentes de energia. Observou-se que a estrutura da biomassa, bem como as suas características, mudou de acordo com as condições de torrefação.

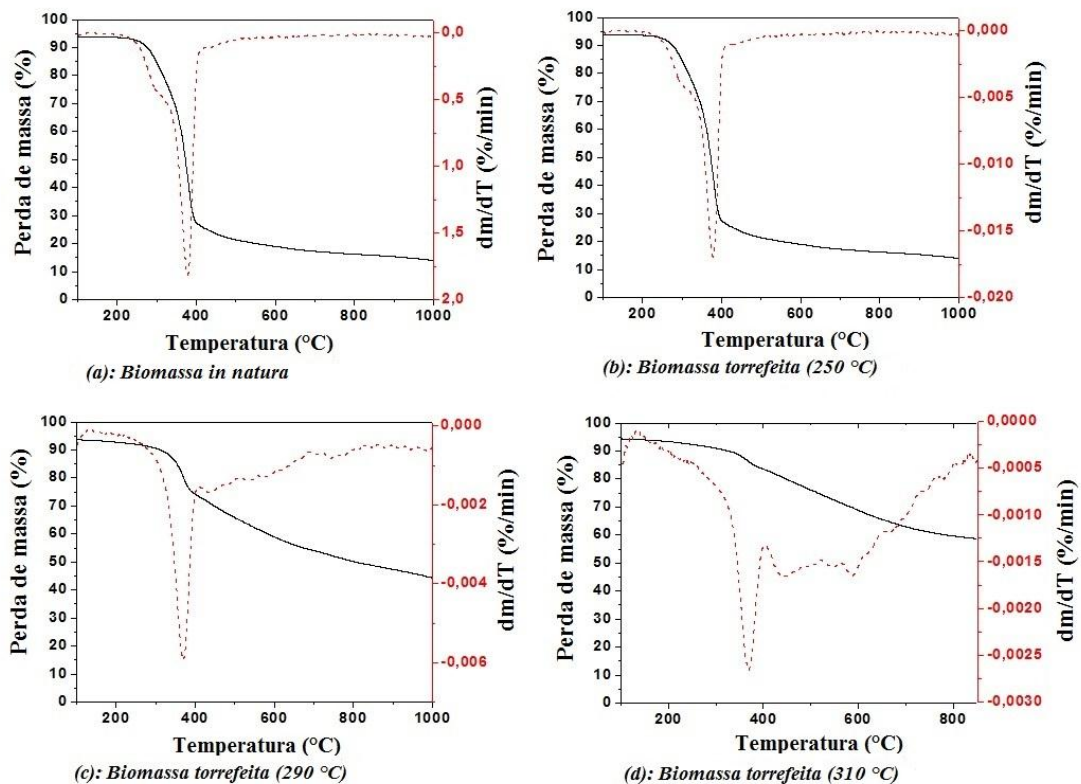


Figura 21 – Termogravimetria e termogravimetria derivativa da biomassa in natura (a), torrefeita a 250 (b), a 290 (c) e 310 °C (d), sob fluxo de N_2

De acordo com Silva (2013) a região de perda de massa para temperaturas inferiores a 100 °C, observado nas Figuras 21 a-d, é devido à presença de gases obstruídos nos poros da biomassa ou água fracamente ligada. Nas Figuras 21 a e b é possível observar melhor a curva que representa a degradação da hemicelulose. Já nas Figuras 21 c e d, correspondentes às amostras torrefeitas a 290 e 310 °C, respectivamente, essa curva já não é mais visível, o que indica que a hemicelulose pode ser completamente degradada na torrefação a 250 °C.

A lignina, por ser um macrocomponente de estrutura específica e mais resistente a altas temperaturas, é o componente que tem menor perda de massa durante o processo. Sua degradação aumenta progressivamente com o aumento da temperatura do processo de torrefação.

4.4. ANÁLISE ESTATÍSTICA

Na análise estatística foi calculada a variância, o desvio padrão, o coeficiente de variação (C.V.) e realizada uma análise de variância dos valores calculados para: o teor de material volátil (MV), teor de cinzas (CZ), teor de carbono fixo (CF) e do poder calorífico superior (PCS). Quando necessário, realizou-se o teste de Tukey.

Na Tabela 8 encontram-se os valores dos coeficientes de variação para cada tratamento e as respectivas médias, variância e desvio padrão.

