

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL

**EFEITOS DA TORREFAÇÃO NO CONDICIONAMENTO
DE BIOMASSA PARA FINS ENERGÉTICOS**

THIAGO OLIVEIRA RODRIGUES

ORIENTADOR: PATRICK LOUIS ALBERT ROUSSET

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

PUBLICAÇÃO: PPGEFL.DM – 109/2009

BRASÍLIA DF

FICHA CATALOGRÁFICA

RODRIGUES, THIAGO OLIVEIRA

Efeitos da Torrefação no Condicionamento de Biomassa para Fins Energéticos [Distrito Federal] 2009.

xi, 71 p., 210 x 297 mm (EFL/FT/UnB, Mestre, Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Florestal

1. Energia renovável

2. Torrefação

3. Biomassa

4. Tratamento térmico

I. EFL/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

RODRIGUES, T. O. (2009). Efeitos da Torrefação no Condicionamento de Biomassa para Fins Energéticos. Dissertação de Mestrado em Engenharia Florestal, Publicação PPGEFL.DM-109/2009, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 71 p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Thiago Oliveira Rodrigues.

TÍTULO: Efeitos da Torrefação no Condicionamento de Biomassa para Fins Energéticos.

GRAU: Mestre

ANO: 2009

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Thiago Oliveira Rodrigues
SHIS QI 17 conjunto 4 casa 21, Lago Sul.
71.645-040 Brasília – DF – Brasil.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, pai, mãe, irmãos, avós, queridos. Agradeço ao meu nenúfar, Fernanda, minha paixão. Agradeço ao meu orientador, doutor Patrick Rousset, pelas oportunidades passadas e futuras. Ao doutor Waldir Ferreira Quirino e aos meus outros amigos energéticos Ana Cristina, Lucélia e Cristiano Kleber. Aos membros da banca, doutor José Dílcio Rocha e doutor Ailton Teixeira do Vale, pelas valorosas contribuições a esta dissertação. Aos doutores Mário Rabelo e Cláudio Del Menezzi, por tantas outras contribuições ao longo do mestrado. Aos meus amigos de curso Livia, Robert, Fernanda, Ricardo e demais colegas. Aos meus parceiros da Funtec, Gilberto, Graça e Cristina. Ao Laboratório de Produtos Florestais, em especial à Carpintaria, Produtos, Engenharia da Madeira, Química da Madeira e demais funcionários, por toda ajuda. Ao departamento de Engenharia Florestal e seus professores e funcionários, em especial Alcione, professora Alba, professor Joaquim. Aos professores do departamento de Engenharia Mecânica Armando Caldeira, João Nildo e Carlos Gurgel. Aos meus amigos. A todos que de alguma forma estiveram envolvidos neste trabalho. A Deus, sempre.

RESUMO

EFEITOS DA TORREFAÇÃO NO CONDICIONAMENTO DE BIOMASSA PARA FINS ENERGÉTICOS

Autor: Thiago Oliveira Rodrigues

Orientador: Patrick Louis Albert Rousset

Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal

Brasília, mês de fevereiro (2009)

Na atual conjuntura energética mundial a biomassa apresenta-se como uma das poucas fontes capazes de suprir a crescente demanda frente à polêmica diminuição na oferta dos combustíveis fósseis, além das explícitas vantagens ambientais diante das alarmantes mudanças climáticas em curso no planeta. Contudo, esta fonte renovável possui características gerais que prejudicam seu uso direto como combustível. O alto teor de umidade, o baixo poder calorífico, a granulometria irregular, o baixo teor de carbono fixo associado ao alto teor de matérias voláteis, todas estas propriedades juntas tornam a biomassa um combustível heterogêneo de baixa qualidade. No intuito de padronizar e aumentar essa qualidade foram desenvolvidos diversos processos, entre eles a torrefação. A torrefação é um processo de conversão termoquímica que se caracteriza pelas temperaturas relativamente baixas (de 200°C a 300°C) e pelas reações essencialmente endotérmicas. Nesta faixa de temperatura a hemicelulose é o componente mais degradado. Este tratamento térmico garante a padronização e o aumento das qualidades energéticas da biomassa, mantendo em média, 90% do conteúdo energético e 70% da massa iniciais. Nesta pesquisa buscou-se avaliar os efeitos da torrefação nas principais propriedades energéticas (poder calorífico, densidade energética e análise química imediata) assim como outras propriedades que têm relação com o uso energético da biomassa (rendimento gravimétrico, densidade aparente e módulo de ruptura). Para tanto foi realizada a torrefação da madeira de *Eucalyptus grandis* sob três tratamentos distintos (T2 – 220°C, T3 – 250°C e T4 – 280°C). As propriedades da madeira torrificada foram analisadas e comparadas com as propriedades da testemunha (T1), madeira seca a 0% de umidade, além das comparações entre os tratamentos. Os resultados indicaram mudanças estatisticamente significativas para todos os tratamentos. No entanto o T2 causou alterações pouco representativas, tornando-o mais interessante para a termorreificação da madeira. O T3 e o T4 provocaram mudanças expressivas nas características energéticas da madeira. Em função dos resultados e das condições de tratamento o T3 apresenta-se como o mais adequado para o condicionamento energético da biomassa.

ABSTRACT

EFFECTS OF TORREFACTION AS CONDITIONING METHOD FOR ENERGETIC USE OF BIOMASS

Author: Thiago Oliveira Rodrigues

Supervisor: Patrick Louis Albert Rousset

Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal

Brasília, month of december (2008)

At the current energetic situation in the world biomass shows up as one of the few sources capable of supplying the growing demand up against the controversial supply reduction of fossil fuels besides the explicit environmental advantages in front of the alarming climate changes happening in the planet. However this renewable resource has general characteristics that affect its direct use as fuel. The high moisture content, the low calorific value, the heterogeneous granulometry, the low fixed carbon content associated with the high volatile material content, all these properties together make biomass an irregular fuel with low quality. In order to standardize and increase this quality several processes have been developed, among them there is torrefaction. Torrefaction is a thermochemical conversion process that stands out for the relatively low temperatures (200°C to 300°C) and for the endothermic reactions. At this temperature range hemicelluloses are the most degraded component of wood. This thermal treatment assures the standardization and the increase of the energetic characteristics of biomass, supporting in average 90% from the energetic and 70% from the mass initial contents. This research aimed to evaluate the effects of torrefaction at the principal energetic properties (high calorific value, energetic density and immediate chemical analysis) as well as others properties that have a relationship with the energetic use of biomass (gravimetric yield, apparent density and rupture module). In order to achieve this goal there was conducted the torrefaction of *Eucalyptus grandis* wood at three distinguished treatments (T2 – 220°C, T3 – 250°C, T4 – 280°C). The properties of torrefied wood were analysed and compared with the witness properties (T1), dried wood at 0% of moisture content, beyond the comparisons among the treatments. The results indicated significant statistical changes for all treatments. Nevertheless T2 caused very few changes, making it more interesting for wood thermorectification. T3 and T4 have provoked expressive changes in wood's energetic characteristics. Due to the results and the treatments operational conditions it can be assumed that T3 is the most efficient method for energetic conditioning of biomass.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivos.....	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1. Energia.....	4
2.1.1. Matriz Energética	6
2.1.2. Calor	10
2.2. Biomassa.....	11
2.3. Madeira.....	12
2.3.1. Celulose	15
2.3.2. Hemicelulose	15
2.3.3. Lignina.....	16
2.3.4. Extrativos.....	17
2.4. Propriedades da madeira.....	17
2.4.1. Propriedades físicas	17
2.4.2. Propriedades mecânicas.....	19
2.4.3. Propriedades energéticas	20
2.5. Conversão energética da biomassa	22
2.5.1. Pirólise.....	23
2.5.2. Tratamentos térmicos da madeira.....	24
2.6. Torrefação.....	25
2.6.1. Características químicas da torrefação	27
2.6.2. Características mecânicas da torrefação	30
2.6.3. Balanço de massa e energia da torrefação	31
2.6.4. Características e usos da madeira torrificada	32
2.6.5. Tecnologias de torrefação da madeira	34
3. MATERIAIS E MÉTODOS	39
3.1. Secção da tora e corte das pranchas.....	39
3.1.1. Confeção dos corpos-de-prova	39
3.2. Ensaio de Torrefação	40
3.3. Teor de Umidade	43
3.4. Massa específica	43

3.5. Análise química imediata	43
3.6. Poder Calorífico.....	44
3.7. Compressão paralela às fibras	45
3.10. Densidade Energética e Rendimento Energético.....	45
3.11. Rendimento Gravimétrico	46
3.12. Análise estatística	46
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
4.1. Teor de umidade	48
4.2. Rendimento gravimétrico	48
4.3. Densidade aparente.....	51
4.4. Compressão paralela às fibras.	52
4.5. Análise Química Imediata	53
4.6. Poder Calorífico Superior.....	55
4.7. Densidade Energética e Rendimento Energético.....	56
4.8. Estatística Analítica	57
4.8.1. Análise de Variância.....	57
4.8.2. Teste de Tukey.....	58
4.8.3. Regressão Linear	59
5. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS	64
REFERÊNCIAS	67

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Composição química molecular de folhosas e coníferas. (modificado – Rowell, 2005).....	14
Tabela 2: Rendimento em massa e composição elementar em pirólise. (modificado – Wenzl, 1970).	23
Tabela 3: Principais características dos processos de tratamento térmico da madeira. Fonte: Rousset, 2004. Adaptado.	25
Tabela 4: Fases e produtos da degradação térmica da madeira.	27
Tabela 5: Quadro ilustrativo dos ensaios de torrefação.....	42
Tabela 6: Modelo de análise de variância dos dados gerados.	47
Tabela 7: Teor de umidade dos corpos-de-prova de <i>Eucalyptus grandis</i>	48
Tabela 8: Rendimento gravimétrico das três torrefações.	49
Tabela 9: Densidade aparente da madeira de <i>Eucalyptus grandis</i> sob três tratamentos.	51
Tabela 10: Compressão paralela às fibras da madeira de <i>Eucalyptus grandis</i> sob três tratamentos.	52
Tabela 11: Teor de Matérias Voláteis (MV), Cinzas (Cz) e Carbono Fixo (CF) da madeira de <i>Eucalyptus grandis</i> sob três tratamentos.	54
Tabela 12: Poder Calorífico Superior da madeira de <i>Eucalyptus grandis</i> sob três tratamentos.	55
Tabela 13 – Densidade energética e rendimento energético da madeira de <i>Eucalyptus grandis</i> sob três tratamentos.	56
Tabela 14 – ANOVAS de todos os parâmetros analisados na madeira de <i>Eucalyptus grandis</i> sob três tratamentos.	58
Tabela 15: Teste de Tukey para verificação de diferenças entre médias dos parâmetros analisados na madeira de <i>Eucalyptus grandis</i> sob três tratamentos.	58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Oferta mundial de energia em 1973 e 2005. Fonte: IEA, 2007.	7
Figura 2: Evolução da participação das fontes renováveis e não renováveis no Brasil. Fonte: BEN, 2007.	8
Figura 3: Oferta Interna de energia no Brasil, 2007. Fonte: BEN, 2008.	9
Figura 4: Representação do plano de cortes e do cerne e alburno. (modificado – Laboratório de Produtos Florestais, UTAD).	13
Figura 5: Esquema da parede de células vegetais. ML – lamela média; P – parede primária; S1, S2, S3 – camadas formadoras da parede secundária. (modificado – Rowell <i>et al.</i> , 2005).	14
Figura 6: parte da cadeia de celulose. Fonte: Rowell <i>et al.</i> , 2005. Adaptado.	15
Figura 7: estrutura molecular parcial de O-acetil-O-metilglucoroxilana. Fonte: Rowell, 2005. Adaptado.	16
Figura 8: Álcoois precursores da lignina. 1 – álcool p-cumarílico; 2 – álcool coníferílico; 3 – álcool sinapílico. (modificado – Rowell <i>et al.</i> , 2005).	16
Figura 9: Quatro formas de mensuração das propriedades mecânicas da madeira. Fonte: Winandy & Rowell, 2005. Adaptado.	19
Figura 10: Vias de conversão energética da biomassa.	22
Figura 11: Temperatura em diversas partes da amostra sob tratamento térmico, o círculo indica reações exotérmicas no interior da prancha (Almeida, 2007).	28
Figura 12: Evolução dos voláteis durante a torrefação do capim caniço-malhado até a temperatura final de 290°C. (modificado – Bridgeman <i>et al.</i> , 2008).	29
Figura 13: Balanço de massa e de energia da torrefação. M = unidade de massa; E = unidade de energia. (modificado – Bergman, 2005).	31
Figura 14: Balanço de massa e energético para a torrefação de <i>Salix sp</i> (seco) à temperatura e tempo de reação de (a) 250°C por 30 minutos e (b) 300°C por 10 minutos. (modificado – Prins <i>et al.</i> , 2006).	34
Figura 15: Planta de torrefação da PECHINEY Eletrometalurgia. (Luengo <i>et al.</i> , 2006; adaptado de Girard & Shah, 1991).	35
Figura 16: Planta de torrefação da PILLARD. (Luengo <i>et al.</i> , 2006; adaptado de Girard & Shah, 1991).	36

Figura 17: Planta de torrefação com vapor superaquecido. (Luengo <i>et al.</i> , 2006; adaptado de Arcate, 2000).....	37
Figura 18: Esquema da torrefação que antecede a compactação (pelletização) – TOP. (BERGMAN, 2005).	38
Figura 19: Secção da tora e corte final da prancha.....	39
Figura 20: Confeção dos corpos-de-prova.....	40
Figura 21 - Esquema do sistema de torrefação.....	41
Figura 22 - Esquema da disposição dos termopares e dos corpos-de-prova dentro do reator.	42
Figura 23: Gráficos das temperaturas e da perda de massa x temperatura, 220°C, <i>Eucalyptus grandis</i>	50
Figura 24: Gráficos das temperaturas e da perda de massa x temperatura, 250°C, <i>Eucalyptus grandis</i>	50
Figura 25: Gráficos das temperaturas e da perda de massa x temperatura, 280°C, <i>Eucalyptus grandis</i>	51
Figura 26: Gráfico do ensaio de compressão paralela às fibras da madeira de <i>Eucalyptus grandis</i> sob três tratamentos.	53
Figura 27: Teores de Matérias Voláteis e Carbono Fixo na madeira de <i>Eucalyptus grandis</i> sob três tratamentos térmicos.	54
Figura 28: Ganhos percentuais em Poder Calorífico Superior e Carbono Fixo da madeira de <i>Eucalyptus grandis</i> sob três tratamentos.	56
Figura 29 – Densidade energética da madeira de <i>Eucalyptus grandis</i> sob três tratamentos térmicos.	57
Figura 30: Regressão Linear – PCS em função do CF.....	60
Figura 31: Regressão Linear - PCS em função de MV.	60
Figura 32: Regressão Linear - MOR em função de DAp.....	61
Figura 33: Regressão Linear - DAp em função do MV.	61
Figura 34: Regressão Linear - MOR em função do MV.....	62

1. INTRODUÇÃO

A demanda por fontes alternativas de energia impulsiona o desenvolvimento tecnológico de tal forma que muitos combustíveis e processos de conversão energética, antes julgados como inadequados ou mesmo inviáveis, são agora concorrentes de combustíveis e processos ditos tradicionais. No passado, a descoberta do petróleo condicionou a utilização e o estudo de outras fontes energéticas a níveis secundários. Contudo, com o iminente colapso dos combustíveis fósseis na atualidade, as fontes chamadas alternativas tornam-se soluções práticas e eficientes e vêm ocupando espaço cada vez maior na matriz energética das nações.

Neste contexto, a biomassa exerce um papel bastante relevante, sendo uma das fontes de energia renovável mais explorada e desenvolvida no planeta. Nos países em desenvolvimento a biomassa sempre foi crucial para a geração de energia. Nos países desenvolvidos, onde os combustíveis fósseis se constituem como a base energética, o uso da biomassa está em constante crescimento, sobretudo na produção de combustíveis líquidos para o transporte e no aproveitamento de resíduos.

O Brasil é destaque no mundo devido principalmente ao uso energético da biomassa em duas áreas: a produção de etanol da cana-de-açúcar para veículos automotores e a produção de carvão vegetal a partir de florestas plantadas para siderurgia. Embora grande parte do carvão vegetal utilizado nas siderúrgicas ainda seja proveniente de florestas nativas, a cada ano que passa a parcela das florestas plantadas tem se tornado mais significativa, atingindo 50,4% do carvão vegetal consumido nas siderúrgicas em 2005 (AMS, 2006).

Os processos de conversão energética da biomassa vegetal são pesquisados no Brasil, com maior ênfase, desde as crises do petróleo na década de 1970. O nível que tais pesquisas alcançaram se evidencia nos números das indústrias de base florestal. Em 2004 foram plantados 115.580 hectares de florestas energéticas (AMS, 2005). A produtividade de tais florestas no Brasil alcança em média 34 m³/ha.ano, enquanto que em outros países como Portugal chega somente a 13 m³/ha.ano (ABRAF, 2006). Em 2005 o consumo industrial de madeira em toras atingiu a marca de 150,8 milhões de metros cúbicos; 21% (cerca de 31,9 milhões de m³) foram consumidas pela siderurgia (ABRAF, 2006). No mesmo ano a

produção de carvão vegetal proveniente de florestas plantadas foi de 17,8 milhões de metros de carvão (ABRAF, 2006).

Outra importante fonte de biomassa para energia são os resíduos do setor florestal. A geração de resíduos começa na exploração florestal com o abate e o processamento das árvores no campo e segue no beneficiamento das toras até o uso final da madeira, seja na indústria de celulose ou de móveis. Tais resíduos tornam-se matéria-prima para vários outros processos; quando produzidos nos talhões dos povoamentos florestais podem ser repositores de matéria orgânica, nas serrarias podem tornar-se insumo para a fabricação de painéis ou para a compostagem, são ainda utilizados na fabricação de pequenos objetos de madeira ou na marchetaria entre outros usos. O uso energético da biomassa pode ser de forma direta, pela combustão, ou indireta, pelos processos de conversão para a produção de combustíveis energeticamente mais densos.

Estes processos variam de acordo com o combustível que se deseja obter, que pode ser sólido, líquido ou gasoso. Os combustíveis sólidos são obtidos termoquimicamente e suas características alteram-se em função da temperatura final do processo.

O tratamento térmico que se dá à madeira causa alterações químicas, físicas e mecânicas de acordo com o aumento da temperatura. Portanto um tratamento térmico varia desde a secagem (eliminação de água livre) até a gaseificação (produção de gás). No gradiente entre estes dois extremos há eliminação e formação de diversas substâncias segundo reações simples e complexas; como consequência ocorre uma densificação energética em função da maior concentração de carbono proporcional à massa total de madeira.

Dentro do gradiente de temperatura dos tratamentos térmicos há um limite entre o endotérmico e o exotérmico. O último processo de conversão endotérmica é a torrefação, que ocorre até 280°C, temperatura por volta da qual se inicia a fase exotérmica e a produção de carvão (Doat e Petrof, 1975; Antal, 2003). Portanto o produto da torrefação é a biomassa torrificada, um material entre a biomassa seca e o carvão (Felfli, 2000). A torrefação promove um aumento da friabilidade da madeira o que facilita sua moagem (Doat, 1985). Por ocorrer a temperaturas relativamente baixas a torrefação é um processo de conversão energética rápida e apresenta-se como uma alternativa real para a valorização dos resíduos ligno-celulósicos.

1.1. Objetivos

A possibilidade de um melhor aproveitamento dos resíduos de madeira nos diversos segmentos florestais através deste beneficiamento energético corrobora para o objetivo global deste projeto: realizar o condicionamento da madeira para a produção de biocombustíveis.

Assim, os objetivos específicos são avaliar os efeitos da torrefação nas propriedades físicas, químicas, mecânicas e energéticas na madeira de *Eucalyptus grandis* e produzir o balanço energético do processo. Serão analisadas as principais propriedades energéticas (densidade energética e poder calorífico), além de física (densidade aparente) químicas (teores de matérias voláteis, cinzas e carbono fixo) e mecânica (resistência mecânica à compressão paralela às fibras).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Energia

A energia está presente em tudo e em todos os momentos da vida. Contudo, é de difícil definição, talvez por ser algo abstrato, não palpável. O conceito físico mais usual trata energia como a capacidade de um sistema em realizar trabalho. Trabalho é o produto de uma força aplicada em um corpo (sistema) de massa conhecida pelo seu conseqüente

deslocamento. De maneira simplificada, um sistema é um complexo de elementos em interação (von Bertalanffy, 1975).

A termodinâmica, ciência da energia, já tem outras classificações para sistemas. Um sistema termodinâmico pode ser isolado quando não sofre qualquer interferência do ambiente exterior a ele, fechado quando não há transferência de massa, mas pode haver transferência de energia com o ambiente, e aberto quando ocorre transferência de massa e energia com o ambiente (DOE, 1992).

O entendimento de sistemas termodinâmicos auxilia na compreensão das leis da Termodinâmica. A primeira lei – Lei da Conservação da Energia – afirma que a energia não pode ser criada tampouco destruída, mas sim transformada. Assim se esclarece a transferência energética nas fronteiras dos sistemas. Porém, não está claro o processo de transformação da energia. Para tanto a segunda lei – Lei da Dissipação da Energia – afirma que a perda de energia na fronteira de um sistema é irreversível e contribui para o aumento da Entropia ou o estado de máxima desordem que acarreta na “morte térmica” de um sistema.