Tabela 8 – Resultado das análises estatísticas

TRATAMENTOS		MV	CZ	CF	PCS
In natura	Média	83,24	0,57	17,27	17,96
	Variância	0,21	0,02	0,35	0,03
	Desvio padrão	0,46	0,03	0,59	0,17
	C.V. (%)	0,55	5,43	3,40	0,93
Biomassa torrefeita 250 °C	Média	82,13	0,34	18,21	18,41
	Variância	0,03	1E-03	0,04	0,01
	Desvio padrão	0,17	0,03	0,21	0,08
	C.V. (%)	0,21	9,72	1,13	0,43
Biomassa torrefeita 290 °C	Média	48,13	0,84	52,71	24,29
	Variância	0,11	1E-03	0,09	4,23E-05
	Desvio padrão	0,34	0,03	0,31	0,01
	C.V. (%)	0,70	3,77	0,58	0,03
Biomassa torrefeita 310 °C	Média	40,51	1,27	60,75	25,97
	Variância	0,43	0,01	0,53	0,00
	Desvio padrão	0,66	0,11	0,73	0,05
	C.V. (%)	1,63	8,91	1,20	0,21

O coeficiente de variação é o indicativo da dispersão de dados, fornece a variação dos dados obtidos em relação à média. Quanto menores os valores de C.V., mais homogêneo são os dados. Esses valores devem ser menores que 10% (GOMES, 1982). Na Tabela 8 pode-se observar que o C.V. dos valores calculados para o teor de material volátil, teor de cinzas, teor de carbono fixo e para o poder calorífico superior, foi menor que 10 %. Portanto, pode-se concluir que os coeficientes de variação apresentados sugerem que o experimento foi bem conduzido.

Os valores da variância e do desvio padrão foram bem pequenos. Com isso, também pode-se concluir que os experimentos foram bem conduzidos e que houve uma boa coleta de dados.

A análise de variância foi realizada a 5 % de probabilidade. As tabelas com todos os resultados da análise de variância, de todas as variáveis verificadas, encontram-se no Apêndice. A Tabela 9 apresenta somente os valores de “F” para as variáveis analisadas. Todos os “Fcal.” foram maiores que o “Ftab.”, o que indica que todas as variáveis apresentaram diferenças significativas entre as médias.

Tabela 9 – Valores de “F” (Análise de variância – ANOVA)

Fonte de Variação	G.L	Ftab.	Fcal. (MV)	Fcal. (CZ)	Fcal. (CF)	Fcal. (PCS)
Entre grupos	3					
Dentro dos grupos	8	4,07	7624,15	61,63	6132,64	5350,05
Total	11					

Como ficou evidenciado que existe diferença significativa entre as médias, é também necessário realizar o teste de média, o teste de Tukey a 5 % de probabilidade, para o MV, CZ, CF e PCS. Os resultados do teste de Tukey estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Resultado teste de Tukey

Biomassa	MV (%)	CZ (%)	CF (%)	PCS (MJ/kg)
In natura	83,24 a	0,57 a	17,27 a	17,96 a
Torrefeita 250 °C	82,13 a	0,34 a	18,21 a	18,41 b
Torrefeita 290 °C	48,13 b	0,84 b	52,71 b	24,29 c
Torrefeita 310 °C	40,51 c	1,27 c	60,75 c	25,97 d

Os resultados da biomassa torrefeita a 290 e 310 °C diferiram estatisticamente da biomassa in natura e torrefeita a 250 °C com relação ao teor de material volátil, teor de cinzas e carbono fixo. Essa diferença é devido à influência da temperatura no processo de torrefação. O aumento da temperatura provoca uma maior degradação da biomassa, conseqüentemente, provoca um aumento do teor de carbono fixo e de cinzas, e uma redução do material volátil. A biomassa torrefeita a 310 °C apresentou menor MV (40,51 %) e o maior valor de CZ (1,27 %) e de CF (60,75 %). Segundo Gomes e Matos, citato em Oliveira et al. (1982), este resultado indica um aumento no tempo de residência e, conseqüentemente, em uma maior produção por unidade de volume.

Os valores calculados para o PCS diferiram significativamente entre todas as amostras. Mostrando que também sofre influência da temperatura de processo. O aumento da temperatura provoca a redução de MV e aumento do CF, conseqüentemente, o poder calorífico superior aumenta.

5. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados, verificou-se que o processo de torrefacção é um tratamento térmico viável para o condicionamento de energia de biomassa de eucalipto, pois melhora a qualidade do biocombustível. Este tratamento térmico provoca mudanças significativas em suas propriedades e benefícios para o seu armazenamento e transporte.

Neste trabalho foi apresentada a caracterização de cavaco de eucalipto torrefeito em diferentes temperaturas (in natura, 250, 290 e 310 °C). De maneira geral, as propriedades analisadas apresentaram resultados semelhantes com os estudos desenvolvidos por outros pesquisadores do tema.

O processo de torrefacção melhorou significativamente as propriedades da biomassa estudada. Após o processo de torrefacção o teor de umidade e de materiais voláteis diminuiu cerca de 70 a 60 %, respectivamente; levou a um aumento do poder calorífico, em torno de 26 MJ/Kg, quando comparado com o resíduo de eucalipto seco, 18 MJ/Kg, sendo estes resultados para os tratamentos a 310 °C.

De modo geral, com o aumento da temperatura de tratamento, houve uma redução no teor de voláteis e aumento no teor de carbono fixo e de cinzas. Observou-se também que o aumento da temperatura leva ao aumento do poder calorífico superior e inferior, reduzindo o teor de umidade e consequentemente aumentando o caráter hidrofóbico da biomassa. A redução da umidade está relacionada com a degradação da hemicelulose e de parte da celulose e lignina.

Com relação à análise elementar das amostras, o valor médio dos resultados das amostras de cavaco de madeira (% massa) revelou que o teor de carbono variou de 46,81 a 69,64 %, o de hidrogênio foi de 6,11 a 4,30 %, mostrando que o houve uma diminuição por ser mais leve e ficar mais reativo. Algo similar acontece com o oxigênio, que variou de 46,76 a 25,80 %.

A partir da análise termogravimétrica observou-se a influência da temperatura na perda de massa das amostras de acordo com o aumento da temperatura. Foi possível identificar a faixa de temperatura que os macrocomponentes da biomassa começavam a se degradar. As amostras torrefeitas a 290 e 310 °C foram as que sofreram menor redução de massa, devido a ausência de hemicelulose na sua composição, conseqüentemente, essas amostras possuem maior quantidade de energia concentrada.

6. SUGESTÕES DE PROJETOS FUTUROS

- Caracterização das cinzas;
- Realizar teste de torrefação com diferentes biomassas para comparação dos resultados;
- Compactar as amostras em briquetes e verificar os benefícios da combinação do processo de torrefação e densificação;
- Realizar o processo de torrefação em um novo reator, em batelada e contínuo.
- Produção de hidrogênio a partir da biomassa.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, G.; BRITO, J. O.; PERRE, P. Changes in wood-water relationship due to heat treatment assessed using micro-samples of Eucalyptus. **Holzforschung**, Nancy, v. 63, n. 1, p. 80-88, 2009.
- ANDRITZ. **Site empresarial**. Disponível em: < <http://www.andritz.com/group.htm>>. Acessado em: 05 mar. 2015.
- ARIAS, B.; PEVIDA, C.; FERMOSO, J.; PLAZA, M.G.; RUBIERA, F.; PIS, J.J. Influence of Torrefaction on the Grindability and Reactivity of Woody Biomass. **Fuel Processing Technology**, v. 89, p. 169-175, 2008.
- ASSIS, M. R.; PROTÁSIO, T. P.; ASSIS, C. O.; TRUGILHO, P. F.; SANTANA, W. M. S. Qualidade e rendimento do carvão vegetal de um clone híbrido de Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla. **Pesquisa Florestal Brasileira/Colombo**, v. 32, n. 71, p.291-302, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **ABRAF**. Anuário Estatístico da ABRAF 2013: Ano Base 2012, ed. São Paulo. Brasília, 2012. 42-43.p.
- _____. ASTM Standard E.871. **Standard method for moisture analysis of particulate wood fuels**. Philadelphia, USA: American Society for Testing and Materials, 1982.
- _____. ASTM Standard D.1102-84. **Standard method for ash in wood**. Philadelphia, USA: American Society for Testing and Materials, 1995.
- _____. ASTM Standard E.1756-08. **Standard method determination of total solids in biomass**. Philadelphia, USA: American Society for Testing and Materials, 1995.
- _____. ASTM Standard D. 5832-98. **Standard method for volatile matter content of activated carbon sample**. Philadelphia, USA: American Society for Testing and Materials, 1995.
- _____. ASTM Standard D. 2015. **Standard Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke by the Adiabatic Bomb Calorimeter**. Philadelphia, USA: American Society for Testing and Materials, 1995.
- BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL – BNDES. Disponível em: <http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/bndes/bndes_pt>. Acessado em 25 set. 2013.
- BARCELLOS, D. C.; COUTO, L. C.; MÜLLER, M. D.; COUTO, L. O estado da arte da qualidade da madeira de eucalipto para produção de energia: um enfoque nos tratamentos silviculturais. **Biomassa & Energia**, Viçosa, v. 2, n. 1, p. 141-158, 2005.