A termodinâmica exige então uma definição mais abrangente de energia. O calor, por exemplo, é a energia em trânsito, mas em determinados casos ele representa um processo de dissipação energética em um sistema, sendo impossível sua recuperação. Assim, nenhum trabalho realizado tem 100% de eficiência, sempre haverá uma perda energética (segunda lei). Nogueira (2001) destaca a definição de Maxwell de 1872 como a mais correta: “*energia é aquilo que permite uma mudança na configuração de um sistema, em oposição à uma força que resiste a esta mudança.*” Hémerly e colaboradores (1993)

chegaram a um conceito mais simples em que definem energia como “*o que se deve fornecer a um sistema material, ou retirar dele, para transformá-lo ou modificá-lo*”.

A energia pode ainda ser dividida em duas partes: a exergia ou energia disponível e a anergia ou energia não disponível. A exergia pode ser convertida em trabalho, ao contrário da anergia (Haddad & Aguiar, 1999). A exergia pode ser entendida como o trabalho realizado e a anergia é a perda em um processo de conversão energética.

As fontes de energia podem ser primárias quando provenientes da Natureza (sol, ventos, rios, marés, etc.) ou secundárias quando sofreram algum processo de conversão (álcool, carvão vegetal, derivados de petróleo, etc.). A conversão energética se dá para que se tenha uma forma energética última que atenda a alguma demanda específica como calor ou luz; esta é definida como energia útil (Marques *et al.*, 2001).

Reis (2003) ainda categoriza as fontes de energia como renováveis ou não-renováveis. A diferença entre essas duas fontes está na velocidade de consumo em relação à velocidade de reposição pela Natureza; as não-renováveis são consumidas mais rapidamente, pois a reposição destas requer processos que duram milhões de anos como no caso do petróleo, gás natural, carvão mineral, elementos radioativos e a energia geotérmica. A reposição das fontes renováveis é relativamente curta quando se trata da biomassa que pode demorar 7 anos como em plantios de eucalipto, ou mesmo constante como os rios perenes e os ventos em determinadas regiões.

As conversões energéticas expressam as formas nas quais a energia se apresenta na natureza. Portanto, conforme Udaeta (2004) a energia é encontrada como:

- Energia nuclear: energia dentro dos átomos que pode ser liberada por fusão ou fissão nuclear, porém de difícil controle;
- Energia química: energia acumulada nas ligações entre átomos e moléculas e que é liberada pela quebra destas ligações, já bastante utilizada nos combustíveis líquidos (álcool, gasolina, etc.);
- Energia elétrica: é a circulação de cargas elétricas em campo de potencial elétrico, talvez a forma mais utilizada, sendo o principal fim dos processos de conversão energética;

- Energia térmica: apresenta-se como radiação (sol) ou energia interna, é a expressão da energia na forma de calor, sendo transferida pelos processos de condução, convecção ou radiação;
- Energia mecânica: se divide em energia potencial e cinética. A energia potencial relaciona-se com a posição, podendo ainda ser elástica ou gravitacional. A energia cinética relaciona a massa com a velocidade de um corpo;
- Energia magnética: forma acumulada em campos magnéticos, utilizada no transporte (trens modernos) e na transformação de energia elétrica em transformadores.

2.1.1. Matriz Energética

Os combustíveis fósseis – petróleo, gás natural e carvão mineral – têm dominado a matriz energética mundial desde a revolução industrial, quando um conjunto de mudanças, sobretudo tecnológicas e sociais, permitiram o estabelecimento de uma cultura de massa (Hémery *et al.*, 1993). Até então a humanidade baseava seu consumo energético fundamentalmente na biomassa, pois a geração de energia era localizada nas residências para cocção e aquecimento e muito pouco em processos produtivos como no caso de moinhos de vento e rodas d'água.

A invenção da máquina à vapor foi o grande salto tecnológico que permitiu a mudança de paradigma em escala global. Os novos processos produtivos exigiam um aporte energético jamais gerado e o combustível para tanto deveria ser abundante e eficiente. No primeiro momento o carvão mineral foi a fonte primordial, graças à superexploração da lenha que causou escassez e alta do preço e a conseqüente busca por combustíveis alternativos (Hémery *et al.*, 1993). Em seguida, o petróleo tornou-se a base das relações energéticas no planeta. Ainda assim, milhões de pessoas, “pessoas dos ecossistemas” que vivem nas florestas e no meio rural, dependem primordialmente da biomassa para a subsistência (Sachs, 2002).

A matriz energética mundial mantém-se relativamente estável há algumas décadas, desde a revolução energética expressa na mudança das fontes energéticas renováveis pelos combustíveis fósseis, sobretudo carvão mineral e petróleo (Hémery *et al.*, 1993). O que mudou substancialmente foi a quantidade de energia ofertada. Enquanto em 1973 foram ofertados 6,128 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (tep), em 2005 a oferta

mundial de energia foi de 11,435 milhões de tep (Figura 1). Neste intervalo de 32 anos a participação das fontes não renováveis pouco mudou, houve uma queda da participação do petróleo e aumento do carvão mineral, da nuclear e do gás natural. As fontes renováveis também quase não se alteraram, sendo a biomassa a mais representativa e outras como aproveitamento direto da energia solar, eólica e geotérmica são quase insignificantes no contexto mundial.

Em cenários simulados pela Agência Internacional de Energia, considerando os níveis de consumo e a não alteração das políticas atuais, a oferta chegará a 17,100 milhões de tep em 2.030 e a proporção pouco mudará (IEA, 2007).

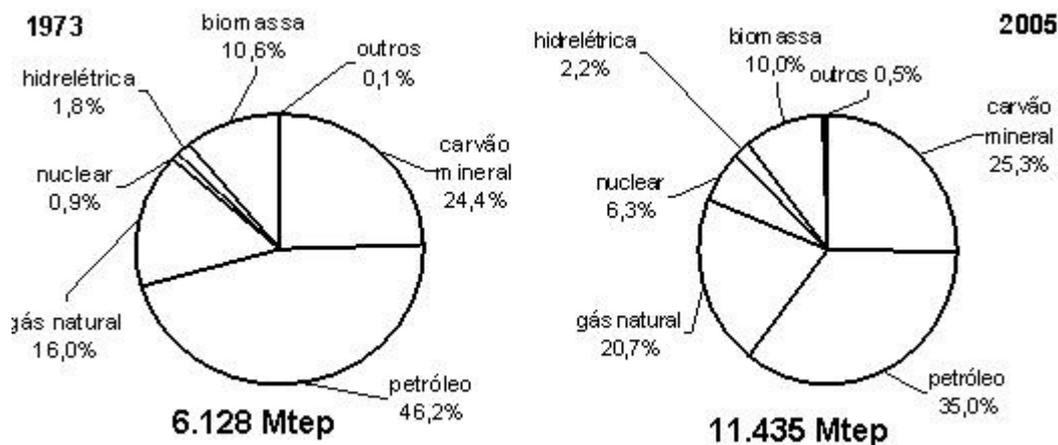


Figura 1: Oferta mundial de energia em 1973 e 2005. Fonte: IEA, 2007.

Porém a matriz energética é muito mais complexa, tais valores não se referem ao acesso à energia. No mundo, uma em cada quatro pessoas não tem acesso à energia moderna, ou seja, sua relação com energia provém das formas primitivas que garantem sua subsistência como a lenha usada para aquecimento e cocção de alimentos (Caillé, 2006).

Embora a oferta seja predominante em combustíveis fósseis ainda há vários países baseados em fontes renováveis, sobretudo a biomassa. Países africanos como Uganda que tem 90% de sua matriz energética composta pela biomassa, 45% na Índia e 30% na China (Hall *et al.*, 2000). Goldemberg (2000) relata que o fato destes países serem subdesenvolvidos ou em desenvolvimento atribui um caráter de pobreza à biomassa, como um combustível “não-comercial”. Ele afirma que esta é uma visão equivocada, pois muitos países desenvolvidos obtêm da biomassa parcela significativa de energia como a

Suécia (18%) e a Finlândia (20%). No mundo 80% da oferta de fontes renováveis são de biocombustíveis e 75% destes referem-se à lenha, ao carvão vegetal e ao licor negro do processo de produção de papel e celulose (FAO, 2007).

A Oferta Interna de Energia brasileira (OIE) é certamente a mais equilibrada no planeta. O Balanço Energético Nacional (BEN) congrega dados desde o começo da década de 1970. No início dos estudos a matriz energética brasileira era dominada pelas fontes renováveis, com 58,4% do total ofertado contra 41,6% de fontes não renováveis (Figura 2).

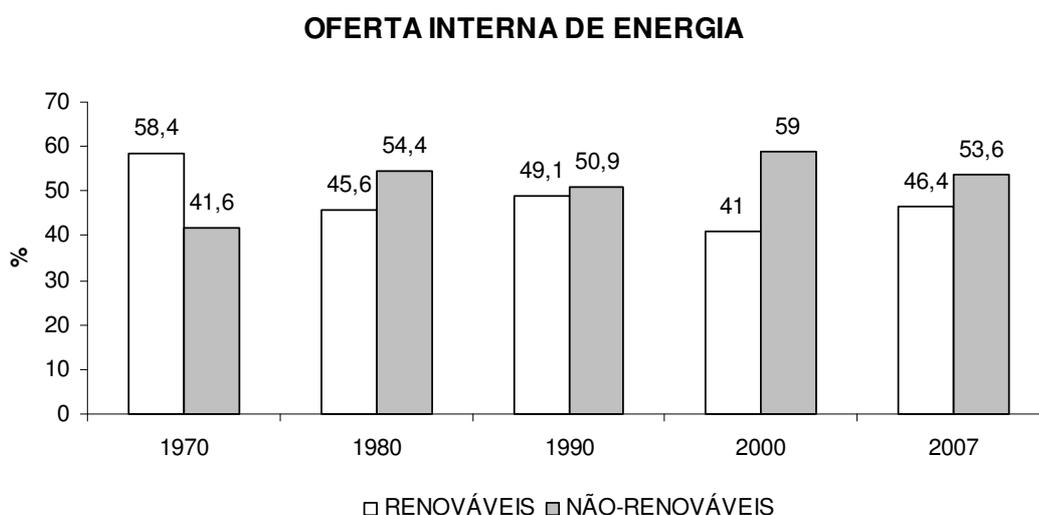


Figura 2: Evolução da participação das fontes renováveis e não renováveis no Brasil.

Fonte: BEN, 2007.

Porém essa relação foi se invertendo, e já no início da década seguinte as não-renováveis representavam a maior parcela da oferta de energia com 54,4%. Esta inversão demonstra a adoção de um caminho de desenvolvimento baseado majoritariamente no petróleo e tal quadro se mantém até os dias de hoje, com 53,6% de não-renováveis e 46,4% de renováveis. A crise dos preços deste combustível fóssil nos anos 70 estimulou em parte a pesquisa de fontes alternativas. Muitos países investiram em novas tecnologias para utilização energética de recursos naturais renováveis, inclusive políticas públicas foram criadas, como no caso do PROALCOOL em 1975.

Há que se considerar também o aumento do volume de oferta energética ao longo dos anos, enquanto que em 1970 a OIE era de 66,9 milhões de tep, em 2007 atingiu 239,4 milhões de

tep (Figura 3). Do montante total 91,7% são gerados no próprio país enquanto que 8,3% são importados na forma de petróleo e derivados, carvão mineral, gás natural e energia elétrica (BEN, 2008). Uma análise mais profunda destes números explicita a relação entre a OIE e a população ou a OIE e o PIB brasileiro, ou seja, a OIE e o crescimento do país.

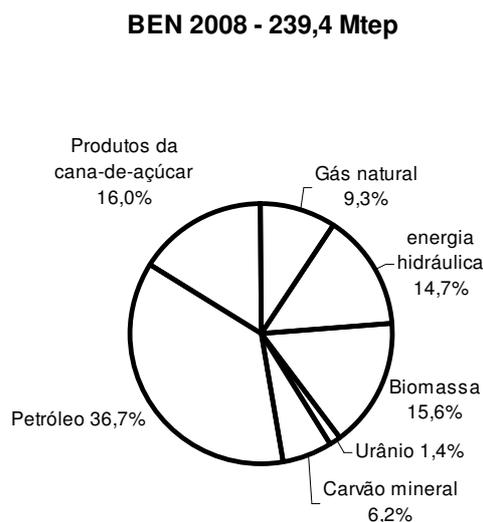


Figura 3: Oferta Interna de energia no Brasil, 2007. Fonte: BEN, 2008.

As “outras” fontes componentes da OIE brasileira referem-se aos projetos de aproveitamento da energia solar, eólica e geotérmica. Estes números devem aumentar em virtude de políticas públicas de estímulo à implantação de painéis solares para aquecimento doméstico da água e também devido ao enorme potencial eólico que o país apresenta, sobretudo na região Nordeste. O problema de tais tecnologias é o elevado custo de implantação.

A matriz energética brasileira reflete indiretamente as condições em que vivem milhões de brasileiros que ainda não têm acesso à energia elétrica e, portanto, têm a lenha como principal insumo energético. Em 2005, o consumo de lenha foi de 80,9 milhões de m³, sendo 35,5 milhões de m³ provenientes de florestas plantadas e 45,4 milhões de m³ de florestas nativas (SBS, 2006).

Há um equilíbrio também entre as principais fontes renováveis com 33,5 milhões de tep de origem hidráulica, 33 milhões de tep de cana-de-açúcar e 28,6 milhões de tep de lenha e carvão vegetal. A energia hidráulica dos rios é utilizada exclusivamente para geração de energia elétrica, a cana-de-açúcar, mais especificamente o bagaço é usado para produção de energia elétrica para as próprias usinas de açúcar e álcool e a lenha e seu derivado, o carvão vegetal, são utilizados principalmente para geração de energia térmica em indústrias alimentícias, na produção de cimento, em olarias e gesseiras e na indústria metalúrgica e siderúrgica.

2.1.2. Calor

Calor é energia em trânsito e reflete alterações em um sistema, pois pode ser proveniente tanto da vizinhança como das reações intrínsecas ao sistema (DOE, 1992). O calor (q) é então uma forma de medir a dinâmica energética dos sistemas, junto ao trabalho (w), é um componente da energia interna (ΔE) de um sistema. A transferência de calor da vizinhança para o sistema e o trabalho realizado sobre ele contribuem para o aumento da energia interna (Brown *et al.*, 1997) explicitado na equação abaixo:

$$\Delta E = q + w$$

O sentido da transferência do calor em relação ao sistema determinará se há um processo endotérmico ou exotérmico. No processo endotérmico o sistema absorve o calor da vizinhança, como o derretimento do gelo; no processo exotérmico o sistema cede calor à vizinhança, como na combustão da madeira.

O calor sempre flui de uma área de maior temperatura para uma de menor, assim a temperatura é um indicador da média da energia cinética das moléculas de um corpo, portanto é uma medida de intensidade enquanto o calor é uma medida de quantidade (Marques *et al.*, 2001).

Para melhor compreensão dos fenômenos relativos à transferência de calor é preciso definir o calor específico, o calor sensível e o calor latente. O calor específico é a quantidade de calor necessária para aumentar a temperatura de uma unidade de massa de um material em 1°C. Calor sensível é o calor acrescido ou cedido por uma substância que causa mudança de temperatura sem causar mudança de fase. Calor latente é o calor

acrescido ou cedido por uma substância que não altera a temperatura da mesma, mas causa mudança de fase (Marques *et al.*, 2001).

Calores acrescidos ou cedidos por um sistema ou mesmo dentro dele dependem da diferença de temperatura, da geometria e das propriedades físicas dos materiais envolvidos (DOE, 1992). O calor pode ser transferido por condução, convecção ou radiação que podem ocorrer individualmente ou em conjunto dependendo das condições do processo.

A condução ocorre por vibração molecular e ocorre em corpos sólidos (Eyglunent, 1994). Portanto, a transferência se dá por colisão de moléculas com maior energia cinética (agitação) com moléculas mais “lentas”. Cada material tem uma condutividade térmica própria que determina a velocidade com que o calor flui através dele.

A convecção é a transferência de calor em materiais fluidos. O fluxo é induzido por diferenças de densidade causada pelo próprio calor (Raithby & Hollands, 1999). A zona menos densa de um fluido (mais quente) troca de lugar com a mais densa (mais fria) que em contato com a fonte de aquecimento torna-se menos densa e mantém o ciclo.

A radiação é a forma com que o calor se desloca sem a necessidade de um meio material através de ondas eletromagnéticas. Todos os corpos, independente do estado físico, emitem radiação (Eyglunent, 1994). É a forma como a energia solar chega ao planeta, já que entre ele e o sol não há qualquer matéria.

O conhecimento e controle das formas de transferência de calor permitem tratamentos térmicos mais eficientes, mas também é preciso conhecer as propriedades do material sob tratamento.

2.2. Biomassa

Segundo as definições e classificações já citadas a biomassa é uma fonte primária e renovável de energia química apta a ser convertida em outras formas energéticas, tanto diretamente na queima de lenha para geração de calor como indiretamente na carbonização ou na produção de etanol. A biomassa é produto da conversão da energia luminosa em energia química através da reação de fotossíntese:



A fotossíntese é o processo fundamental de conversão energética. Esta reação garante fornecimento de energia para toda uma cadeia de organismos. Contudo é um processo de baixa eficiência visto que do total de energia solar absorvida pelas folhas apenas 20% é convertido em energia química, o que determina uma eficiência teórica de 4% para a fotossíntese (Caron, 2003).

O aproveitamento energético desta reação pode ser feito de quatro formas diferentes de acordo com o produto químico acumulado (Acioli, 1994). A biomassa vegetal energética divide-se então em sacarídeos ($C_{11}H_{22}O_{11}$), amiláceos ($C_6H_{10}O_5$) triglicerídeos (óleos vegetais) e ligno-celulósicos (lignina e celulose). Deve-se ressaltar que toda a biomassa vegetal é ligno-celulósica, variando a proporção em cada espécie.

A biomassa considerada como um biocombustível é também diferenciada de acordo com a matéria-prima (Nogueira *et al*, 2000). Quando proveniente da madeira é dendrocombustível, se proveniente de plantações não florestais é um agrocombustível e há ainda a biomassa encontrada em aterros sanitários e lixões, os resíduos urbanos.

2.3. Madeira

A madeira é dos materiais mais utilizados pelo homem, desde o homem de Neanderthal que desenvolvia utensílios e armas para a caça e o primeiro processo de conversão energética dominado por ele: o fogo (Morey, 1976; Risbrudt, 2005). Durante a evolução da humanidade os avanços tecnológicos permitiram o conhecimento e uso integral da madeira para os mais diversos fins, mas ainda sim o uso energético é um dos mais expressivos. A madeira é ainda a maior fonte de energia para cocção e aquecimento na maior parte do planeta. O consumo mundial de madeira como combustível totalizou mais de 1,8 bilhões m^3 em 2002, representando mais de 54% do consumo mundial de madeira (Risbrudt, 2005).

Uma primeira análise da madeira é sua divisão em cerne e alburno. Tal divisão evidencia as funções de sustentação por células mortas do cerne e a função de condução de seiva bruta (água e sais minerais) e de armazenamento em células vivas do alburno. Em determinadas espécies há uma separação clara do cerne e alburno por diferença de cor, mas outras espécies não se apresentam desta forma (Figura 4).

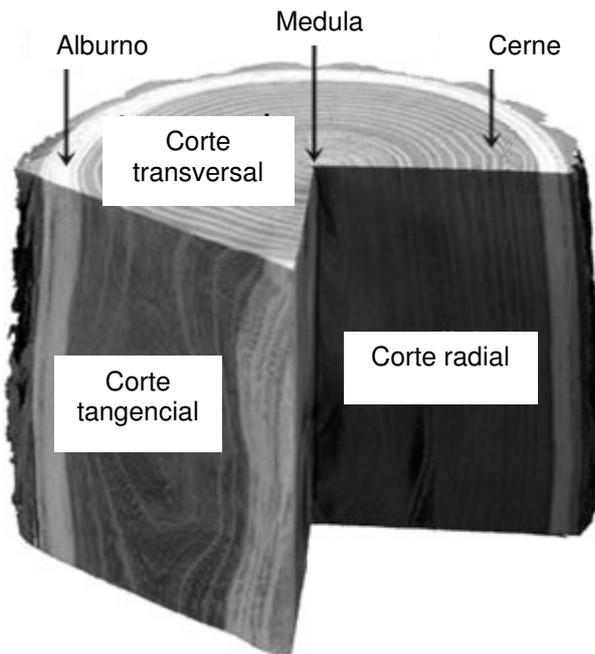


Figura 4: Representação do plano de cortes e do cerne e alburno. (modificado – Laboratório de Produtos Florestais, UTAD).

Existem dois grandes grupos de árvores: as coníferas ou madeira mole e as folhosas ou madeira dura. O primeiro grupo é das que produzem sementes descobertas ou nuas (Gymnospermas) e o segundo é das que produzem sementes cobertas (Angiospermas). As coníferas concentram-se mais nas zonas de clima temperado do planeta enquanto que as folhosas encontram-se mais nos trópicos (Bowyer *et al.*, 2003).

De modo geral, pode-se afirmar que a madeira é essencialmente composta por 50% carbono, 44% de oxigênio e 6% de hidrogênio, além de traços de elementos inorgânicos (Rowell, 2005). As várias combinações destes elementos formam, entre outros, os três polímeros principais constituintes da madeira: celulose, hemicelulose e lignina.

Embora macroscopicamente haja diferenças evidentes entre os vários grupos de árvores e mesmo entre indivíduos da mesma espécie, as células vegetais que compõem a madeira seguem um mesmo padrão (Figura 5). A parede das células vegetais é constituída da lamela média, da parede primária e da parede secundária. A parede secundária é formada por três camadas (S1, S2, S3) que se diferem pelo alinhamento das microfibrilas que as formam. As microfibrilas são formadas por cadeias de moléculas de celulose e

hemicelulose, que por sua vez formam as microfibrilas que constituirão as paredes celulares. A lignina age como o agente “cimentante” que incrusta e aglutina a celulose e a hemicelulose (Morey, 1976).