BARCELLOS, D.C. **Caracterização do carvão vegetal através do uso de espectroscopia no infravermelho próximo**. 2007. 140f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007.

BARRETO, G.C., **Levantamento das Tecnologias para Produção de Etanol de Segunda Geração: O Potencial do Brasil**. 2009. 81f. Monografia (Graduação). Curso de Engenharia Química. Universidade Salvador - Unifacs, Salvador, 2009.

BARTKOWIAK, M.; ZAKRZEWSKI, R.; KSIAZCZAK, A. Thermal degradation of lignins isolated from wood. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**. 2006.

BERGMAN, P. C. A. Combined torrefaction and pelletisation: The TOP process. Report ECN-C-05-073. **Petten**, The Netherlands, jul. 2005.

BERGMAN, P.C.A.; KIEL, J.H.A. Torrefaction for biomass upgrading. In: EUROPEAN BIOMASS CONFERENCE & EXHIBITION, 14, p. 17-21, 2005.

BERGMAN, P.; BOERSMA, A.; ZWART, R.; KIEL, J. et al. Torrefaction for biomass co-firing in existing coal-fired power stations “biocoal”. Report ECN-C-05-013. **Petten**, The Netherlands, 2005 (a).

BERGMAN, P.C.A.; BOERSMA, A.R.; KIEL, J.H.A.; PRINS, M.J.; PTASINSKI, K.J.; JANSSEN, F.G.G.J. Torrefied biomass for entrained-flow gasification of biomass, Report ECN-C—05-026, The Netherlands, **Petten**, 2005 (b).

BOAS, M.A.V. **Efeito do tratamento térmico da madeira para a produção de briquetes**. 2011. 65f. Tese (Mestrado) – Ciência Florestal. Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2011.

BORGES, A. C. P. **Torrefação de biomassa de eucalipto**. 2011. 85 p. Monografia (Conclusão de Curso) – Universidade Salvador, Salvador, 2011.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Balanço Energético Nacional – BEN. **Oferta Interna de Energia**: ano base 2011. Rio de Janeiro, EPE, 2012.

BRASIL. **Balanço Energético Nacional 2014**: ano base 2013. Rio de Janeiro, EPE, 2013.

BRIDGEMAN, T.G.; JONES, J.M.; SHIELD, I.; WILLIAMS, P.T. Torrefaction of reed canary grass, wheat straw and willow to enhance solid fuel qualities and combustion properties. **Fuel**, p. 844-856, 2008.

BRITO, J. O. Estudo preliminar de retificação térmica da madeira de eucalipto. In: CONGRESSO FLORESTAL PANAMERICANO, 1., CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 7., 1993, Curitiba. **Anais...** São Paulo: SBS/SBEF, 1993. p.774.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L.E. Aspectos técnicos da utilização da madeira e carvão vegetal como combustíveis. In: SEMINÁRIO DE ABASTECIMENTO ENERGÉTICO INDUSTRIAL COM RECURSOS FLORESTAIS, 2., 1982, São Paulo. **Anais...** São Paulo: 1982. p.101-137.

BRITO, J.O.; BARRICHELO, L.E.G. **Características do eucalipto como combustível: análise imediata da madeira e da casca**. Piracicaba: IPEF, n. 16, p. 63-70, 1978.

BROWNING, B.L. The chemistry of wood. 1963.

CHEN, W. H.; KUO, P. C. A study on torrefaction of various biomass materials and its impact on lignocellulosic structure simulated by a thermogravimetry. **Energy**, n.35, 2010.

CHEN, W.H.; HSU, H.C.; LU, K.M.; LEE, W.J.; LIN, T.C. Thermal pretreatment of wood (Lauan) block by torrefaction and its influence on the properties of the biomass. **Energy**, n. 36, p.3012-3021, 2011.

COUTO, L. C.; BARCELLOS, D. C. As relações água-madeira e sua influência nas propriedades físicas. **Biomassa & Energia**, v. 4, n. 2, p.173-190, 2011.

DENG, J.; WANG, G.J.; KUANG, J.H.; ZHANG, Y.I.; LUO, Y.H. Pretreatment of agricultural residues for co-gasification via torrefaction. **J Anal Appl Pyrolysis**, n. 86, p.331-337, 2009.

DOAT J. CTFT Research into wood pyrolysis. In: SYMPOSIUM FOREST PRODUCTS RESERCH INTERNATIONAL ARCHIVEMENT AND THE FUTURE, 1985. p. 12-24.

DOW BRASIL. **Notícias**. Disponível em:

<<http://www.dow.com/brasil/noticias/release.aspx?id=190>>. Acessado em: 20 abr. 2014.

FELFLI, F. F.; LUENGO, C. A.; BEATON, P.; SUAREZ, J. A. Efficiency test for bench unit torrefaction and characterization of torrefied biomass. In: BIOMASS CONFERENCE OF AMERICAS, 4th, 1999, v.1, p. 589-592.

FELFLI, F. E.E. **Torrefação de biomassa, viabilidade técnica e potencial de mercado**.

2003. 180f. Tese (Doutorado) - Planejamento de Sistemas Energéticos. Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, 2003.

FELFLI, F.E.F.; LUENGO, C.A.; SOLER, P.B. Torrefação de Biomassa: Características, Aplicações e Perspectivas. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL – AGRENER 200. 2000, p.5.

FELFLI, F.F; LUENGO, C.A.; SUAREZ, J.A.; BEATON, P. Wood briquette torrefaction. **Energy for Sustainable Development**, v.9, n.3, p. 19-22, 2005.

FELFLI, F. F.; MESA, J. M.; ROCHA, J. D.; FILIPPETO, D.; LUENGO, C. A.; PIPPO, W. A. Biomass briquetting and its perspectives in Brazil. **Biomass and Bioenergy**, n. 35, p.236-242, 2011.

FIGUEROA, M. J. M; MORAIS, P. D. Comportamento da madeira a temperaturas elevadas. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v.9, n.4, p. 157-174, 2009.

GENTIL, L. V. B. **Tecnologia e economia do briquete de madeira**. 2008. 156 f. 195 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Departamento de Engenharia Florestal - Universidade de Brasília – UnB. Brasília, Brasília, 2008.

GONÇALVES, J.E. **Avaliação energética e ambiental de briquetes produzidos com rejeitos de resíduos sólidos urbanos e madeira de *Eucalyptus grandis***. 2010. 104 f. Tese (Doutorado em Agronomia – Energia na Agricultura) – Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu/SP, 2010.

JENKINS, B. M. Fuel Properties for Biomass Materials. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON APPLICATION AND MANAGEMENT OF ENERGY IN AGRICULTURE: The Role of Biomass Fuels. Delhi, 1990.

KARKANIA, V.; FANARA, E.; ZABANIOTOU, A. Review of sustainable biomass pellets production: A study for agricultural residues pellets' market in Greece. **Renewable and Sustainable Energy**, Greece, n.16, p.1426-1436, jan.2012.

LIPINSKY, E.S.; ARCATE, R.J.; REED, T.B. Enhanced wood fuels via torrefaction. **Fuel Chemistry Division Preprints**, n. 47, p. 408–410, 2002.

LUENGO, C.A.; FELFLI, F.E.F.; BEZZON, G. Pirólise e Torrefação da biomassa. In: _____. **Biomassa para energia**. Campinas, SP: Unicamp, 2006. p. 345-350.

MACEDO, L. A. 2012. 49p. **Influência da composição da biomassa no rendimento em condensáveis processo de torrefação**. Dissertação (Mestrado) - Ciências Florestais, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

MIGLIORINI, A. J. Densificação de biomassa florestal. In: _____. Série Técnica IPEF, Piracicaba, 1980. v.1, n.2, p.C.1-C.9.