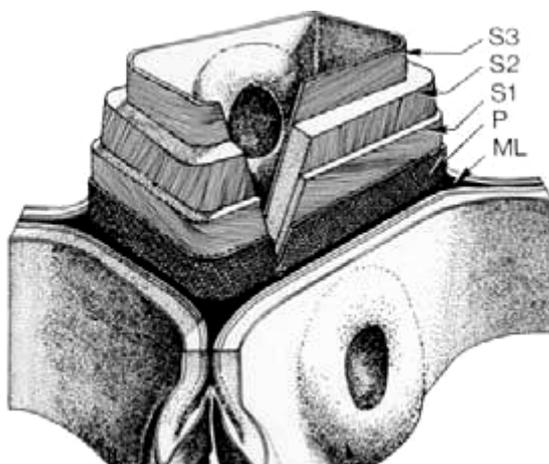


Figura 5: Esquema da parede de células vegetais. ML – lamela média; P – parede primária; S1, S2, S3 – camadas formadoras da parede secundária. (modificado – Rowell *et al*, 2005).

O principal componente da madeira viva é a água, contudo, analisando este biopolímero seco a 0% de umidade, verifica-se a presença de 65 a 75% de carboidratos combinados com 18 a 35% de lignina. As coníferas e as folhosas se distinguem quanto ao teor de cada polímero (tabela 1).

Tabela 1: Composição química molecular de folhosas e coníferas. (modificado – Rowell, 2005).

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

2.3.1. Celulose

A celulose é a substância orgânica natural mais abundante do planeta e a madeira é a principal fonte. Trata-se de um polissacarídeo formado por monômeros de glicose ($C_6H_{12}O_6$) ligados pelas extremidades, formando longas cadeias. O grau de polimerização das moléculas de celulose pode ultrapassar os 10.000 (Bowyer *et al.*, 2003).

A celulose é parcialmente cristalina e insolúvel em água. É difícil isolar a celulose em uma forma pura, pois ela está intimamente associada à hemicelulose e à lignina (Rowell *et al.*, 2005). Ácidos sulfúrico, hidrolórico e fosfórico são capazes de dissolvê-la (Kollmann & Côté, 1968). A figura 6 ilustra a estrutura de parte de uma cadeia celulósica.

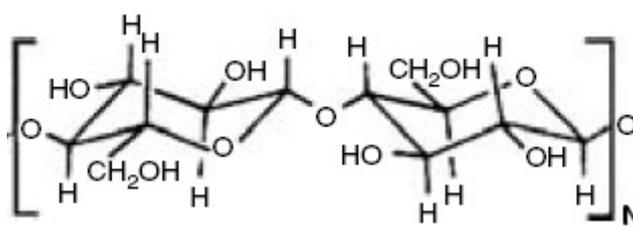


Figura 6: parte da cadeia de celulose. Fonte: Rowell *et al.*, 2005. Adaptado.

2.3.2. Hemicelulose

Em associação com a celulose a hemicelulose forma a holocelulose. A hemicelulose é um polissacarídeo essencialmente linear de baixo peso molecular e baixo grau de polimerização (Kollmann & Côté, 1968). Quando formadas por açúcares de cinco átomos de carbono são conhecidas como pentosanas, se forem de seis átomos são as hexosanas.

Os principais açúcares formadores das hemiceluloses são D-xilopirranose, D-glucopirranose, D-galactopirranose, L-arabinofuranose, D-mannopirranose, e os ácidos D-glucopiranosilurônico e D-galactopiranosilurônico (Figura 7). As hemiceluloses são mais higroscópicas que os outros componentes e facilmente hidrolisadas por ácidos (Browning, 1963). Normalmente a hemicelulose é formada por mais de um tipo de açúcar e é nomeada pelos açúcares que contém (Rowell *et al.*, 2005).

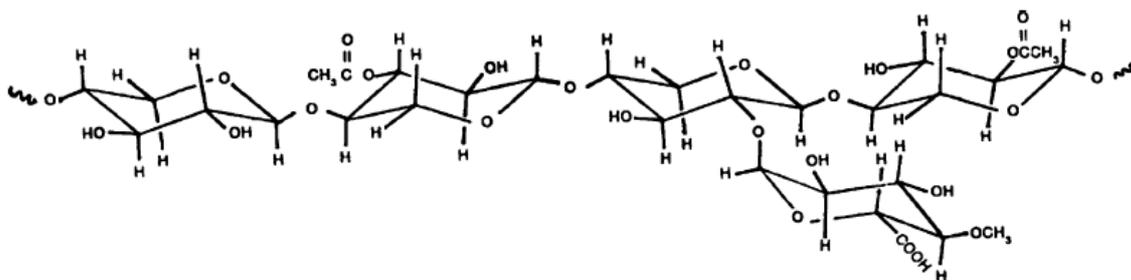


Figura 7: estrutura molecular parcial de O-acetil-O-metilglucoroxilana. Fonte: Rowell, 2005. Adaptado.

2.3.3. Lignina

A lignina é um polímero aromático complexo de alto peso molecular constituído de unidades de fenil-propano. Apesar de ter carbono, oxigênio e hidrogênio em sua composição ela não é um carboidrato e sim um composto fenólico (Rowell *et al.*, 2005). A lignina é depositada após a formação da lamela média e das paredes primária e secundária, processo chamado de lignificação. Ao final de tal processo a célula morre. Os seus principais precursores são álcoois *p*-cumarílico, coniferílico e sinapílico (Figura 8). A lignina é praticamente insolúvel em qualquer solvente e não hidrolisável em monômeros (Browning, 1963, Kollmann & Côté, 1968).

O peso molecular da lignina depende do método de extração, variando de 260 a 50 milhões. A lignina pode estar associada à hemicelulose, mas não há evidências de associação com celulose (Rowell *et al.*, 2005).

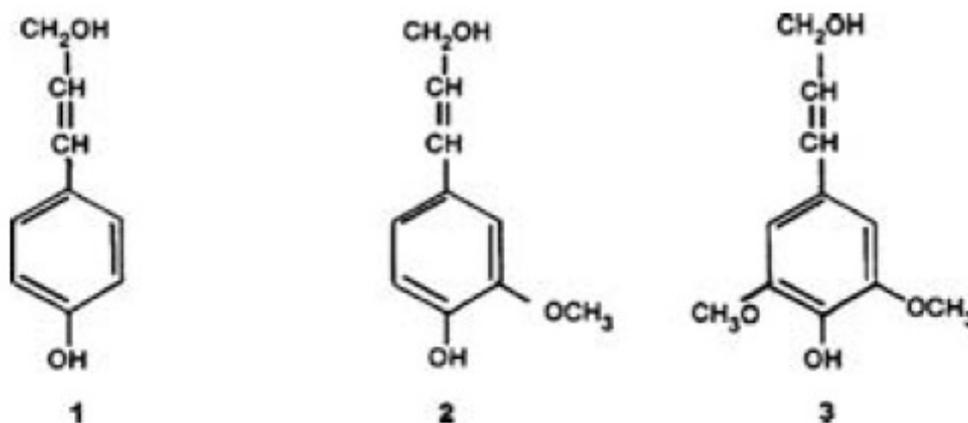


Figura 8: Álcoois precursores da lignina. 1 – álcool *p*-cumarílico; 2 – álcool coniferílico; 3 – álcool sinapílico. (modificado – Rowell *et al.*, 2005).

2.3.4. Extrativos

Além dos três compostos supracitados a madeira ainda é constituída de outros inúmeros de ampla variação. Estes não fazem parte da composição estrutural da madeira e de maneira geral, são facilmente solúveis em solventes orgânicos ou água, daí serem chamados de extrativos. Muitas vezes estas substâncias são as responsáveis pelo cheiro, cor, sabor e resistência natural ao apodrecimento de certas espécies (Brito e Silva Jr., 2005).

A maior parte dos extrativos está localizada no cerne das árvores, o que explica a coloração mais escura de algumas espécies (Kollmann & Côté, 1968). Os extrativos mais importantes são os óleos essenciais ou voláteis, as resinas, os taninos e os terpenos por terem valor econômico.

2.4. Propriedades da madeira

O conhecimento das propriedades físicas, mecânicas e energéticas da madeira determina o seu melhor uso. A madeira é um material heterogêneo e anisotrópico, portanto as propriedades são características que variam entre espécies, entre indivíduos de uma mesma espécie e até dentro de uma mesma árvore. Portanto a validação de uma propriedade é determinada pela caracterização de peças em condições ideais, livres de defeitos, atendendo à uma amostragem representativa de forma a diminuir os erros intrínsecos à qualquer análise.

2.4.1. Propriedades físicas

Algumas propriedades físicas da madeira são representativas e determinantes de espécies, contudo não são características mensuráveis, quantitativas, como textura, desenho e brilho. A cor, o cheiro e o gosto são propriedades relacionadas à presença maior ou menor de extrativos, sobretudo o tanino (Burger & Richter, 1991). A grã é a orientação dos elementos anatômicos estruturais da madeira. Ela pode ser direita ou irregular como espiral, revessa, crespada ou inclinada; o tipo de grã tem forte influência sobre a resistência mecânica (Burger & Richter, 1991).

O teor de umidade da madeira é fator determinante para outras propriedades como massa, estabilidade dimensional, resistência entre outras. As várias espécies de árvores podem conter de 30% a 200% de água e tais teores variam inclusive entre cerne e alburno (Forest

Product Laboratory, 1999). A água está presente na madeira de duas formas distintas: dentro das cavidades celulares e entre as células (água livre) e aderida às microfibrilas (água presa). O limite entre estas duas formas determina o ponto de saturação das fibras (PSF), quando já não há água livre, variando de 22% a 30% em função da espécie (Martins, 1988). A partir do PSF ocorrem alterações na madeira que podem comprometer seu uso.

A densidade é outra propriedade física de extrema importância que tem relação direta com o teor de umidade. A densidade ou massa específica reflete a quantidade de matéria madeira por unidade de volume. A massa específica real da madeira está entre 1,40 e 1,62 g/cm³, entretanto a madeira apresenta uma variação maior em função dos métodos de medição que consideram espaços vazios, determinando valores entre 0,16 e 1,40 g/cm³ (Forest Product Laboratory, 1999).

Portanto a medição da massa específica pode ser de quatro formas distintas que consideram o teor de umidade. A massa específica verde é determinada em condições de saturação das fibras, a seca é medida com a madeira à 0% de umidade, a básica considera a massa seca e o volume verde saturado e a convencional densidade aparente é determinada em um teor de umidade definido, normalmente entre 12% e 15% (Melo, 2003).

O comportamento térmico da madeira é avaliado segundo seu calor específico, sua condutividade térmica e sua expansão térmica. O aumento da temperatura da madeira tem relação inversa com as propriedades elásticas e a resistência da mesma (Bodig & Jayne, 1982). A expansão térmica da madeira é levemente maior em altas temperaturas do que em baixas, o teor de umidade faz com que a madeira se contraia mais pela perda de água que se expanda pelo aquecimento (Forest Product Laboratory, 1999). O calor específico da madeira é baixo, 0,324 cal/g°C, contudo varia significativamente com o teor de umidade (Kollmann & Côté, 1968). A condutividade térmica da madeira sofre influência direta do teor de umidade, da densidade, do teor de extrativos e da direção da grã. Em geral, considera-se a madeira como um mal condutor térmico devido à escassez de elétrons livres que facilitam a transmissão de energia e à sua porosidade (Kollmann & Côté, 1968). O sentido da condução de calor é favorecido de 1,5 a 2,8 vezes se for ao longo do sentido da grã em oposição à condução perpendicular à grã (Forest Product Laboratory, 1999).

2.4.2. Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas da madeira são fundamentalmente relativas à resistência frente aos mais diversos esforços. Esta resistência varia em função da direção em que está sob investigação, longitudinal, tangencial ou radial, o que caracteriza a madeira como um material ortotrópico (Forest Product Laboratory, 1999; Melo, 2003). Contudo, as diferenças são pouco significativas e as propriedades são determinadas nas direções paralela e perpendicular às fibras.

As propriedades mecânicas baseiam-se em dois conceitos: a tensão e a deformação. A tensão é a medida das forças internas em um material sob aplicação de uma força externa e pode ser determinada pela tração, pela compressão ou pelo cisalhamento de uma peça ou ainda pela combinação das três, a flexão (Figura 9) (Rowell *et al.*, 2005).

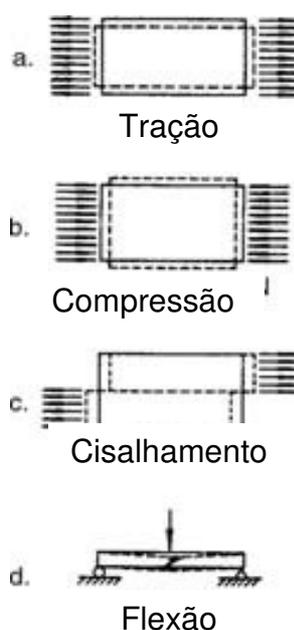


Figura 9: Quatro formas de mensuração das propriedades mecânicas da madeira. Fonte: Winandy & Rowell, 2005. Adaptado.

A deformação é a medida da alteração da forma inicial de um material sob aplicação de carga. No regime elástico, onde as deformações são reversíveis, a tensão e a deformação têm uma relação linear. O limite desta relação é conhecido como limite de

proporcionalidade. A partir deste ponto, à medida que a carga cresce se atinge o regime plástico, onde as deformações são irreversíveis. Portanto cada espécie tem um módulo de elasticidade (MOE) e de ruptura (MOR).

Os principais ensaios para caracterização mecânica da madeira são a tração e a compressão paralela às fibras, a flexão estática, a compressão perpendicular às fibras, o cisalhamento paralelo às fibras, a resistência ao impacto, a dureza e o fendilhamento (Melo, 2003).

Alguns fatores interferem na resistência mecânica da madeira. Há fatores referentes às próprias características da madeira como a massa específica e variabilidade natural inerente à madeira, assim como defeitos naturais e a grã. Outros fatores são referentes às condições externas como umidade e temperatura. E ainda há a interferência do próprio ensaio como o tempo de aplicação da carga (Forest Product Laboratory, 1999; Melo, 2003).

2.4.3. Propriedades energéticas

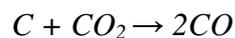
A biomassa apresenta algumas propriedades energéticas importantes que determinarão seu uso direto como combustível ou a necessidade de tratamentos para melhorar tais propriedades. Estas propriedades são a densidade energética, a composição química imediata e o poder calorífico.

Há ainda outras propriedades que não são propriamente energéticas (não tem unidade energética como joules ou calorias), mas são muito importantes, pois contribuem para a avaliação da biomassa como combustível. Desta forma a reatividade, a composição química imediata e molecular (químicas), a porosidade (física) e a friabilidade (mecânica) são propriedades que devem estar inseridas na análise energética global da biomassa, pois juntamente às outras fornecerão subsídios técnicos que validam o seu uso.

A densidade, como já relatado anteriormente, é a quantidade de massa em um determinado volume, no caso de biomassa, expressa em g/cm^3 ou kg/m^3 . A densidade energética relaciona a quantidade de energia contida em um volume específico, apresentada em kcal/m^3 . Essa informação é importante, pois permite avaliar e comparar o potencial energético de fontes energéticas distintas.

A composição química elementar aponta a quantidade dos principais elementos constituintes da madeira, no caso da análise para uso energético o teor de carbono é o mais importante. A análise da composição química molecular explicita três tipos particulares de moléculas: celulose, hemiceluloses e lignina. Finalmente, a composição química imediata denota o teor de umidade, de matérias voláteis, de cinzas e de carbono fixo da madeira. As matérias voláteis são os componentes despreendidos no início da combustão, sendo compostas principalmente por hidrogênio, hidrocarbonetos, monóxido de carbono (CO) e dióxido de carbono (CO₂). As cinzas são os óxidos minerais remanescentes da combustão total da madeira. O carbono fixo é a diferença da massa total de madeira e do somatório dos teores de matérias voláteis e das cinzas. O aumento gradual da temperatura elimina os componentes voláteis da biomassa e o carbono restante responsável pela formação da massa amorfa permanece “fixo” (Gomes e Oliveira, 1980).

A reatividade da biomassa é a capacidade que ela tem de reagir com gases que contenham oxigênio, mais especificamente com dióxido de carbono (CO₂).



Portanto, a reatividade da biomassa é fortemente influenciada pelo teor de carbono fixo. Ela é medida pela porcentagem de CO₂ no gás de saída das reações, quanto menor a porcentagem, mais reativa será a biomassa. Esta propriedade indica a capacidade redutora dos combustíveis e é intensamente influenciada pela porosidade do material.

O poder calorífico é a energia despreendida pela queima de uma unidade de massa de um combustível. Este pode ser expresso em calorias ou joules por grama; 1 caloria = 4,18 joules. O poder calorífico é dito superior (PCS) quando a combustão se efetua a volume constante e a água formada na combustão é condensada. O poder calorífico inferior (PCI) é proveniente da combustão sob pressão constante, ao ar livre, sem a condensação da água formada (Doat, 1977), portanto o teor de umidade exerce influência no poder calorífico da biomassa. A madeira apresenta valores de PCS em torno de 4.500 kcal/kg (Kollman & Côté, 1968).

O poder calorífico da madeira é influenciado também pela sua composição química. Mendes *et al.*, (1982), citando trabalho de Petroff & Doat (1978), demonstrou forte correlação entre os teores de carbono fixo, de matérias voláteis e de cinzas e o PCS da

carbonização de madeiras tropicais, sendo positivo entre teor de carbono fixo e PCS e negativo entre matérias voláteis+cinzas e PCS. Doat (1977) realizou trabalho com madeira de espécies dos trópicos e de regiões temperadas e não observou correlação entre o poder calorífico e a densidade da madeira, no entanto o volume de madeira tem forte relação com seu poder calorífico.

A friabilidade é a capacidade do combustível sólido em gerar finos (pó) quando submetido à abrasão ou queda. Esta propriedade tem maior relação com o carvão vegetal, por se tratar de material bastante friável, com perdas de até 25% de sua massa. Entretanto a friabilidade é uma característica importante para análise dos combustíveis lignocelulósicos que precisam ser cominuídos para a utilização energética.

2.5. Conversão energética da biomassa

A biomassa pode ser energeticamente convertida em biocombustíveis basicamente por duas vias: a via termoquímica e a via bioquímica (figura 10). A via termoquímica utiliza-se do aporte de calor para geração direta de energia ou para produção de combustíveis secundários com maior densidade energética. A via bioquímica converte a biomassa através de processos anaeróbicos, aeróbicos e enzimáticos.

Quando se utiliza o calor para conversão da biomassa em energia térmica, trata-se da combustão. A combustão é a oxidação de materiais carbonosos na presença de oxigênio suficiente para completar o processo (Sørensen, 2004).

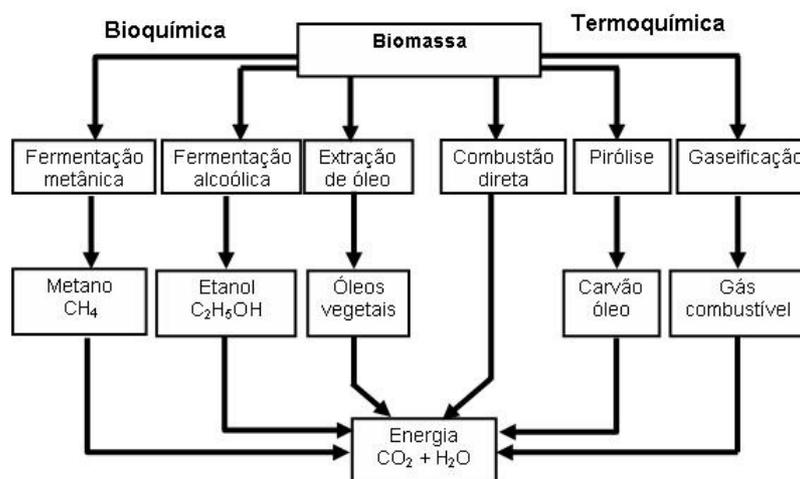


Figura 10: Vias de conversão energética da biomassa.

A reação de combustão do carbono gera o dióxido de carbono e libera 8.100 kcal de calor por kg de carbono queimado. Porém, a combustão não é exclusivamente para combustíveis com carbono, basta que o combustível seja oxidável como no caso de hidrogênio e enxofre. A quantidade de oxigênio determina a eficiência da combustão. Desta forma, quando há oxigênio suficiente, a combustão é completa e já não há mais compostos oxidáveis. Caso contrário, a combustão é incompleta e ainda há compostos oxidáveis como o monóxido de carbono (CO) (CETEC, 1988).

2.5.1. Pirólise

O aporte de calor à biomassa em ausência total ou com presença limitada de agente oxidante (O₂) para produção de combustível energeticamente mais denso chama-se pirólise. A pirólise promove uma concentração de carbono à medida que a temperatura aumenta, em detrimento da diminuição do oxigênio e do hidrogênio, como exposto na tabela 2 (Wenzl, 1970). Na pirólise da madeira a hemicelulose é o componente mais instável, se degrada entre 225 e 325°C, a celulose em seguida se degrada na faixa de 325 a 375°C e a lignina é o componente mais estável, se degradando entre 250 e 500°C, com maior intensidade entre 310 e 420°C (Martins, 1980). A decomposição térmica da celulose conduz principalmente à formação de gases voláteis, enquanto que a decomposição da lignina resulta na formação de produtos sólidos (carvão) e alcatrão (Rowell, 2005).

Tabela 2: Rendimento em massa e composição elementar em pirólise. (modificado – Wenzl, 1970).

Temperatura (°C)	Composição elementar (%)			Rendimento (%)
	C	H	O	
200	52,3	6,3	41,4	91,8
300	73,2	4,9	21,9	51,4
400	82,7	3,8	13,5	37,8
500	89,6	3,1	6,7	33,0
600	92,6	2,6	5,2	31,0
800	95,8	1,0	3,3	26,7
1000	96,6	0,5	2,9	26,5

Quando se busca o líquido proveniente dos vapores condensáveis a pirólise é conhecida como destilação seca da madeira, quando se deseja obter essencialmente carvão o processo é a carbonização, que nada mais é que a concentração de carbono na biomassa pela eliminação de hidrogênio e oxigênio (Brito, 1990). Quando se deseja obter um produto intermediário entre a madeira seca e o carvão o processo chama-se Torrefação.

2.5.2. Tratamentos térmicos da madeira

Em face das inúmeras vantagens que o tratamento térmico traz às propriedades físico-químicas da madeira, este tratamento já é um processo em escala industrial em vários países europeus. Em 2001, Militz estimou que a capacidade de produção de madeira termicamente tratada era de 165.000 m³. Rousset (2004) ressalta que a Finlândia junto à França são os países mais avançados nos processos industriais de tratamento térmico. Contudo, há que se ressaltar que a maioria destes processos é de temperaturas mais baixas e normalmente não visa um uso energético da madeira tratada.

Homan (2004) considera como tratamento térmico todo o aquecimento da madeira à temperaturas maiores que 180°C em atmosfera redutora (com nitrogênio), vapor e óleo quente. Já Brito (2006) considera como termorretificação o aquecimento da madeira em temperaturas inferiores às que causam degradação em seus componentes químicos fundamentais e afirma que tal processo é derivado da torrefação.

Tais tratamentos estão mais em voga na Finlândia, França, Alemanha e Holanda respectivamente com *Finnish Thermowood*, *French Retification*, *Oil Heat Treatment* e *Dutch Plato Wood*.

No processo finlandês *Thermowood* (VTT) a madeira é seca à 100° C por até dois dias e é aquecida com vapor d'água em uma faixa de temperatura de 150 a 240° C em um período de tempo de 0,5 a 4 horas. O processo holandês *Plato* divide-se em três estágios: hidrotermólise, secagem e a cura. As temperaturas variam em cada estágio sendo no primeiro 160 e 190° C e na cura 170 a 190° C. A hidrotermólise dura de 4 a 5 horas, a secagem de 3 a 5 dias e a cura de 14 a 16 horas. O processo francês consiste no aquecimento lento de madeira pré-seca a 12% de teor de umidade em 210 a 240° C, em atmosfera com nitrogênio. O processo alemão baseia-se no aquecimento da madeira com óleo quente dentro de autoclaves com controle da temperatura (180 a 260° C) e da pressão

(2 e 14 bar) e posterior aquecimento (60 a 220° C) ao ar (Rousset, 2004). A tabela 3 explicita as principais características de cada uma destas tecnologias.

Apesar das temperaturas relativamente elevadas na maioria destes processos, estes não podem ser considerados como torrefação propriamente dita em função do uso final de seus produtos não serem como combustíveis. Como o produto final é indicado para usos estruturais e exteriores, justamente pelo aumento da resistência a ataques de xilófagos e pela diminuição da higroscopicidade da madeira, o termo mais correto para estes processos é retificação térmica ou termoretificação.

Tabela 3: Principais características dos processos de tratamento térmico da madeira. Fonte: Rousset, 2004. Adaptado.

Processo	Forma de aquecimento	Secagem antes do tratamento	Atmosfera (pressão)	Temperatura máxima	Duração média do ciclo
Holandês	Autoclave+secador+forno	Sim (18±2%)	Sim (vapor)	200° C	3 a 4 dias
Alemão	Autoclave	Sim (6%)	Sim (óleo)	220° C	20 horas
Finlandês	Forno	Sim (12±2%)	Não (vapor)	240° C	5 dias
Francês	Forno	Sim (12±2%)	Não (Nitrogênio)	250° C	7 a 13 horas

2.6. Torrefação

A torrefação é um tratamento térmico da biomassa que produz um combustível com melhores características energéticas. Tal tratamento caracteriza-se pela ausência parcial ou completa de agentes oxidantes (ar), portanto é uma fase inicial da pirólise que visa a produção de um combustível sólido.

O fator que diferencia a torrefação da carbonização é o caráter endotérmico das reações globais que ocorrem dentro da madeira sob aquecimento e o limite é próximo dos 300°C, quando as reações passam a ser exotérmicas e se inicia a produção de carvão. Assim a madeira torrificada ou torrefeita é um produto intermediário entre a madeira anidra e o carvão vegetal.

A referida faixa de temperatura em que a torrefação ocorre explicita a emissão de compostos voláteis mais sensíveis ao aquecimento. Esta emissão gera uma perda de até

30% de massa e de 10% de conteúdo energético. As características da madeira torrificada variam principalmente em função da temperatura final do processo, mas também sofrem interferência do tempo sob tal temperatura, da velocidade de aquecimento e das propriedades iniciais da madeira.

Todas as propriedades da madeira sofrem alterações graduais de acordo com o aumento da temperatura. A torrefação é justamente o meio pelo qual se busca tais alterações. As principais alterações 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.

Então ela será conduzida em função do uso final da madeira torrificada. No caso da construção civil é interessante o aumento da estabilidade dimensional, da durabilidade biológica e da diminuição da higroscopicidade embora a diminuição das propriedades mecânicas impeça o uso da madeira torrificada em funções estruturais.

No uso energético a diminuição da higroscopicidade garante melhores desempenhos em geração de energia térmica, pois não há gasto energético para evaporação da água, além da inexpressiva absorção de umidade do ambiente que ela passa a ter, o que permite o armazenamento do combustível por períodos mais longos. A diminuição das propriedades mecânicas reflete-se no aumento da friabilidade que é a propriedade da madeira em gerar finos (pó). Há uma diminuição da resistência mecânica que torna a madeira torrificada mais quebradiça e há a conseqüente formação de finos. A queima de madeira em forma de finos é mais eficiente, pois há um aumento da superfície específica do combustível o que provê melhores condições para transferência de calor; várias partículas têm maior superfície específica somadas que uma peça única de madeira.

No mundo não há processo de torrefação para uso energético, embora tenham existido alguns na década de 1980 em função das sucessivas crises do petróleo que estimularam a pesquisa e o desenvolvimento de tecnologias para o aproveitamento de fontes renováveis. Mesmo com a confirmação das vantagens da torrefação, há somente processos de tratamento da madeira para uso na construção civil, desenvolvidos basicamente na Finlândia, França, Alemanha e Países Baixos. Os usos energéticos mais promissores da madeira torrificada vão desde o uso doméstico para aquecimento até o uso industrial para fusão de metais ou geração de energia elétrica.

2.6.1. Características químicas da torrefação

A torrefação é um tratamento térmico a temperaturas relativamente baixas (225 – 300°C) que visa produzir um combustível com maior densidade energética pela decomposição das hemiceluloses (Prins, 2006). A madeira como um todo começa a sofrer degradação térmica (alteração estrutural além da perda de água) propriamente dita a partir de 180°C com a liberação de dióxido de carbono, ácido acético e alguns compostos fenólicos (Girard & Shah, 1991). Dos três principais componentes da madeira o primeiro a se degradar é a hemicelulose que inicia sua degradação à 225°C e está completamente degradada à 325°C (Rowell, 2005).

A partir dos 100°C alguns fenômenos ocorrem com a madeira e alteram suas características físicas e químicas. Acima dos 100°C inicia-se a secagem da madeira, além da água ligada higroscopicamente, a madeira começa a perder a água de constituição (Gomes e Oliveira, 1980). A degradação térmica, de forma global, é endotérmica até o fim da torrefação, então a partir dos 300°C o processo passa a ser exotérmico. Em cada etapa da degradação térmica da madeira há a formação mais expressiva de alguns produtos em relação a outros. As fases, os intervalos de temperatura e os principais produtos em cada fase constam da tabela 4.

Tabela 4: Fases e produtos da degradação térmica da madeira.

Fase	Temperatura (°C)	Produtos
I (endotérmica)	Até 200	Água (secagem)
II (endotérmica)	200 a 270-280	Água e ácido acético
III (exotérmica)	280 a 350-380	Carvão, ácido acético, metanol e alcatrão leve
IV (exotérmica)	380 a 500	Carvão e alcatrão
V (exotérmica)	Acima de 500	Degradação do carvão

Embora globalmente se considere que até 280°C ocorram reações endotérmicas, Almeida (2007) identificou reações exotérmicas em experimento com aquecimento de *Eucalyptus citriodora* a 220°C (figura 11). Este fato pode ser corroborado pelo trabalho de Inari e colaboradores (2007) no qual foi observada a formação de material carbonoso (carvão) em

tratamento a 240°C, através de análise dos espectros na faixa de 125-135 ppm e 35 ppm onde se evidenciou o início da formação de carvão.

Em tratamento térmico de choupo (*Populus robusta*), Rousset e colaboradores (2004) observaram que já à 200°C ocorrem alterações físicas que interferem nas propriedades de transferência de massa na madeira. O tratamento diminuiu a difusão de massa (propriedade de migração de massa sob efeito de um gradiente de concentração) provavelmente em virtude de modificações na parede celular. Ainda verificou-se que não há alterações significativas na permeabilidade da madeira devido ao pequeno impacto de tal temperatura à estrutura porosa da madeira.

Bridgeman *et al.*, (2008) observaram os principais produtos gerados durante a torrefação de um capim nativo da Europa, o caniço-malhado (*Phalaris arundinacea*) até a temperatura final de 290°C. Para a determinação dos compostos foi utilizado um espectômetro FTIR. Os principais compostos observados foram o dióxido de carbono, o monóxido de carbono e o metano (gasosos) e formaldeído, acetaldeído, ácido acético, ácido fórmico, acetona e metanol (orgânicos condensáveis) além de traços de fenóis, furfural e amônia (figura 12).

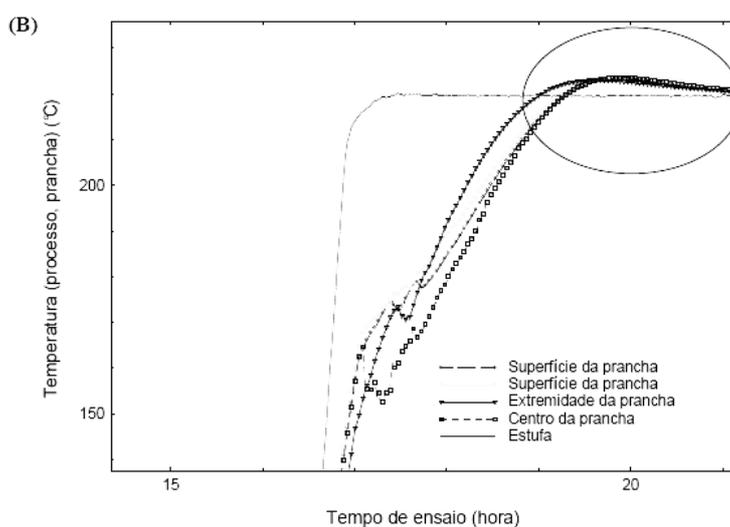


Figura 11: Temperatura em diversas partes da amostra sob tratamento térmico, o círculo indica reações exotérmicas no interior da prancha (Almeida, 2007).

Em análise termogravimétrica de diferentes biomassas Gómez e colaboradores (2007) identificaram a emissão de vários compostos voláteis, principalmente na faixa de 200°C a 400°C. Neste trabalho compararam-se os efeitos da pirólise de biomassa lenhosa (madeira) de resíduos de carpintaria e de biomassa herbácea de plantio energético. A pirólise de madeira produziu mais compostos orgânicos (aldeídos, ácidos, cetonas, etc.) que a biomassa herbácea devido a maiores concentrações de polissacarídeos.

Os estudos realizados sobre os efeitos do tratamento térmico nas propriedades físico-químicas da madeira observaram que durante o aquecimento, existe a degradação dos polissacarídeos mais hidrofílicos da madeira (hemiceluloses), reduzindo os radicais hidroxila, onde normalmente se fixariam moléculas de água (Hakkou *et al.*, 2006; Mburu *et al.* 2007). Menciona-se ainda o aumento relativo na proporção de lignina, aumentando o caráter hidrofóbico do material.

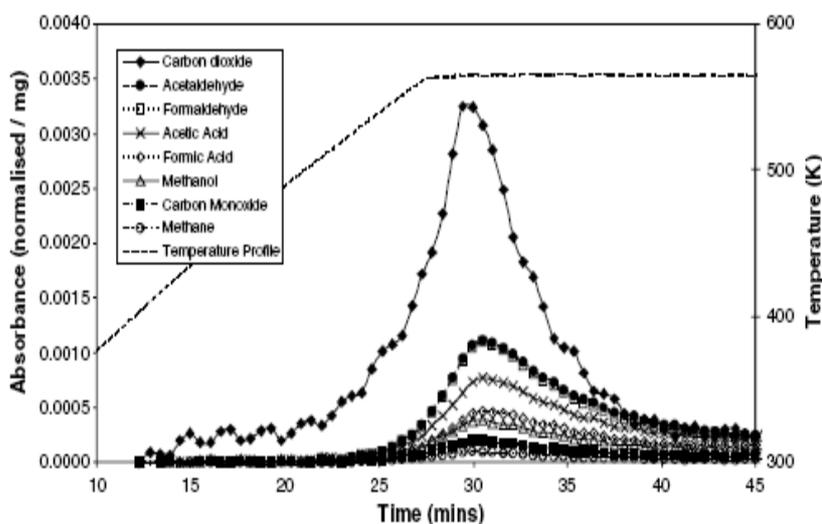


Figura 12: Evolução dos voláteis durante a torrefação do capim caniço-malhado até a temperatura final de 290°C. (modificado – Bridgeman *et al.*, 2008).

O caráter hidrofóbico da rede de lignina é forte aliado para sua resistência aos fungos degradadores de celulose e lignina. O tratamento térmico elimina os elementos nutritivos essenciais aos microorganismos, inibindo sua instalação e desenvolvimento (Duchez e Guyonnet 1998). Porém, Pessoa (2002) observou que a madeira tratada termicamente não

se mostrou resistente ao ataque de cupins, pois todas as madeiras termorretrificadas foram atacadas, inclusive a madeira testemunha, não havendo diferença significativa entre os tratamentos.

Mesmo com a reconhecida maior estabilidade da lignina frente ao aquecimento ela sofre alterações significativas a temperaturas relativamente baixas (Windeisen *et al.*, 2007). Windeisen verificou o início da decomposição da lignina através da constatação do aumento expressivo da porcentagem de grupos fenólicos OH, entre outros métodos.

Na torrefação a hemicelulose é parcialmente despolimerizada por hidrólise e provê a “hemicelulose reativa”. Este composto intermediário sofre reações e gera diversas outras substâncias que se recombina para formar “hemicelulose torrificada”. Portanto Lipinsky *et al* (2002) propõem que a hemicelulose não se degrada, mas se repolimeriza. Os ácidos e água liberados nas reações de repolimerização da hemicelulose também agem sobre a celulose e a lignina.

2.6.2. Características mecânicas da torrefação

A temperatura final e o tempo de reação interferem significativamente nas propriedades mecânicas da madeira. Mouras *et al.* (2002) afirmam que tratamentos térmicos a baixas temperaturas e tempos de reação curtos pouco alteram as propriedades mecânicas da madeira, porém, acima dos 220°C e 60 minutos de tratamento ocorre diminuição da resistência à flexão estática da ordem de 15 a 20%, se o tratamento for com vapor d’água a diminuição chega a 30%. Outra forma de tratamento, a associação de aquecimento com adição de ácido bórico (Kartal *et al.*, 2007) foi testada, porém não foi possível distinguir o efeito sinérgico dos dois fatores.

Yildiz *et al.* (2006) observaram uma queda expressiva na resistência à compressão da madeira de *Picea orientalis* quando sob ação de aquecimento a temperaturas superiores a 150°C. A diminuição da resistência à compressão está diretamente relacionada ao aumento do tempo e da temperatura do tratamento térmico, sendo que a temperatura é mais influente. Em tratamentos a 200°C a resistência à compressão foi menor nos ensaios de 6 a 10 horas com diminuição de 39,14% e 32,44% respectivamente.

Esta perda de resistência mecânica é devido à passagem de um comportamento visco-elástico a um comportamento quebradiço, friável. Para temperaturas finais de 230-240°C,

relata-se uma queda de 40% no módulo de ruptura (Almeida, 2007). A perda de resistência mecânica é frequentemente associada aos processos de aquecimento muito acelerados (em etapa única) e àqueles em que a temperatura máxima é próxima dos 250°C. São as perdas nas propriedades mecânicas da madeira que conduziram o CIRAD e ENGREF em colaboração com a Universidade de Tecnologia de Queensland a tentar compreender e modelizar os mecanismos que são a origem das modificações de propriedades da madeira durante o tratamento térmico da madeira (Rousset *et al.* 2006).

Em análise da torrefação de eucalipto Arias *et al.*(2008) observaram em fotografias microscópicas que enquanto a madeira natural, ao ser moída, gerava uma mistura de partículas e fibras entremeadas, as amostras torrificadas eram compostas somente de partículas, que ainda eram mais esféricas em função da torrefação. Essas partículas diminuem de tamanho com o aumento da temperatura e do tempo de residência da torrefação, fato que explicita o esperado aumento da friabilidade.

2.6.3. Balanço de massa e energia da torrefação

Em uma torrefação típica, 70% da massa permanecem como produto sólido com 90% da energia inicial e 30% são formados por gases que contêm apenas 10% do conteúdo energético da biomassa (Bergman, 2005). Esse significativo balanço energético pode ser visualizado no diagrama (figura 13) a seguir.

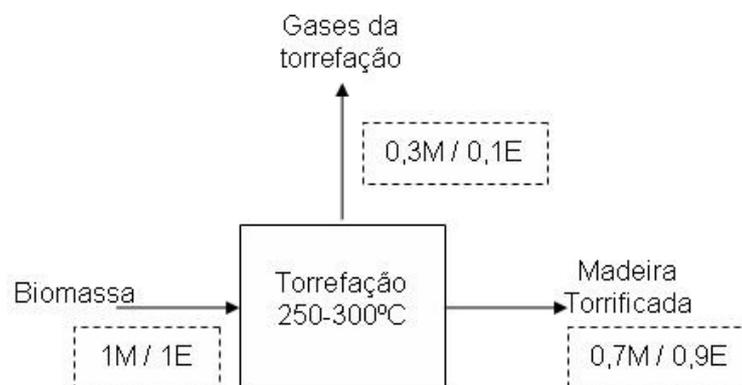


Figura 13: Balanço de massa e de energia da torrefação. M = unidade de massa; E = unidade de energia. (modificado – Bergman, 2005).

Doat (1985) observa que o processo de torrefação apresenta um rendimento gravimétrico médio de 75%, com 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 composição elementar. Com um poder calorífico de 5.200 a 6.000 kcal/kg (22.000 a 25.000 kJ/kg), a madeira torrificada situa-se entre a madeira anidra (4.600 kcal/kg) e o carvão (6.500 kcal/kg). A madeira torrificada retém 70% a 90% da massa inicial, diminui de 80% para 60-75% seu teor de matérias voláteis e de 10% para 0-3% seu teor de umidade (Prins *et al.*, 2006).

Prins e colaboradores (2006) determinaram a eficiência exergética da gaseificação de madeira *in natura* e da madeira torrificada. Para tal realizaram a torrefação de madeira de *Salix sp* de duas formas distintas: torrefação à 250°C por 30 minutos e torrefação à 300°C por 10 minutos. O volátil principal formado é o vapor, além da formação de produtos orgânicos como ácido acético, ácido fórmico, metanol e gasosos como dióxido de carbono (80%) e monóxido de carbono (20%). O balanço de massa e de energia evidencia o papel da temperatura final do processo, temperaturas mais altas causam a maior formação de voláteis e conseqüentemente maiores perdas de massa, ainda que o tempo de exposição seja menor (Figura 14).

Uslu (2005), em análise do processo da ECN desenvolvido por Bergman, realça que uma alta eficiência da torrefação baseia-se na operação autotérmica onde o gás da torrefação é queimado e utilizado na secagem da madeira. Nestas condições o processo atinge uma eficiência térmica de 96%.

2.6.4. Características e usos da madeira torrificada

As características da madeira torrificada variam principalmente em função da temperatura e do tempo de processamento (Felfli, 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. Apesar destas incertezas relacionadas ao tempo Prins (2005) verificou que para uma mesma temperatura, quanto maior for o tempo da torrefação, maior será a perda em massa do material torrificado.

O tipo de biomassa também influencia nos produtos torificados. Zanzi (2004) observou que amostras de madeira resultaram em produtos mais sólidos e com menor produção de alcatrão e água que os produtos da torrefação de resíduos agrícolas. Prins (2005) concluiu

que madeiras contendo xilanas e palha são mais reativas ao processo de torrefação que madeiras de coníferas.

A padronização das características da madeira torrificada faz dela um combustível altamente competitivo. Felfli (2000) destaca algumas aplicações para este produto: como um combustível de uso doméstico (lareiras, fogueiras, etc.) por possuir baixas emissões de fumaça durante a combustão, de uso industrial em caldeiras para a produção de vapor, uso como reductor em processos metalúrgicos devido ao seu alto teor de carbono fixo e uso em gaseificadores, pois sua padronização facilita a regulação e a otimização do processo de gaseificação.