MORAIS, S.A.L. de.; NASCIMENTO, E.A.do.; MELO, D.C.de. Análise da madeira de Pinus oocarpa parte I – estudo dos constituintes macromoleculares e extrativos voláteis. **Revista Árvore**, v.29, n.3, p.461-470, 2004.

MOURA, D.G.; GOMES, A. E.; PANZERA, A. C.. Energia no Brasil. In: _____. **Módulo Didático – Educação Ambiental**. Secretaria de Estado de Educação, Minas Gerais, 2010.

NEW BIOMASS. **Site empresarial**. Disponível em: < <http://newbiomass.com/>>. Acessado em: 05 mar. 2015.

NOGUEIRA, M. F. M.; RENDEIRO, G. (2008). Caracterização Energética da Biomassa Vegetal. BARRETO, Eduardo José Fagundes (Coord.). **Combustão e Gaseificação da Biomassa Sólida: Soluções Energéticas para a Amazônia**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008. p. 52-63.

OLIVEIRA, J.T.; HELLMEISTER, J.C.; SIMÕES, J.W.; FILHO, M.T. Caracterização da madeira de sete espécies de eucaliptos para a construção civil: Avaliações dendométricas das árvores. **Scientia Forestalis**, n.56, p. 113-124, 1999.

- OLIVEIRA, R.M. **Utilização de técnicas de caracterização de superfícies em madeiras tratadas termicamente.** 2009. 123 p. Tese (Doutorado) - Instituto de Física de São Carlos na Universidade de São Paulo, São Carlos/SP, 2009.
- ORFÃO, J.J.M.; ANTUNES, F.J.A.; FIGUEIREDO, J.L. Pyrolysis kinetics of lignocellulosic materials-three independent reactions model. **Fuel**, Guildford, v.78, n.3, p.349-358, 1999.
- PAULUCIO, F.F. **Qualidade do carvão vegetal de madeira do cerrado em comparação ao *Eucalyptus* sp.** 2012. 47f. Monografia (Graduação). Curso de Engenharia Florestal. Universidade de Brasília, Brasília, 2012.
- PENTANANUNT, R.; RAHMAN, A. N. M. M.; BHATTACHARYA, S.C. Upgrading of biomass by means of torrefaction. **Energy**, n.15, p.1175-1179, 1990.
- PIMCHUAI, A, ANIMESH, D. A., BASU, P. Torrefaction of agriculture residue to enhance combustible properties. **Energy Fuel** 24:4638–4645 (2010).
- PINCELLI, A.L.P.S.M. **Características dos resíduos da colheita de madeira de eucalipto e pinus, submetidos, ao tratamento térmico, com foco na aplicação energética.** 2011. 126 p. Tese (Doutorado em Ciências) – Programa: Recursos Florestais – Universidade de São Paulo – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2011.
- PINCELLI, A.L.P.S.; BRITO, J.O.; CORRENTE, J.E. Avaliação da termorretificação sobre colagem na madeira de *Eucalyptus saligna* e *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 61, p. 122-132, jun. 2002.
- PHANPHANICH, M.; MANI, S. Impact of torrefaction on the grindability and fuel characteristics of forest biomass. **Bioresource Technology**, Essex, v. 102, p.1246-1253, 2011.
- PIRES, D.M. **Modelagem Fuzzy na estimativa do volume de árvores de *Eucalyptus*.** 2007. 46p. Monografia (Graduação). Curso de Ciência da Computação. Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais, 2007.
- PRINS, M. J.; PTASINSKI, K. J.; JANSSEN, F. J. J. G. More efficient biomass gasification via torrefaction. **Energy**, The Netherlands, n.31, p. 3458–3470, 2006.
- RODRIGUES, T.O., **Efeitos da Torrefação no Condicionamento de Biomassa para Fins Energéticos.** 2009. 82f. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Florestal. Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, 2009.
- SANTOS, M. A. S. **Parâmetros de qualidade do carvão vegetal para uso em alto-forno.** In: Fórum Nacional sobre Carvão Vegetal, 1., 2008, Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte. UFMG, 2008.
- SILVA, A. G. **Condicionamento de resíduos de *Eucalyptus grandis* para produção de biocombustível sólido.** 2013. 130 f. Tese (Doutorado em Química) – Departamento de Química – Universidade Federal da Bahia – UFBA, Salvador/BA, 2013.