Os ganhos tecnológicos da madeira torrificada também podem ser obtidos através da torrefação de resíduos florestais (produto de grande heterogeneidade). Este tratamento térmico poderá conduzir à padronização das características físico-químicas e mecânicas do material e, sobretudo, concentrando a energia disponível em um novo produto, com uma perda de massa limitada (rendimentos mássicos e energéticos entre 78-95% e 83-97%, respectivamente, variando em função da temperatura). O produto final é facilmente fragmentável devido às perdas de propriedade mecânica durante o tratamento térmico, apresentando um baixo teor de umidade final e facilmente controlado devido ao caráter hidrofóbico conferido pelo tratamento térmico. Esta diminuição da higroscopicidade dos resíduos termorretificados gerará grandes vantagens econômicas, sendo facilitados os processos de transporte e de estocagem.

Experimentos realizados com briquetes de biomassa demonstraram que o tratamento térmico melhora as características dos produtos (Felfli *et al.*, 1999). Os briquetes tratados termicamente foram analisados em termos de poder calorífico, análise imediata e elementar. Neste trabalho, a temperatura apresentou maior influência no processo que o tempo de residência. A temperaturas superiores a 250 °C observou-se que o poder calorífico apresentou um comportamento assintótico, porque a emissão de voláteis é mais intensa na faixa de 250 a 300 °C, provocando a saída dos voláteis de maior poder calorífico.

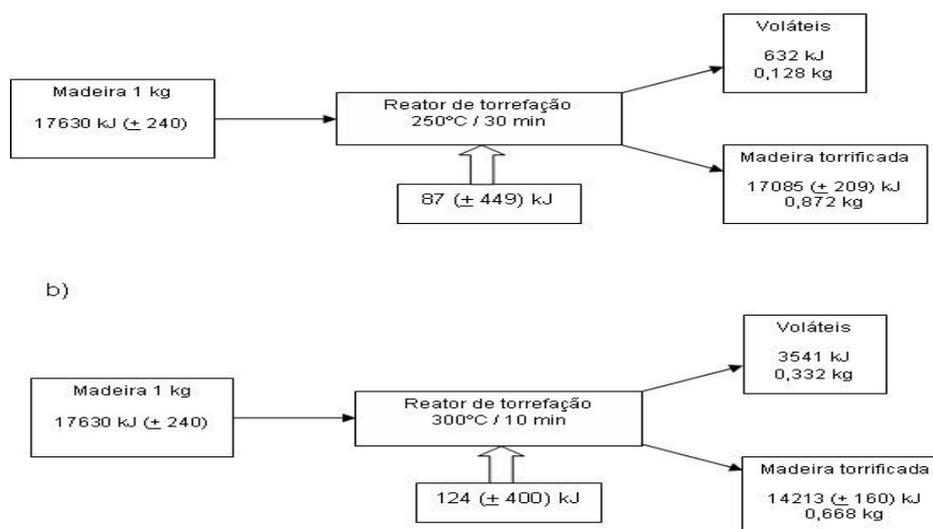


Figura 14: Balanço de massa e energético para a torrefação de *Salix sp* (seco) à temperatura e tempo de reação de (a) 250°C por 30 minutos e (b) 300°C por 10 minutos. (modificado – Prins *et al.*, 2006).

Um dos principais usos da madeira torrificada é como combustível para o processo de gaseificação. Prins *et al.*, (2006a) comparou a gaseificação de madeira torrificada com gaseificação convencional e observou que a madeira não torrificada atinge temperaturas relativamente baixas (700°C) no processo devido à alta razão O/C e ao alto teor de umidade. Como resultado a madeira é sobre-oxidada e causa perdas termodinâmicas que podem ser evitadas pelo uso de madeira torrificada.

A torrefação também pode servir como tratamento de madeira contaminada. Girods e colaboradores (2007) realizaram tratamento térmico de resíduos contendo uréia-formaldeído em duas etapas. Na primeira realizou-se a pirólise (torrefação) entre 250 e 300°C para a recuperação dos aditivos que foi seguida da gaseificação do resíduo descontaminado.

2.6.5. Tecnologias de torrefação da madeira

A torrefação é mais comumente conhecida como uma etapa da produção do café ou do vinho. Na área energética a torrefação iniciou-se já no século XX na França, em especial no final da década de 1930 e início da década de 1940, período da Segunda Guerra Mundial, quando foram propostos diferentes processos de obtenção de combustíveis torreficados, como alternativa aos derivados do petróleo (Luengo *et al.*, 2006).

Ao final da guerra a distribuição do petróleo na Europa se estabilizou e as tecnologias alternativas foram aos poucos abandonadas, até uma nova crise dos preços do combustível fóssil na década de 1970, que estimulou o avanço na pesquisa e desenvolvimento de fontes renováveis de energia. A torrefação destacou-se novamente na França, onde no início da década de 1980 foram implementados processos industriais.

As principais plantas industriais implantadas na França são basicamente de dois tipos: processo contínuo e processo por batelada. O processo contínuo foi desenvolvido por PECHINEY Eletrometalurgia, em que a transferência de calor se dá por condução pelo contato da biomassa com as superfícies aquecidas do reator (Girard & Shah, 1991). Neste processo a madeira é previamente seca e triturada a tamanhos não maiores que 10 mm. O gás da torrefação é recirculado para a caldeira de secagem (Figura 15). O forno é rotatório e produz 12.000 toneladas anuais.

O processo por batelada é caracterizado pela transferência de calor por convecção do gás de combustão através da carga de madeira. O sistema desenvolvido pela empresa PILLARD é constituído de dois fornos, um para a secagem e outro para a torrefação (Figura 16). Este sistema foi projetado para produzir 2.000 toneladas por ano. Muito semelhante ao sistema da PILLARD foi a planta desenvolvida pela empresa FAGES HABERMANN, processo descontínuo com transferência de calor por convecção, mas a secagem e a torrefação ocorrem no mesmo forno. A produção é de 500 toneladas anuais (Girard & Shah, 1991).

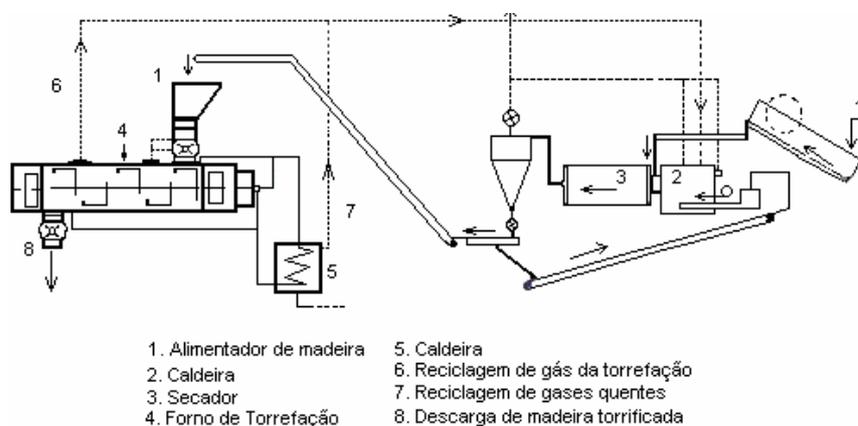


Figura 15: Planta de torrefação da PECHINEY Eletrometalurgia. (Luengo *et al.*, 2006; adaptado de Girard & Shah, 1991).

Arcate (2002) em colaboração com Stubbing (1998) através de sua empresa *Transnational Technology* desenvolveu um processo de torrefação a partir de um sistema de secagem com vapor superaquecido. O *Airless Drying* é um processo contínuo que permite torreficar peças maiores de madeira (Figura 17).

Em 2005, 20 toneladas de madeira torreficada em forma de *chips* pelo processo *Airless Drying* foram entregues a uma termelétrica na Holanda para testes de co-pulverização e co-combustão com carvão mineral. Weststeyn (2005), engenheiro responsável pela pesquisa, observou o comportamento da madeira torreficada nestas condições e atestou o sucesso da mistura.

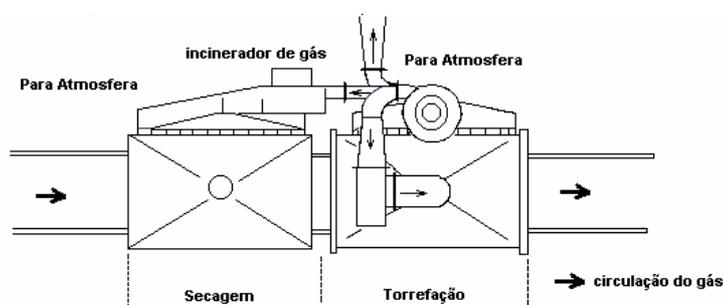


Figura 16: Planta de torrefação da PILLARD. (Luengo *et al.*, 2006; adaptado de Girard & Shah, 1991).

A etapa seguinte da torrefação é associá-la a outros processos que aumentam ainda mais a densidade energética do combustível. Para tal foi desenvolvido um processo de compactação após a torrefação da biomassa. Este processo chama-se TOP – *Combined Torrefaction and Pelletisation* – a combinação da pelletização, um processo de compactação no qual se obtêm pequenas unidades de biomassa densificada, com a torrefação.

Tal combinação agrega vantagens de ambos os processos, gerando um combustível com densidade energética de 14 a 18,5 GJ/m³ contra 7,8 a 10,5 GJ/m³ para biomassa não torreficada, além de permitir a pelletização de biomassas inviáveis (Bergman, 2005). A figura 18 ilustra o mecanismo de funcionamento do TOP.

Uslu *et al.* (2008) realizaram estudo comparativo entre as tecnologias TOP, a torrefação, a pelletização e a pirólise para bio-óleos e confirmaram as vantagens deste processo. A densidade energética do produto do processo TOP é 1,75 vezes maior que a dos pellets convencionais e três vezes maior que a biomassa torreficada.

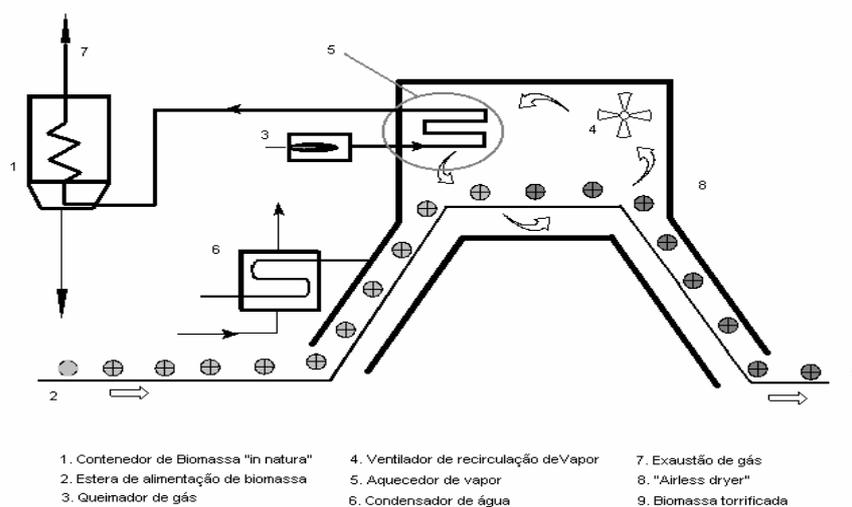


Figura 17: Planta de torrefação com vapor superaquecido. (Luengo *et al.*, 2006; adaptado de Arcate, 2000).

No Brasil, o Grupo de Combustíveis Alternativos (GCA) desenvolveu um reator de torrefação para toras de madeira ou briquetes. Um forno descontínuo em que o aquecimento da carga é feito por contato com gás de combustão da biomassa em uma câmara anexa ao forno. No forno principal ocorre a secagem e a torrefação da biomassa, e os gases da torrefação são recirculados para a câmara de combustão (Felfli *et al.*, 2000). O forno tem capacidade para torreficar 50 kg de madeira em ciclos de até 5 horas e é feito de alvenaria para diminuição dos custos.

Apesar do potencial de tais tecnologias não há uma que esteja implantada em escala industrial. Lipinsky (2002) relata que os europeus pioneiros da torrefação abandonaram o mercado de combustíveis e modificaram seus processos para atender ao mercado de móveis e construção. Portanto o grande desafio é viabilizar este mercado específico de combustíveis renováveis melhorados e uma alternativa é associar a torrefação a outros

processos já estabelecidos, como a gaseificação, a compactação (pellets e briquetes) e a co-combustão de forma a agregar valor conjuntamente, destacando o potencial da torrefação.

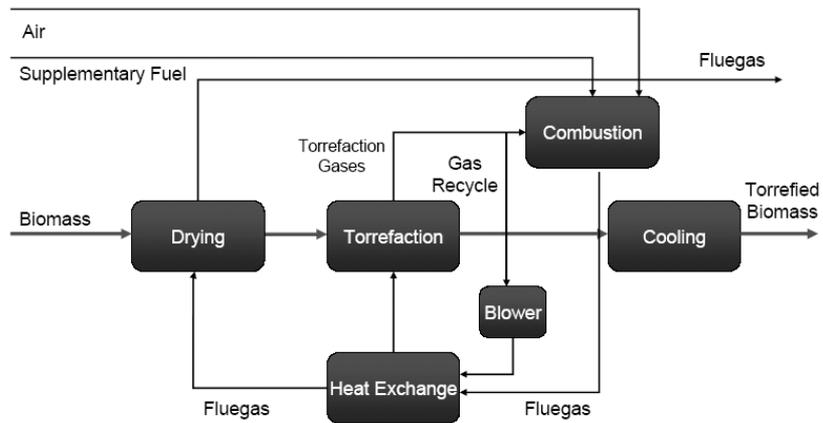


Figura 18: Esquema da torrefação que antecede a compactação (pelletização) – TOP. (BERGMAN, 2005).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O projeto constitui-se da torrefação de madeira de *Eucalyptus grandis* proveniente da estação experimental de Anhembi do Departamento de Ciências Florestais da ESALQ/USP, que se localiza no município de Piracicaba. As árvores deste plantio têm 31 anos de idade e após a torrefação tiveram suas características energéticas analisadas.

3.1. Secção da tora e corte das pranchas

No talhão da estação experimental foram abatidas três árvores que foram cortadas em toras de quatro metros. Estas foram divididas em dois toretes que, em seguida foram seccionados em pranchas de 50 milímetros de espessura por 2000 mm de comprimento. Estas ainda foram seccionadas em seis pranchas menores com 650 mm de comprimento. A figura 19 mostra a secção da tora e a configuração final das pranchas. Das seis pranchas menores foram escolhidas três de um mesmo lado. Destas três pranchas foram obtidos os 60 corpos-de-prova.

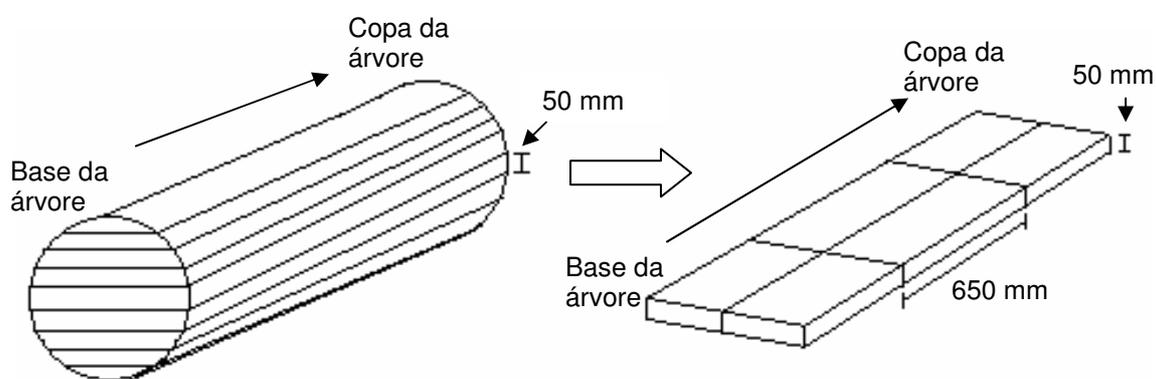


Figura 19: Secção da tora e corte final da prancha.

3.1.1. Confecção dos corpos-de-prova

As seções de cada prancha foram mais uma vez seccionadas para a confecção dos corpos-de-prova referentes às análises a que a madeira foi submetida. As pranchas com medidas mínimas de 5x15x60 cm tiveram suas superfícies eliminadas para evitar qualquer fonte de defeito mais evidente. Então foi obtida uma prancha com aproximadamente 4x12x58 cm;

os corpos-de-prova foram obtidos pelo corte desta em peças de 2x4x8 cm (Figura 20). Estas dimensões promovem uma transferência de calor mais homogênea nos corpos-de-prova, pois tal transferência é mais eficiente no sentido longitudinal que no radial e neste que no tangencial.

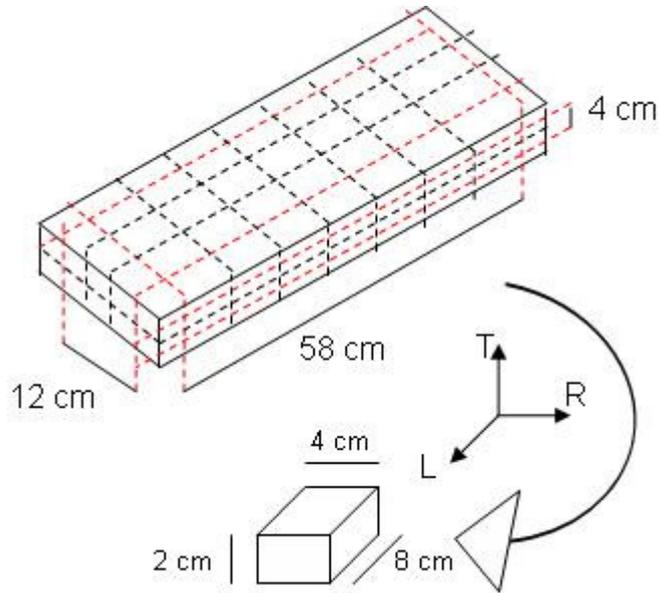


Figura 20: Confeção dos corpos-de-prova.

3.2. Ensaio de Torrefação

O sistema de torrefação é composto basicamente por um reator com regulação de temperatura, uma balança com 10^{-4} gramas de precisão, um analisador de oxigênio, um conversor entre computador e os outros componentes: um quadro de controle, uma fonte de nitrogênio e um computador para aquisição e processamento dos dados (Figura 21).

No reator é onde ocorre a torrefação propriamente dita. Trata-se de um forno elétrico com resistências e um ventilador com regulação de velocidade de rotação que permite o controle da temperatura. Há uma entrada circular na parte superior do reator, por onde passa um cabo que está conectado à balança. Na outra extremidade do cabo está a amostra a ser torrificada; desta forma pode-se acompanhar a perda de massa durante o tratamento térmico.

Um analisador de gás O₂ está conectado ao reator e ele analisa a quantidade de oxigênio presente dentro do forno e permite a injeção de nitrogênio para garantir uma atmosfera inerte ao processo. O quadro de controle encerra todas as conexões dos componentes supracitados e está ligado ao conversor. O conversor por sua vez é quem permite a comunicação entre o computador e as outras partes do sistema. No computador está instalado o software desenvolvido para a automação do processo, com o qual se configura um ensaio: determinando a taxa de aquecimento, o patamar final do processo, o teor máximo de oxigênio e o tempo de aquisição dos dados.

A cada ensaio são torreficados cinco corpos-de-prova; um está ligado à balança para acompanhamento da perda de massa, outro tem um termopar (termopar 1) encostado em sua superfície tangencial para acompanhamento da temperatura nesta região e outro tem um termopar (termopar 2) inserido também através da face tangencial até a metade da sua largura para acompanhamento do aumento da temperatura no interior da peça (Figura 22).

O experimento tem um fator determinante: temperatura final. Uma taxa de aquecimento (3°C/min) é comum a todos os ensaios. As pranchas foram secas ao ar e estão em equilíbrio com a umidade do ambiente. Os corpos-de-prova delas obtidos foram estocados na sala de climatização do laboratório de Engenharia da Madeira no Laboratório de Produtos Florestais (LPF) para garantir a estabilização do teor de umidade. Antes da torrefação os corpos-de-prova são secados em estufa com circulação e renovação de ar (MARCONI MA 035) à $103 \pm 2^\circ\text{C}$, por pelo menos 17 horas, o tempo entre a entrada na estufa e a saída no dia seguinte pela manhã para a torrefação. Dentro do reator são depositados os corpos-de-prova que passam por aquecimento constante até a temperatura final pré-estabelecida, permanecendo neste patamar por 60 minutos. Termopares acompanham a evolução da temperatura dentro do forno e nos corpos-de-prova.

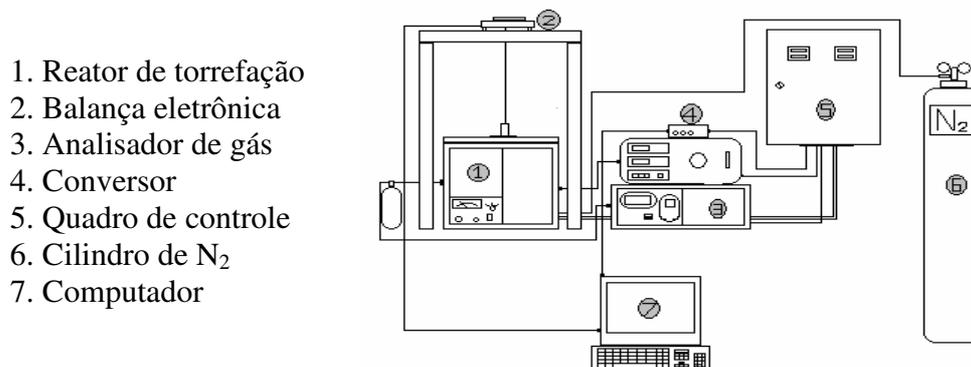


Figura 21 - Esquema do sistema de torrefação

Quando o termopar de regulação registra a temperatura de 180°C inicia-se a injeção de N₂ dentro do reator de torrefação e esta só é interrompida quando o analisador de O₂ detecta um teor máximo de 5% deste gás. Desta forma o sistema mantém a atmosfera inerte, com um teor de O₂ abaixo do necessário para que ocorra combustão e então comprometa o processo de torrefação. Ao final de cada ensaio a amostra resfria e é retirada do reator para análises.

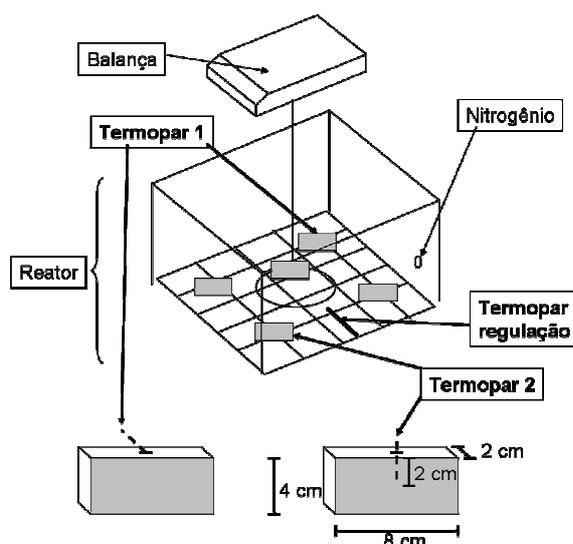


Figura 22 - Esquema da disposição dos termopares e dos corpos-de-prova dentro do reator.

A Tabela 5 resume a dinâmica dos tratamentos, com as temperaturas de cada, a taxa de oxigênio limite para garantir a atmosfera inerte, a taxa de aquecimento, o tempo mínimo de secagem para obter madeira anidra (teor de umidade de 0%) e o patamar de torrefação ou o tempo que as amostras permanecerão sob a temperatura final do tratamento.

Tabela 5: Quadro ilustrativo dos ensaios de torrefação.

Espécie	Tratamentos	Taxa de O ₂	Taxa de aquecimento	Secagem	Patamar de torrefação
	T1 – testemunha				
<i>Eucalyptus grandis</i>	T2 – 220°C	≤ 5%	3°C/minutos	~17 horas	60 minutos
	T3 – 250°C				
	T4 – 280°C				

3.3. Teor de Umidade

Os ensaios para determinação do teor de umidade (TU) baseiam-se na norma COPANT 460, que consiste na medição da massa úmida (Mu) e da posterior medição da massa seca (Ms) dos corpos-de-prova, secos em estufa a $103\pm 2^\circ\text{C}$. Neste ensaio foi utilizado balança de sensibilidade 0,0001 g. O teor de umidade é então obtido pela fórmula:

$$TU = \frac{Mu - Ms}{Ms} \times 100$$

3.4. Massa específica

A massa específica (Me), no caso a densidade aparente (DAP) da madeira, foi determinada de acordo com a norma COPANT 461, pela razão entre a massa e o volume da madeira de acordo com o seu teor de umidade. As amostras tiveram suas massas (M) medidas em balança de precisão de 0,0001 gramas e o volume foi determinado pela medição das dimensões das mesmas com o auxílio de um paquímetro com três medidas das dimensões radial e tangencial e duas da longitudinal. Então foram construídos corpos-de-prova com formato de um paralelepípedo homogêneo, livres de nós e fibras soltas. De posse das medidas de comprimento, largura e espessura gerou-se o volume (V) das peças. Então para calcular a densidade aparente:

$$Da = \frac{M}{V}$$

3.5. Análise química imediata

A caracterização energética da madeira demanda a quantidade de carbono presente e sua relação com outros compostos que interferem no potencial energético da biomassa. A porcentagem de carbono fixo depende então da porcentagem de matérias voláteis e cinzas, além da presença de água. Tais valores são determinados segundo a norma ABNT NBR 8112/86.

O teor de matérias voláteis é obtido a partir de 1 grama de madeira moída e peneirada (> 60 mesh), seca a 0%. A amostra é colocada em um cadinho de porcelana de massa conhecida com tampa, que por sua vez é colocado em uma mufla a 900°C por 10 minutos

na seguinte seqüência: 3 minutos na tampa da mufla e em seguida 7 minutos no interior da mufla, com a tampa fechada. Após este período, a amostra é retirada e colocada em um dessecador, para resfriamento. A precisão deste ensaio é de 2%. De posse da nova massa calcula-se o teor de material volátil pela fórmula:

$$MV = \frac{M_2 - M_3}{M} \cdot 100$$

MV: teor de material volátil;

M: massa da amostra;

*M*₂: massa cadinho + amostra;

*M*₃: massa do cadinho pós mufla à 900°C.

O teor de cinzas é determinado a partir de 1 grama de madeira nas mesmas condições do teor de matérias voláteis. A amostra é colocada em um cadinho com massa pré-determinada. Em seguida o cadinho é introduzido na mufla a 700°C, com a tampa fechada por aproximadamente 6 horas, até a queima completa. O cadinho é transferido para o dessecador para resfriamento, quando tem sua massa novamente determinada. A precisão deste ensaio é de 10%. O teor de cinzas é obtido pela fórmula:

$$CZ = \frac{M_1 - M_0}{M} \cdot 100$$

Cz: teor de cinzas;

M: massa da amostra;

*M*₀: massa do cadinho;

*M*₁: massa do cadinho + resíduo.

Os valores dos teores de matérias voláteis (*Mv*) e cinzas (*Cz*) permitem o cálculo do carbono fixo (*CF*) a partir da fórmula:

$$CF = 100 - (Cz + Mv)$$

3.6. Poder Calorífico

O poder calorífico superior (PCS) foi determinado com 1 grama de amostra moída e seca a 0%. A fração da amostra com granulometria abaixo de 60 MESH é a utilizada para esta

análise. Esta é realizada com uma bomba calorimétrica modelo PARR 1261 com base na norma ABNT NBR 8633/84. O poder calorífico é medido pela energia térmica gerada pela combustão da amostra dentro de uma câmara sob pressão constante. Nesta câmara é injetado oxigênio de forma a garantir a combustão completa das amostras. A partir da inserção da massa da amostra, o sistema realiza a combustão e calcula o poder calorífico em joules por grama ou Megajoules por quilograma (MJ/kg).

3.7. Compressão paralela às fibras

O ensaio de compressão paralela às fibras foi realizado em uma máquina INSTRON para ensaios mecânicos, instalada no setor de engenharia da madeira do Laboratório de Produtos Florestais – LPF. Tal ensaio forneceu informações sobre a resistência da madeira de *Eucalyptus grandis* frente aos três tratamentos térmicos distintos.

O ensaio consiste na aplicação contínua de carga em corpos-de-prova de seção quadrada até o rompimento dos mesmos. Desta forma estima-se a carga e o módulo de ruptura (MOR).

Como se trata da comparação entre tratamentos térmicos e não da caracterização de espécies os ensaios não seguiram a norma integralmente. Contudo os ensaios respeitaram a relação da altura do corpo-de-prova quatro vezes maior que sua largura além da forma de realização dos ensaios, como contemplado na norma ASTM D143/2000. A velocidade de aplicação da carga foi de 0,24 mm/min, 0,003 vezes o comprimento do corpo-de-prova (80 mm), conforme exigido pela norma.

Os resultados destes ensaios permitiram avaliar de forma indireta a friabilidade da madeira sob diferentes temperaturas, e assim, verificar se a torrefação aumenta significativamente tal propriedade.

3.10. Densidade Energética e Rendimento Energético

A densidade energética é uma medida do potencial que dado volume de biomassa tem de gerar energia. Este conceito relaciona a densidade aparente com o poder calorífico do combustível e assim provê a quantidade de energia em calorias ou joules que há em um (1) metro cúbico deste (MJ/m³).

O rendimento energético relaciona o rendimento em massa e o poder calorífico superior da madeira. Para tanto, se utiliza da fórmula proposta por Bergman *et al.* (2004):

$$\eta_e = \eta_m \left(\frac{PCS_{torr}}{PCS_{nat}} \right)$$

η_e : rendimento energético;

η_m : rendimento em massa (gravimétrico);

PCS_{torr} : poder calorífico superior da madeira torrificada;

PCS_{nat} : poder calorífico superior da madeira natural.

3.11. Rendimento Gravimétrico

O rendimento gravimétrico é a razão entre a massa de madeira torrificada e a massa de madeira antes da torrefação, seca a 0%.

$$\eta_m = \left(\frac{M_{torr}}{M_{nat}} \right)$$

3.12. Análise estatística

O delineamento estatístico adotado para a análise da madeira torrificada é: Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC). Os 60 corpos-de-prova passaram por três tratamentos distintos: T2 – aquecimento à 220°C; T3 – aquecimento à 250°C; T4 – aquecimento à 280°C; sendo T1 a testemunha (secagem a 0%).

A casualização foi feita mediante o sorteio de 15 corpos-de-prova por tratamento. A estatística descritiva foi realizada pelo cálculo de média, desvio padrão e coeficiente de variação, sendo que para este último foi adotado até 30% como aceitável segundo Pimentel (1987). A análise de variância foi realizada para cada um dos parâmetros analisados (densidade aparente, módulo de ruptura, densidade energética, etc.); no caso de diferença significativa (5%) entre os tratamentos foi feita nova análise através do teste de médias (Tukey) para identificação de tais diferenças. Por fim foram realizadas algumas regressões

lineares para verificar a possibilidade de predição de uma variável a partir dos valores de outra.

Tabela 6: Modelo de análise de variância dos dados gerados.

Fonte de variação	Graus de liberdade
Tratamentos	3
Erro	56
Total	59

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos através das diversas análises realizadas com as amostras torrificadas permitem avaliar os efeitos da torrefação sobre determinadas propriedades da biomassa, no caso madeira de *Eucalyptus grandis*, e também avaliar a eficiência e a eficácia do sistema de torrefação. A seguir são apresentados os resultados de acordo com a seqüência de realização das análises.

4.1. Teor de umidade

O teor de umidade (TU) dos corpos-de-prova foram determinados após estes estarem acondicionados em sala de climatização, com temperatura e teor de umidade controlados, por mais de 8 meses. Uma primeira verificação foi feita com secagem por quatro dias. Nesta avaliação ficou claro que menos de 12 horas depois de colocados na estufa, os corpos-de-prova já estabilizavam sua massa.

Portanto, dois meses depois uma nova verificação foi realizada, desta vez com secagem por 17 horas e observou-se que não houve diferença entre as duas verificações, fato que corrobora para uma secagem mais rápida.

Os baixos valores de desvio padrão e de coeficiente de variação indicam que o tempo na sala de climatização foi suficiente para o equilíbrio do teor de umidade dos corpos-de-prova e que o processo de secagem foi homogêneo para todos (tabela 7).

Tabela 7: Teor de umidade dos corpos-de-prova de *Eucalyptus grandis*.

Corpos-de-prova	TU médio (%)	Desvio padrão	Coeficiente de variação (%)	Amplitude
60	15,01	0,72	4,79	3,74

4.2. Rendimento gravimétrico

A Tabela 8 apresenta os resultados de rendimento gravimétrico, a relação entre a massa seca de madeira e a massa de madeira torrificada. Esta variável indica o quanto de massa de madeira se perdeu após o processo de torrefação. Os baixos valores de coeficiente de variação demonstram a homogeneidade em todos os tratamentos térmicos e demonstram a eficiência do sistema de torrefação.

Tabela 8: Rendimento gravimétrico das três torrefações.

Tratamento	Rendimento gravimétrico (%)	Desvio padrão	Coefficiente de variação (%)
T2 – 220°C	96,39	0,64	0,66
T3 – 250°C	88,27	0,80	0,91
T4 – 280°C	80,15	1,22	1,53

Bridgeman *et al.* (2008) encontraram rendimentos semelhantes para torrefação de um capim europeu (*reed canary grass*), tratado a 230°C, 250°C, 270°C e 290°C, com rendimentos de 93%, 86%, 77% e 68% respectivamente. Bergman e Kiel (2005) relatam valores típicos de 80% para rendimento em massa. Felfli *et al.* (2005) encontraram rendimento de 94%, 72% e 54% a 220°C, 250°C e 270°C para briquetes de madeira tratados por uma hora.

Durante os tratamentos foram observados comportamentos distintos em relação às temperaturas finais. No tratamento 2, os termopares que mediam as temperaturas na superfície (termopar 1) e dentro (termopar 2) dos corpos-de-prova registraram valores abaixo do patamar de 220°C (termopar reg.), de no máximo 214,7°C na superfície e 215,4°C no interior. Este comportamento térmico, assim como a perda de massa pode ser observado na Figura 23.

Nos tratamentos 3 e 4 os termopares inseridos nos corpos-de-prova apontaram valores acima dos respectivos patamares, com picos de 253,4°C e 286,5°C, e assim permaneceram por poucos minutos até estabilizarem abaixo dos patamares até o fim dos tratamentos.

Estes picos nos tratamentos 3 e 4 expressam reações exotérmicas que ocorrem dentro da madeira sob aquecimento. Tais reações também foram observadas em torrefações realizadas por Almeida (2007) e Inari *et al.* (2007). Rousset *et al.* (2004) destacam o papel da espessura das amostras na ocorrência das reações exotérmicas, pois, quanto mais espessa, maior será a dificuldade de saída dos gases, o que aumenta a pressão e consequentemente a temperatura. Os picos e a perda de massa destes tratamentos constam das figuras 24 e 25.

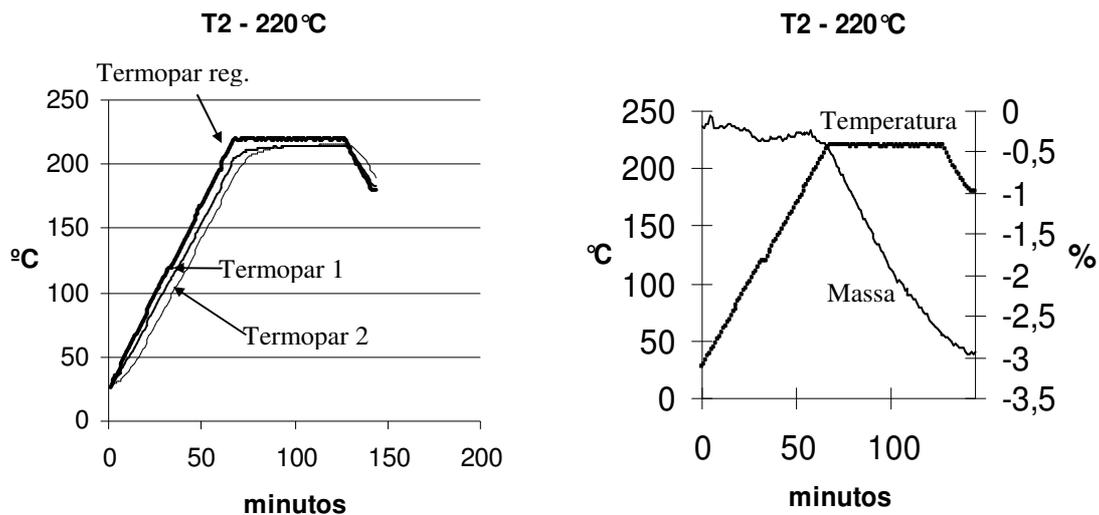


Figura 23: Gráficos das temperaturas e da perda de massa x temperatura, 220°C, *Eucalyptus grandis*.

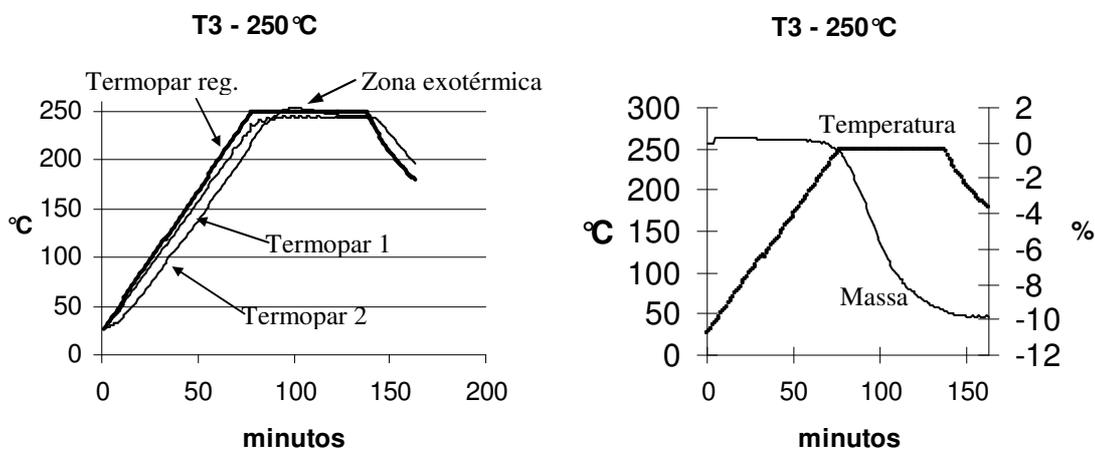


Figura 24: Gráficos das temperaturas e da perda de massa x temperatura, 250°C, *Eucalyptus grandis*.

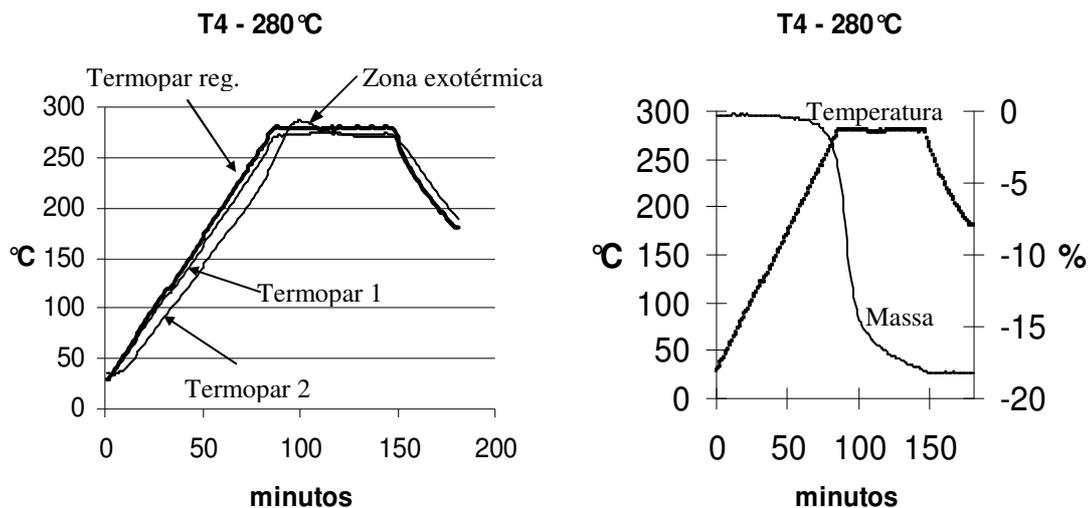


Figura 25: Gráficos das temperaturas e da perda de massa x temperatura, 280°C, *Eucalyptus grandis*.

É importante observar que o patamar de uma hora não foi suficiente para estabilizar a perda de massa em nenhum dos tratamentos. Rousset (2004) observou que, mesmo após dez horas de tratamento, não há estabilização da perda de massa.

4.3. Densidade aparente

De posse das massas e dos volumes determinou-se a densidade aparente dos corpos-de-prova torrefeitos. Embora alguns corpos-de-prova tenham se alterado devido aos tratamentos a medição da densidade aparente não foi comprometida conforme pode ser observado nos valores de desvio padrão e coeficiente de variação (tabela 9) que explicitam a homogeneidade.

Tabela 9: Densidade aparente da madeira de *Eucalyptus grandis* sob três tratamentos.

Tratamento	Densidade aparente (g/cm ³)	Perda porcentual (%)	Desvio padrão	Coefficiente de variação (%)
Testemunha	0,85	—	0,02	2,29
T2 – 220°C	0,83	2,35	0,02	3,01
T3 – 250°C	0,79	7,06	0,02	3,11
T4 – 280°C	0,73	14,12	0,02	2,60

A perda porcentual é sempre relativa ao tratamento 1, tido como testemunha. A queda da densidade está fortemente ligada a perda de massa, principalmente hemiceluloses, e sofre pouca influência das alterações volumétricas, que são pequenas.

4.4. Compressão paralela às fibras.

Neste ensaio buscou-se avaliar a perda de resistência mecânica da madeira de *Eucalyptus grandis* frente às distintas temperaturas dos tratamentos aos quais ela foi submetida. Assim almeja-se de forma indireta analisar o aumento da friabilidade da madeira em função do aumento da temperatura de tratamento.

Os resultados mostram um decréscimo do módulo de ruptura (MOR) da madeira em função do aumento da temperatura de tratamento (tabela 10). Há uma pequena redução entre a madeira não tratada e o tratamento à 220°C e passa à uma grande diferença quando tratada à 280°C.

Tabela 10: Compressão paralela às fibras da madeira de *Eucalyptus grandis* sob três tratamentos.