SILVA, J. C.; OLIVEIRA, J. T. S. Avaliação nas propriedades higroscópicas da madeira de *Eucalyptus saligna* Sm. Em diferentes condições de umidade relativa de ar. **Revista Árvore**, v. 27, n. 2, p. 233-239, 2003.

SJÖSTRÖM, E.; WESTERMARK, U. **Chemical composition of wood and pulps: basic constituent and their distribution**. In: Analytical methods in wood chemistry, pulping and papermaking. Heidelberg: Springer, 1999. p.1-19.

TOPELL ENERGY. **Site empresarial**. Disponível em: < <http://www.topellenergy.com/>>. Acessado em: 05 mar. 2015.

TORRES, E. A. Gerar amostras de eucalipto torrado a temperaturas diversas e avaliar seus parâmetros energéticos vinculados à logística e à gaseificação. Salvador: LEN/CIENAM-UFBA, 2011. 18 p. (Relatório técnico, N° 004/2011)

TSOUMIS, G. T. **Science and technology of wood: structure, properties, utilization**. New York: Chapman & Hall, 1991.

TUMULURU, J. S.; SOKHANSANJ, S.; WRIGHT, C. T.; BOARDMAN, R. D. **Biomass Torrefaction Process Review and Moving Bed Torrefaction System Model Development**. Report: Department of Energy National Laboratory, INL/EXT – 10-19569, 2010.

USLU, A.; BERGMAN, P.C.A.; FAAIJ, A. P. C. Pre-treatment technologies, and their effect on international bioenergy supply chain logistics. Techno-economic evaluation of torrefaction, fast pyrolysis and pelletisation. **Energy**, The Netherlands, n.33, p.1206-1223, 2008.

VALE, A.T.; BRASIL, M.A.M.; LEÃO, A.L. Quantificação e caracterização energética da madeira e casca de espécies do cerrado. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.12, n.1, p.71-82, 2002.

VAN DER SELT, M. J. C.; GERHAUSER, H.; KIEL, J.H.A.; PTASINSKI, K.J. Biomass upgradings by torrefaction for the production of biofuels: A review. **Biomass and Bioenergy**, The Netherlands, n.35, p.3748-3762, jul. 2011.

VIEIRA, A.C. **Gaseificação de briquetes de casca de eucalipto**. 2005. 83 f. Dissertação (Mestrado) – Engenharia Agrícola. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2005.

VIEIRA, A. C. **Caracterização da biomassa proveniente de resíduos agrícolas**. 2012. 56 f. Dissertação (Mestrado) – Energia na Agricultura - Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE, Cascavel/PR, 2012.

XU, F.; LINNEBUR, K.; WANG, D. Torrefaction of Conservation Reserve Program biomass: A techno-economic evaluation. **Industrial Crops and Products**, n. 61, p. 382-387, jul. 2014.

APÊNDICE

A – ANÁLISE ESTATÍSTICA (ANOVA)

A.1. ANOVA do teor de material volátil

ANOVA					
Fonte da variação	Soma de Quadrados	G.L.	Quadrado Médio	F	valor-P
Entre grupos	4504,3207	3	1501,440235	7624,1561	3,67739E-14
Dentro dos grupos	1,5754559	8	0,196931991		
Total	4505,8962	11			

A.2. ANOVA do teor de cinzas

ANOVA					
Fonte da variação	Soma dos Quadrados	G.L.	Quadrado Médio	F	valor-P
Entre grupos	1,50607924	3	0,50202641	61,62868	7,16024E-06
Dentro dos grupos	0,06516789	8	0,00814599		
Total	1,57124713	11			

A.3. ANOVA do carbono fixo

ANOVA					
Fonte da variação	Somas dos Quadrados	G.L.	Quadrado Médio	F	valor-P
Entre grupos	4660,66014	3	1553,55338	6132,6408	8,78122E-14
Dentro dos grupos	2,026602813	8	0,253325352		
Total	4662,686743	11			

A.4. ANOVA poder calorífico superior

ANOVA					
Fonte da variação	Soma dos Quadrados	G.L.	Quadrado Médio	F	valor-P
Entre grupos	149,3920143	3	49,79733808	5350,046171	1,51563E-13
Dentro dos grupos	0,074462667	8	0,009307833		
Total	149,4664769	11			