Tratamento	Carga máxima média (kgf)	MOR (kgf/cm ²)	Perda porcentual (%)	Desvio padrão	Coefficiente de variação (%)
Testemunha	6332,25	782,98	—	155,55	19,87
T2 – 220°C	5033,88	664,01	15,19	87,99	13,72
T3 – 250°C	3420,15	466,07	40,47	104,76	22,48
T4 – 280°C	2067,93	291,36	62,79	75,59	25,94

A queda relativa no MOR denota a diminuição de resistência mecânica em função do aumento da temperatura de tratamento. Estes valores são compatíveis com os relatados por Mouras *et al.* (2002) com perdas de 15 a 20% para tratamentos a partir de 220°C e 60 minutos e por Almeida (2007) com queda de 40% no MOR para tratamentos entre 230°C e 240°C.

A expressiva diminuição do MOR reflete o aumento da friabilidade da madeira frente à torrefação. O fato de a madeira tornar-se mais friável quando submetida a tratamento térmico indica que ela fica mais quebradiça, com menor presença de fibras entre as partículas torrificadas, conforme observado por Arias *et al.* (2008).

Importante notar que alguns corpos-de-prova tiveram comportamentos discrepantes, como casos em que amostras tratadas a 250°C apresentaram carga de ruptura maior que amostras tratadas a 220°C. Outros demoraram mais tempo para atingir a carga de ruptura. Estes acontecimentos podem ser explicados por variáveis incontroláveis como defeitos (nós) no interior das peças ou mesmo deformações causadas pelo aquecimento. Contudo isto não acarretou em prejuízos para a análise conforme apontam os valores de coeficiente de variação (abaixo de 30%).

A figura 26 ilustra o comportamento dos corpos-de-prova de cada tratamento durante a aplicação de carga até o momento de ruptura.

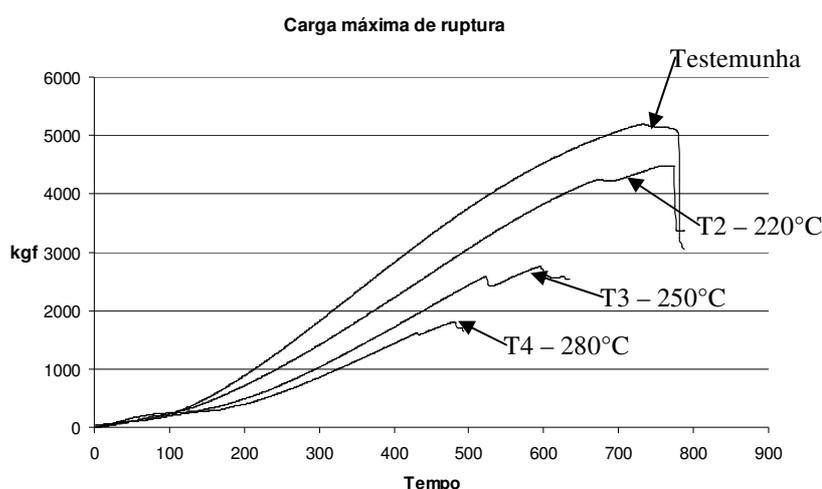


Figura 26: Gráfico do ensaio de compressão paralela às fibras da madeira de *Eucalyptus grandis* sob três tratamentos.

4.5. Análise Química Imediata

Esta análise compreendeu a determinação do teor de Matérias Voláteis (MV), o teor de Cinzas (Cz) e, conseqüentemente, o teor de Carbono Fixo (CF) da madeira natural e torrificada. Estes teores estão expressos na tabela 11.

Tabela 11: Teor de Matérias Voláteis (MV), Cinzas (Cz) e Carbono Fixo (CF) da madeira de *Eucalyptus grandis* sob três tratamentos.

Tratamento	MV (%)	Cz (%)	CF (%)	Diferença Percentual (%)		Desvio padrão			Coeficiente de variação (%)		
				CF	MV	MV	Cz	CF	MV	Cz	CF
Testemunha	80,15	0,29	19,56	-		0,91	0,15	0,95	1,13	52,81	4,87
T2 – 220°C	79,32	0,15	20,53	4,96	1,04	0,81	0,06	0,85	1,02	40,96	4,16
T3 – 250°C	75,19	0,16	24,65	26,02	6,19	0,44	0,07	0,47	0,59	45,31	1,91
T4 – 280°C	69,77	0,17	30,06	53,68	12,95	0,78	0,06	0,82	1,12	35,31	2,72

Os resultados apontam para uma queda expressiva das matérias voláteis e conseqüente aumento do carbono fixo aliados ao aumento da temperatura de tratamento. Como era esperado o teor de cinzas foi muito baixo para todos os tratamentos. Contudo houve uma diferença marcante entre o teor da testemunha e dos outros tratamentos que pode ser atribuída a alguma contaminação prévia da madeira, que foi eliminada na torrefação e persistiu na madeira natural. Mesmo assim tal diferença não se apresenta como interferência na análise, pois o baixo teor de cinzas de todas as amostras pouco colabora para a composição química da madeira. A figura 27 ilustra os resultados apresentados na tabela 11.

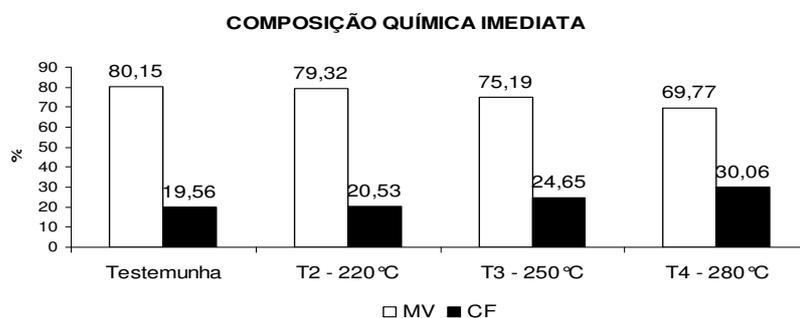


Figura 27: Teores de Matérias Voláteis e Carbono Fixo na madeira de *Eucalyptus grandis* sob três tratamentos térmicos.

Os tratamentos mais severos (T3 e T4) refletem teores de MV concordantes com os encontrados por Prins *et al.* (2006), que apontam para uma diminuição de 80% para 60 a 75%. Felfli *et al.* (2005), em uma hora de torrefação de briquetes de madeira, encontraram teores de MV e CF de 74,6% e 19,0% a 220°C, 65,0% e 27% a 250°C e 52,1% e 38,2% a 270°C, respectivamente. Bridgeman *et al.*(2008) encontraram valores de MV e CF para madeira de *Salix sp* de 79,8% e 18,4% tratada a 250°C, 79,3% e 18,6% a 270°C e 77,2% e 20,5% a 290°C. Arias *et al.* (2008) encontraram para madeira de *Eucalyptus sp.* tratada a 280°C por uma hora, teores de MV e CF de 61,5% e 34,8%.

4.6. Poder Calorífico Superior

A análise do Poder Calorífico Superior (PCS) buscou avaliar o poder calorífico em condições ideais de uso, ou seja, sem a presença de água. Os resultados destas análises constam da tabela 12.

Tabela 12: Poder Calorífico Superior da madeira de *Eucalyptus grandis* sob três tratamentos.

Tratamento	PCS (MJ/Kg)	Aumento porcentual (%)	Desvio padrão	Coefficiente de variação (%)
Testemunha	19,57	-	0,16	0,82
T2 – 220°C	20,34	3,93	0,07	0,32
T3 – 250°C	21,44	9,56	0,18	0,84
T4 – 280°C	22,65	15,74	0,10	0,43

Embora tenha ocorrido um representativo aumento do teor de carbono fixo o mesmo não ocorreu com o poder calorífico superior, conforme apresentado na figura 28. Embora não afirme as temperaturas de tratamento, Doat (1985) relata PCS de 22 a 25 MJ/kg para madeira torrificada. Arias *et al.*(2008) verificaram PCS de 22,8 MJ/kg a 260°C a 25,0 MJ/kg a 280°C para *Eucalyptus sp.*, ambos tratados também por 60 minutos. Felfli *et al.* (2005) encontraram valores de 20,99 MJ/kg a 220°C e 22,06 MJ/kg a 250°C para briquetes de madeira tratados por uma hora.

Posto que já foram verificados tratamentos nas mesmas condições que produziram madeira torreficada com maior PCS, infere-se que não são as condições da torrefação os responsáveis pelo baixo PCS. Tão pouco o calorímetro utilizado, visto que o PCS da madeira não tratada é compatível com o encontrado na literatura (Arias *et al.*, 2008; Felfli *et al.*, 2005). Assim atribui-se tais valores de PCS a variáveis não analisadas como o teor de lignina e a idade por exemplo.

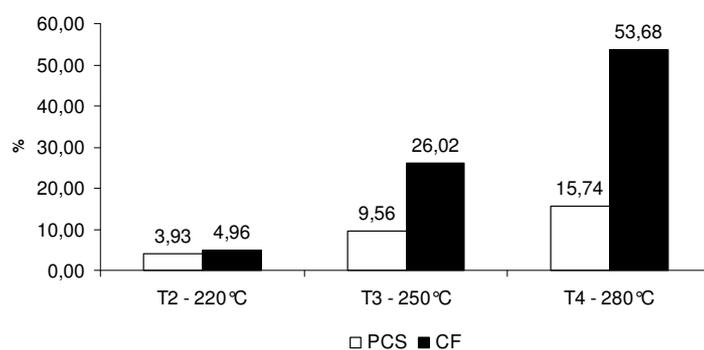


Figura 28: Ganhos percentuais em Poder Calorífico Superior e Carbono Fixo da madeira de *Eucalyptus grandis* sob três tratamentos.

4.7. Densidade Energética e Rendimento Energético

A relação entre a densidade aparente e o poder calorífico superior da madeira torreficada provê a densidade energética da mesma. A tabela 13 apresenta esta relação.

Tabela 13 – Densidade energética e rendimento energético da madeira de *Eucalyptus grandis* sob três tratamentos.

Tratamento	D _{En} (GJ/m ³)	Aumento percentual (%)	Desvio padrão	Coefficiente de variação (%)	η _{En} (%)
Testemunha	16,60	-	321,83	1,94	-
T2 – 220°C	16,92	1,91	502,10	2,97	100,19
T3 – 250°C	16,96	2,19	549,27	3,24	96,68
T4 – 280°C	16,63	0,19	389,94	2,34	92,76

O baixo aumento da densidade em função do tratamento (figura 29) é bastante influenciado pela diminuição da densidade aparente. Normalmente há uma compensação pelo aumento do PCS, no entanto, esta propriedade não cresceu conforme esperado e provocou este aumento inexpressivo. Caso o PCS estivesse compatível com os resultados apresentados na literatura (Doat, 1985; Arias *et al.*, 2008), com 25 MJ/kg a 280°C, poderia haver um ganho de até 10% na densidade energética. Contudo deve-se ressaltar que a análise não reflete as condições reais de uso energético da madeira, normalmente esta se encontra com teor de umidade acima dos 15%, o que faz com que seu poder calorífico seja ainda menor e resulte em uma densidade energética muito abaixo das observadas neste estudo.

O rendimento energético apresentou-se conforme o esperado, com 92,76% do conteúdo energético retido na madeira torrificada a 280°C, de acordo com o proposto por Bergman *et al.* (2004) e Prins *et al.* (2006) de em média 90%. Bridgeman *et al.* (2008) verificaram rendimento energético de 92,7% para madeira de *Salix sp.* tratada a 250°C por 30 minutos.

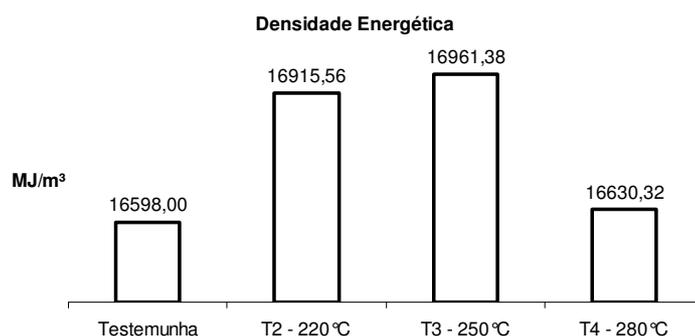


Figura 29 – Densidade energética da madeira de *Eucalyptus grandis* sob três tratamentos térmicos.

4.8. Estatística Analítica

4.8.1. Análise de Variância

De posse dos resultados das análises anteriormente apresentadas, realizou-se a análise de variância (ANOVA) dos dados para verificação de diferenças significativas. As análises

que apresentaram tais diferenças passaram por um teste de médias (Tukey) que identificou os responsáveis. A tabela 14 apresenta as ANOVAS de todos os parâmetros analisados.

Tabela 14 – ANOVAS de todos os parâmetros analisados na madeira de *Eucalyptus grandis* sob três tratamentos.

		F						
F.V.	G.L.	DAP	MOR	MV	Cz	CF	PCS	DEn
Tratamentos	3							2,64
Resíduos	56	79,48*	57,43*	590,74*	6,89*	542,21*	1503,22*	n.s.**
Total	59							

*significativo a 5%;

**não significativo.

Todos os parâmetros analisados apresentaram diferença significativa, com exceção da densidade energética. Este fato explicita os efeitos da torrefação sobre a madeira, na maioria dos casos efeitos positivos para fins energéticos.

4.8.2. Teste de Tukey

Para identificar as diferenças entre os tratamentos foi realizado o teste de Tukey. Esta análise permitiu identificar os efeitos de cada tratamento sobre os parâmetros que apresentaram diferença significativa na análise de variância. A tabela 15 apresenta os resultados deste teste.

Tabela 15: Teste de Tukey para verificação de diferenças entre médias dos parâmetros analisados na madeira de *Eucalyptus grandis* sob três tratamentos.

Médias*						
Tratamentos	DAP (g/cm ³)	MOR (kg/cm ²)	MV (%)	Cz (%)	CF (%)	PCS (MJ/kg)
Testemunha	0,85 a	782,98 a	80,15 a	0,29 a	19,56 a	19,57 a
T2	0,83 a	664,01 b	79,32 b	0,15 b	20,56 b	20,34 b
T3	0,79 b	466,07 c	75,19 c	0,16 b	24,65 c	21,44 c
T4	0,73 c	291,36 d	69,77 d	0,17 b	30,06 d	22,65 d

*médias seguidas da mesma letra são iguais estatisticamente, a 5% de probabilidade.

A partir destes resultados pode-se observar que o T2 não gerou diferença significativa com a testemunha, para a densidade aparente. Então 220°C não é suficiente para causar mudanças importantes neste parâmetro. Contudo, para os outros parâmetros, tal temperatura causa alterações significativas, mesmo que as diferenças relativas à testemunha sejam aparentemente pequenas, como é o caso de MV (1,04%), CF (4,96%) e PCS (3,93%).

O parâmetro Cz só apresentou diferença significativa entre a testemunha e os outros tratamentos. Este fato certamente não foi causado pela torrefação, pois o teor de cinzas não é afetado pela temperatura, ele é intrínseco à biomassa. Uma explicação para tal diferença seria uma possível contaminação superficial das amostras na secagem, pois esta é feita em estufa com circulação de ar e normalmente há outros materiais dentro. O reator de torrefação pode ter eliminado esta contaminação com a injeção forçada de N₂.

Para os outros parâmetros analisados houve diferença significativa entre todos os tratamentos aplicados. Assim cada temperatura empregada tem influência distinta nas propriedades da madeira.

4.8.3. Regressão Linear

Algumas propriedades têm uma forte relação que permite a predição de uma a partir dos valores de outra. Portanto a análise de regressão linear gera um coeficiente (R^2) que mede o quanto estas predições são significativas. Os valores deste coeficiente demonstram uma relação crescente a medida que se aproximam de 1. Os gráficos a seguir expressam essa relação.

A figura 30 demonstra uma forte relação que permite predizer os valores de CF a partir dos valores de PCS. Importante observar que os dados encontram-se agrupados em quatro pontos distintos, que são os tratamentos. Os dados referentes à testemunha e ao tratamento 2 estão bem próximos uns dos outros e mais dispersos, ao contrário dos dados referentes aos tratamentos 3 e 4, que estão em grupos separados e mais coesos. Esta situação reflete o efeito de padronização que a temperatura causa nas propriedades energéticas da madeira.

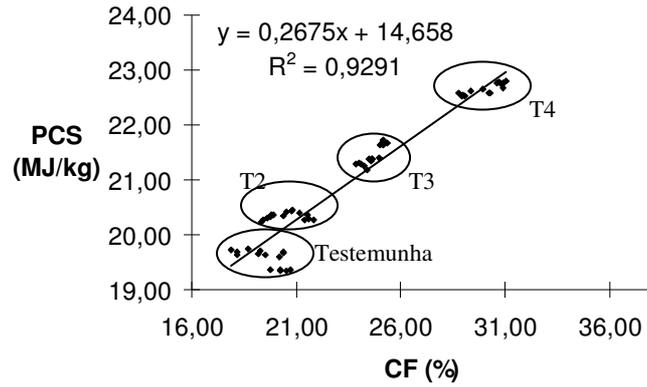


Figura 30: Regressão Linear – PCS em função do CF.

A mesma situação é observada na relação entre o PCS e o MV, mas em sentido oposto (figura 31). Há uma mudança da dispersão para a coesão dos dados em função do aumento da temperatura. No caso, quanto menor for o teor de matérias voláteis maior será o valor do poder calorífico superior e mais homogêneo será o conjunto de dados.

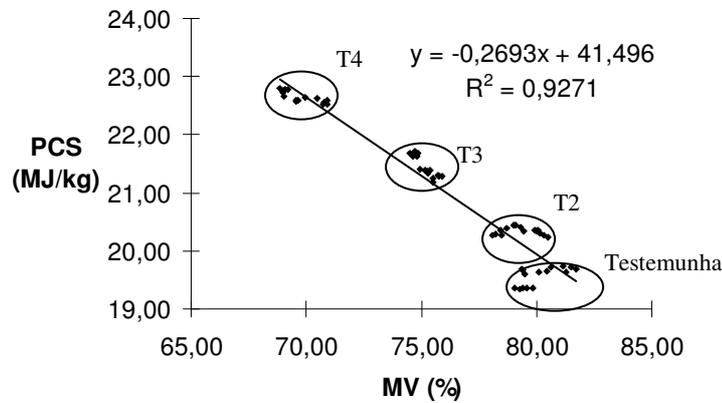


Figura 31: Regressão Linear - PCS em função de MV.

A tentativa de prever os valores do MOR em função dos valores do DAp não foi bem sucedida (figura 32). Os dados estão dispersos de tal forma no gráfico que não é possível definir os limites de cada tratamento. Assim, para esta pesquisa, a queda da resistência mecânica, expressa pela diminuição do módulo de ruptura, não pode ser estimada pela diminuição da densidade aparente da madeira torrificada.

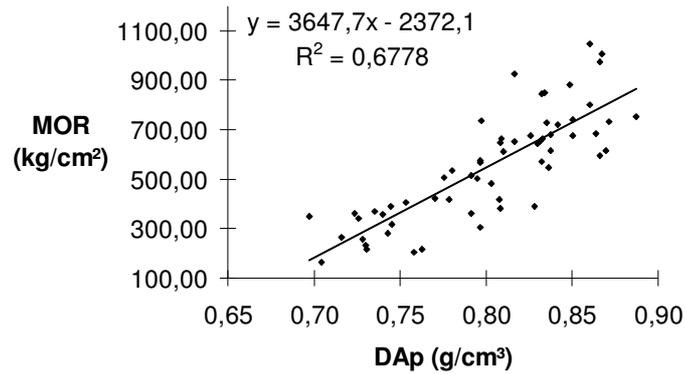


Figura 32: Regressão Linear - MOR em função de DAp.

A figura 33 demonstra que a 220°C (T2) não é possível prever o DAp em função do MV, pois os dados estão dispersos juntos aos dados da testemunha, secagem a 103°C. Mas, conforme a temperatura aumenta, há uma tendência de homogeneização, os dados ficam mais concentrados. Mais uma vez há evidências de uma padronização das propriedades energéticas relativas ao aumento da temperatura. Portanto, em temperaturas mais altas, há uma relação entre a diminuição da densidade aparente e a diminuição do teor de matérias voláteis, pois a diminuição do MV significa a perda de massa, o que causa impacto direto na densidade aparente da madeira torrificada.

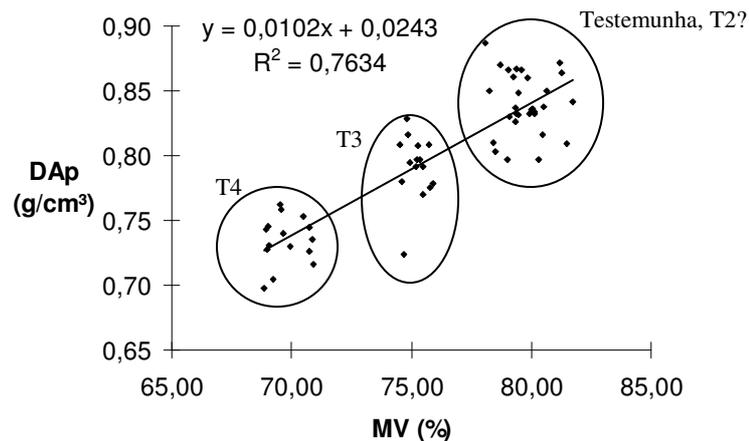


Figura 33: Regressão Linear - DAp em função do MV.

O MOR apresentou uma melhor relação com o MV (figura 34), mas também não é possível distinguir os dados da testemunha dos de T2, como na regressão de DAp e MV.

Há novamente uma concentração dos dados concomitante ao aumento da temperatura. A perda de massa tem boa relação com a diminuição da resistência mecânica, exposta pela diminuição do MOR.

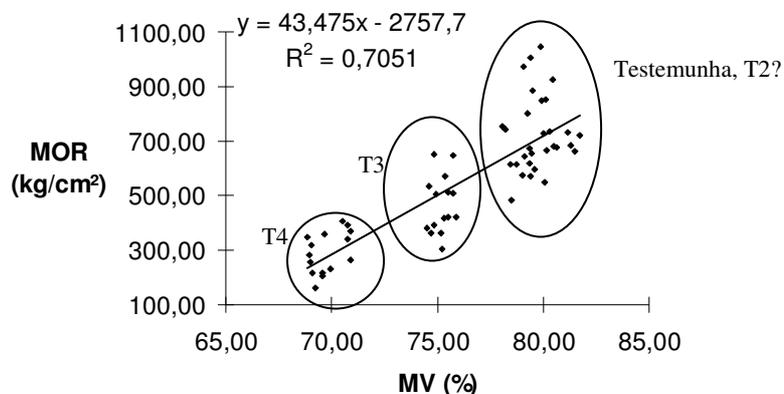


Figura 34: Regressão Linear - MOR em função do MV.

As análises de regressão permitiram observar uma tendência à homogeneização em função do aumento da temperatura. Isto significa dizer que conforme a temperatura de tratamento aumenta, há uma diminuição do erro e os dados observados ficam mais próximos dos dados estimados. Assim a capacidade de predição de uma variável em função de outra fica mais evidente. Contudo a análise conjunta do MOR e do DAp não apresentou resultados que permitissem essa predição com clareza. O MOR apresentou melhor relação com grandezas relativas (resultados em porcentagem) como o MV e o CF.

Os rendimentos mássico e energético foram todos maiores que os citados na literatura especializada. No tratamento mais severo a perda de massa foi menor que 20% e a diminuição do conteúdo energético original foi menor que 8%. Os principais autores (Doat, 1985; Bergman *et al.*, 2005; Prins *et al.*, 2006) relatam uma diminuição de até 30% e 10% respectivamente para tais tratamentos. Uma possível razão para esta situação seriam as dimensões dos corpos-de-prova. Normalmente, nas pesquisas com torrefação, as amostras são moídas, portanto possuem dimensões diminutas. Neste estudo as amostras torrificadas tinham medidas relativamente grandes (2 x 4 x 8 cm) para possibilitar o acompanhamento da mudança de temperatura dentro do corpo-de-prova.

Os valores de PCS também estão diferentes do esperado. Na literatura especializada (Doat, 1985; Felfli *et al.*, 2005; Arias *et al.*, 2008), há valores de 25 MJ/kg contra 22 MJ/kg da

madeira torrificada neste estudo. Estes baixos valores podem ser atribuídos a variáveis como a idade das árvores ou outras não abordadas na pesquisa como a proporção entre celulose, hemicelulose e lignina e a razão entre o oxigênio e o carbono na madeira (O/C). O teor de carbono está intimamente ligado ao PCS e sofre influência negativa do teor de oxigênio. Uma análise elementar permitiria quantificar quais são os teores destes e avaliar os efeitos sobre esta propriedade energética.

O teor de carbono fixo também não está condizente com os encontrados na literatura (Doat, 1985; Felfli *et al.*, 2005; Arias *et al.*, 2008; Bridgeman *et al.*, 2008). Provavelmente as dimensões das amostras interferiram no processo de transferência de calor e prejudicaram a saída completa das matérias voláteis nos patamares de cada tratamento. Os gráficos de perda de massa (figuras 22, 23 e 24) ilustram esta situação, neles pode-se observar que a curva de perda de massa não se estabiliza ao final do patamar de cada tratamento. Portanto faz-se necessário reavaliar a relação entre as dimensões das amostras com o tempo de tratamento.

A diminuição expressiva da resistência mecânica, indicada pelos valores decrescentes do MOR, denota a eficiência da torrefação para este fim. A torrefação diminui o consumo de energia para cominuir a biomassa porque esta se torna mais quebradiça, friável. A importância da cominuição está no aumento da superfície específica, o que facilita os processos de transferência de calor exigidos em alguns processos como a gaseificação ou mesmo a combustão. Partículas menores refletem maior friabilidade e conseqüentemente maiores superfícies específicas. Assim pode-se afirmar que quanto menor for o valor do MOR, menos energia é requerida para romper as fibras da madeira porque esta está mais friável.

5. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

A torrefação é um tratamento eficaz para o condicionamento energético da madeira. Este tratamento térmico provoca alterações significativas em suas propriedades e a torna um combustível mais homogêneo. De maneira geral, todas as propriedades sob análise apresentaram resultados concordantes com os estudos desenvolvidos por outros pesquisadores do tema. No entanto, algumas delas mostraram-se um pouco diferentes do esperado, fato justificado principalmente pelas condições particulares das amostras e dos tratamentos.

A densidade aparente só apresentou diferença significativa a partir do tratamento 3 (250°C), causada principalmente pela perda de massa. O rendimento gravimétrico, por sua vez, foi alto em função das dimensões dos corpos-de-prova. A resistência mecânica diminuiu bastante com o aumento da temperatura, expressa pelos baixos valores do módulo de ruptura (MOR). A análise química imediata denotou a queda significativa do teor de matérias voláteis e conseqüentemente o aumento do teor de carbono fixo. O poder calorífico superior também cresceu com o aumento da temperatura de tratamento, embora não tenha sido expressivo. Assim o crescimento da densidade energética foi baixo. Contudo o rendimento energético foi bastante alto, principalmente devido à pequena perda de massa.

O tratamento 2 (220°C) não causa mudanças expressivas na madeira, embora estas sejam significativas estatisticamente. A exceção do Módulo de Ruptura (MOR), todos os outros parâmetros analisados não apresentaram diferença relativa maior que 5% em relação à testemunha. Este tratamento causou uma diminuição porcentual de 15,19% no MOR, também pequena se comparada com a causada pelos outros tratamentos (40,47% e 62,79%). Provavelmente os efeitos deste tratamento sejam mais expressivos na higroscopicidade e na estabilidade dimensional, propriedades mais importantes para outros usos da madeira que não energéticos e, por este motivo, não abordados neste estudo.

O tratamento 3 (250°C) produziu modificações importantes nas propriedades analisadas. A densidade energética destaca-se por ter apresentado seu valor mais alto para este tratamento. A 250°C houve uma melhor relação entre a diminuição da densidade aparente (ocasionada principalmente pela perda de massa) e o aumento do poder calorífico superior.

O tratamento 4 (280°C) causou as maiores mudanças nos parâmetros sob análise. Com exceção da densidade energética, todas as propriedades apresentaram diferença relativa maior que 10%, em especial o Carbono Fixo (CF) com crescimento de 53,68% e o MOR com diminuição de 62,79%. Contudo este crescimento não foi acompanhado pelo Poder Calorífico Superior (PCS), que só aumentou 15,74%.

Os resultados das análises denotam que o tratamento 2 não causa alterações que justifiquem seu uso para condicionamento energético da madeira. Tal temperatura seria adequada para a termorreificação da madeira para usos na construção, e mesmo assim, em situações que não exijam alta resistência mecânica. Já os tratamentos 3 e 4 mostraram-se eficazes para as demandas desta pesquisa e certamente são indicados para o condicionamento energético da biomassa.

As diferenças entre os tratamentos 3 e 4, a grosso modo, foram pequenas. O tratamento 3 apresentou diferenças relativas de 14,75% (média aritmética das diferenças relativas de todos os parâmetros) em relação à testemunha para todos os parâmetros analisados, contra 22,24% do tratamento 4, logo diferença de 7,5% entre eles. Apesar de não ter um padrão estabelecido com valores fixos para cada propriedade analisada, de forma a realizar comparações que permitam definir qual o melhor tratamento, a análise dos resultados associados às condições operacionais dos tratamentos possibilita tal definição. Assim, considerando que o tratamento 3 produziu um combustível lignocelulósico com boas propriedades energéticas em menos tempo, portanto com menor dispêndio energético que o tratamento 4, pode-se afirmar que o tratamento 3 é o mais eficaz entre os empregados.

Em face dos resultados obtidos, propõem-se novas análises que proverão informações importantes, tanto do ponto de vista técnico quanto do econômico. Um ensaio de granulometria permitiria uma melhor avaliação do aumento da friabilidade. A potência da torrefação pode ser analisada em um ensaio de combustão, onde se verifique a energia contida no material em função do seu tempo de queima. Um balanço energético é uma forma de se averiguar o real benefício da torrefação através da relação entre o gasto energético para se produzir a madeira torrificada e a energia contida nesta. As análises químicas elementar e molecular fornecem informações importantes sobre a constituição da biomassa que permitem prever seu comportamento frente à torrefação. Análises não destrutivas, como a espectroscopia no infravermelho próximo, têm grande potencial para caracterizar a biomassa torrificada.

As propriedades da madeira torrificada indicam seu melhor uso. Em sistemas que utilizam a biomassa natural, a madeira torrificada tem grandes vantagens como seu maior PCS e menor emissão de voláteis. A verdadeira vantagem da torrefação é o alto grau de padronização do processo que permite o seu uso para fins mais exigentes quanto à estabilidade, como a gaseificação. Além da menor resistência mecânica que facilita o processo de moagem. De fato, o melhor uso deste combustível está vinculado à temperatura de tratamento, que garante as características adequadas para cada fim.

REFERÊNCIAS

- ABRAF – Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas. Anuário Estatístico 2007: Ano Base 2006. Brasília, 2006. 84 p.
- Acioli, J. de L. Fontes de Energia. Ed. UnB: Brasília, DF. 1994. 138 p.
- AMS – Associação Mineira de Silvicultura. <http://www.silv Minas.com.br/>.
- Almeida, G. Valorização energética de resíduos madeireiros mediante a termorreificação. Relatório de atividades (bolsa de pós-doutorado) N°1. FAPESP. 57p.
- Arcate, J. R. Torrefied Wood, an enhanced wood fuel. *In: Bioenergy 2002*. Boise, Idaho, September 22-26, 2002.
- Arias, B.; Pevida, C.; Feroso, J.; Plaza, M.G.; Rubiera, F.; Pis, J.J. Influence of Torrefaction on the Grindability and Reactivity of Woody Biomass. *Fuel Processing Technology*, 89, 2008. p. 169 – 175.
- Bergman, P.C.A. ; A.R. Boersma; J.H.A. Kiel; M.J. Prins; K.J. Ptasinski; F.J.J.G. Janssen. Torrefaction for entrained-flow gasification of biomass. Petten, Netherlands: ECN, 2005. 51p. Netherlands.
- Bodig, J.; Jayne, B. A. Mechanics os wood and wood composites. Van Nostrand Reinhold, New York. 1982. 712 p.
- Bowyer, J. L.; Shmulsky, R.; Haygreen, J. G. Forest Products and Wood Science: an Introduction. Iowa State Press, Iowa. 2003. 554 p.
- Brasil, Ministério de Minas e Energia. Balanço Energético Nacional 2008 – Ano base 2007 Resultados Preliminares. Brasília, 2008. 44 p.
- 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*, 87, 2008. p. 844 – 856.
- Brito, J. O. Princípios de produção e utilização de carvão vegetal de madeira. *In: Documentos Florestais*. Piracicaba, SP: IPEF, 1990. 14 p.
- Brito, J. O.; Silva Jr. F. G. Fundamentos e Aplicações da Química da Madeira: Apontamentos de aula 1. Esalq/USP; Piracicaba, SP. 2005.
- Brito, J.O.; Garcia, J.N.; Bortoletto Júnior, G.; Pessoa, A.M. das C.; Silva, P. H. M. da. Densidade básica e retratibilidade da madeira de *Eucalyptus grandis* submetida a diferentes temperaturas de termorreificação. *In: Cerne*, Lavras, v. 12, n. 2, p. 182-188, abr./jun. 2006.
- Brown, T. L. ; Lemay Jr., H. E. ; Bursten, B. E. Química : Ciência Central. LTC : Rio de Janeiro, RJ. 1999. 702 p.
- Browning, B. L. The Chemistry of Wood. Intescience Publishers. New York. 1963. 689 p.

- Bruger, L. M. ; Richter, H. G. Anatomia da Madeira. Nobel : São Paulo, SP. 1991. 154 p.
- Caillé, A. The future of energy, today. *In : World Energy in 2006*. World Energy Council : London, UK. 2006. 44 p.
- Caron, B. O. ; Medeiros, S. L. P. ; Manfron, P. A. ; Schmidt, D ; Bianchi, C. ; Pommer, S. F. Eficência da conversão da radiação solar fotossinteticamente ativa interceptada em fitomassa de alface. *In : Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, RS. V.11, n. 2, p. 261-268. 2003.
- CETEC. Teoria Simplificada da Combustão. Belo Horizonte, MG: Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais. 1988. 30 p.
- Doat, J. Un nouveau produit énergétique pour les pays en développement. Le bois torréfié. *In : Revue bois et forêts des tropiques*, n. 208, 1985. p 57-67.
- DOE – Department of Energy. Thermodynamics, Heat Flow and Fluid Flow. US Department of Energy, Washington D.C. 20585. 1992. 274 p.
- Eyglunant, B. Thermique : théorique et pratique. Hermes : Paris. 1994. 260 p.
- FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. State of World's Forests 2007. FAO : Rome. 2007. 144 p.
- Felfli F. E. F. ; Luengo, C. A. ; Beaton P. ; Suarez. A. Efficiency test for bench unit torrefaction and characterization of torrefied biomass. 4th Biomass Conference of Americas. Vol. 1: 589-592 Aug/Sept. 1999.
- 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 2000*. 2000, 5p.
- FPL – Forest Product Laboratory. Wood Handbook: Wood as an Engineering Material. USDA Forest Service. Madison, Wisconsin. 1999. 489 p.
- Girard, P., N. Shah, Recent developments on torrefied wood, an alternative to charcoal for reducing deforestation, REUR Tech. Ser. 20 (1991) 101–114.
- Girods, P.; Rogaume, Y.; Dufour, A.; Rogaume, C. ; Zoulalian, A. Low-temperature pyrolysis of wood wasting containing urea-formaldehyde resin. *Renewable Energy*. 2007, doi:10.1016/j.renene.2007.03.026.
- Gomes, P. A.; Oliveira, J. B. Teoria da carbonização da madeira. *In: Uso da madeira para fins energéticos*. Belo Horizonte, MG: CETEC, 1980. p 27 - 41.
- Gómez, C. J.; Mészáros, E.; Jakab, E.; Velo, E.; Puigjaner, L. Thermogravimetry/mass spectrometry study of wood residues and an herbaceous biomass crop using PCA techniques. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 80, 2007. 416 – 426.
- Haddad, J.; Aguiar, S. C. Eficiência Energética: integrando usos e reduzindo desperdícios. Brasília: ANEEL; ANP, 1999. 432 p.

- Hakkou, M.; M. Petrissans; P. Gerardin; A. Zoulalian. Investigations of the reasons for fungal durability of eat-treated beech wood. *Polymer Degradation and Stability* 91. 2006. p 393 - 397.
- Hall, D. O.; House, J. I.; Scrase, I. Visão Geral de Energia e Biomassa. *In: Uso da Biomassa para Produção de Energia na Indústria Brasileira*. Rosillo-Calle, Frank; Bajay, Sergio Valdir; Rothman, Harry. (org.). Campinas, SP: UNICAMP, 2005. p. 25 – 67.
- Hémery, D.; Debeir, J. C.; Deléage, J. P. Uma história da energia. Editora: Universidade de Brasília. Brasília, DF. 1993. 448 p.
- Homan, W. J.; Jorissen, A.J.M. Wood modification developments. *In: HERON*, Vol. 49, No. 4 (2004).
- IEA – International Energy Agency. Key World Energy Statistics. 2007. 82p.
- Inari, G. N.; Mounquengui, S.; Dumarçay, S.; Pétrissans, M.; Gérardin, P. Evidence of char formation during wood heat treatment by mild pyrolysis. *Polymer Degradation and Stability* 92. 2007. 997 – 1002.
- Kartal, S. N.; Hwang, W.; Imamura, Y. Combined effect of boron compounds and heat treatments on wood properties: Chemical and strength properties of wood. *Journal of Materials Processing Technologies*. 2007. doi:10.1016/j.jmatprotec.2007.07.001.
- Kollman, F.; Côté Jr., W. A. Principles of wood science and technology. I – solid wood. New York, N. Y. Springer Verlag, 1968. 592 p.
- Lipinsky, E.S. J.R. Arcate, T.B. Reed. Enhanced wood fuels via Torrefaction. *Fuel Chem. Div. Preprints* 47 (2002). 408–410.
- Luengo, C.A.; Felfli, F.E.F.; Bezzon, G. Pirólise e Torrefação da biomassa. *In: Biomassa para energia*. Cortez, L.A.B.; Lora, E. S. 2006, 10 p.
- Marques, M.; Haddad, J.; Martins, A. R. S. (coord.) Conservação de Energia: Eficiência Energética de Instalações e Equipamentos. Itajubá, MG: FUPAI, 2001. 467 p.
- Martins, H. Madeira como fonte de energia. *In: Uso da madeira para fins energéticos*. Belo Horizonte, MG: CETEC, p 9 – 26. 1980.
- Martins, V. A. Secagem de Madeira Serrada. IBDF/LPF: Brasília, DF. 1988. 56 p.
- Melo, J. E. Estruturas de Madeira: apostila. UnB/FAU/LPF. Brasília. 2003. 61 p.
- Mburu, F.; Dumarçay S.; Petrissans M.; Gérardin P. Evaluation of thermally modified *Grevillea robusta* heartwood as an alternative to shortage of wood resource in Kenya: characterisation of physicochemical properties and improvement of bio-resistance. *Bioresource Technology*, 98 (18). 2007. 3478-3486

- Militz, H. Heat Treatment Technologies in Europe: Scientific Background and Technological State-of-Art. *In: Proceedings of Conference on "Enhancing the durability of lumber and engineered wood products"* February 11-13, 2002, Kissimmee, Orlando. Forest Products Society, Madison, US.
- Morey, P. R. O crescimento das árvores. EPU : São Paulo. 1980. 72 p.
- Mouras, S.; Girard,P.; Rousset,P., PermadiP. ; Dirol, D. ; Labat, G. Propriétés physiques de bois peu durables soumis à un traitement de pyrolyse ménagée. *In : Annal of Forest Science*, vol. 59 (2002), 317 – 326.
- Nogueira, L. A. H.; Lora, E. E. S.; Trossero, M. A.; Frisk, T. Dendroenergia fundamentos e aplicações. Brasília, DF: ANEEL. 2000.144 p.
- Prins, M. J. Thermodynamic analysis of biomass gasification and torrefaction. Tese de Doutorado, Department of Chemical Engineering, Technische Universiteit Eindhoven. 2005. 164 p.
- Prins, M. J.; Ptasiński, K.J.; Janssen, F.J.J.G. Torrefaction of wood Part 1. Weight loss kinetics. *In: J. Anal. Appl. Pyrolysis*. 77, 2006. p 28 – 34.
- Prins, M. J.; Ptasiński, K.J.; Janssen, F.J.J.G. More efficient biomass gasification via torrefaction. *In: ENERGY*. 31, 2006a. p. 3458-3470.
- Raithby, G. D.; Hollands, T. K. G. Convection Heat Transfer. *In: Mechanical Engineering Handbook*. Ed. Frank Kreith. (ed.) Boca Raton, Florida: CRC, 1999. p. 836-878.
- Reis, L. B. dos. Geração de Energia Elétrica: tecnologia, inserção ambiental, planejamento, operação e análise de viabilidade. Barueri, SP: Manole, 2003. 324 p.
- Risbrudt, C. D. Wood and Society. *In: Handbook of wood chemistry and wood composites*. Rowell, R. M. (ed.) Boca Raton, Florida: CRC, 2005. p 1-7.
- Ropp, J. Traitement thermique du bois par conduction. *Tracés*. 17, 2007. p. 8 -10.
- Rousset, P. L. A. Choix e validation experimentale d'un modele de pyrolyse pour le bois traite par haute temperature : de la micro-particule au bois massif. Tese Doutorado. LERMAB, ENGREF. Nancy, França. 2004, 203 p.
- Rousset, P. L. A.; Perré, P; Girard, P. Modification of mass transfer properties in poplar wood (*Populus robusta*) by a thermal treatment at high temperature. *Holz Roh Werkst*. 62, 2004. 113 – 119.
- Rousset, P.; Perré, P. ; Turner, I. Selection of a Micro-particle Wood Pyrolysis Model for use in a Macroscopic Transport Model. *Ann. For. Sci*. 63, 2006. p. 1–17.
- Rowell, R. M.; Pettersen, R.; Han, J. S.; Rowell, J. S.; Tshabalala, M. A. Cell Wall Chemistry. *In: Handbook of wood chemistry and wood composites*. Rowell, R. M. (ed.) Boca Raton, Florida: CRC, 2005. p 35 – 74.

- Rowell, R. M.; LeVan-Green, S. L. Thermal Properties. . *In: Handbook of wood chemistry and wood composites*. Rowell, R. M. (ed.) Boca Raton, Florida: CRC, 2005. p 121 – 138.
- Sachs, I. Caminhos para o desenvolvimento sustentável. Garamond: Rio de Janeiro, RJ. 2002. 96 p.
- SBS – Sociedade Brasileira de Silvicultura. Atos e Números do Brasil Florestal. SBS: São Paulo, SP. 2006. 108 p.
- Sorensen, B. Renewable Energy: Its physics, engineering, use, environmental impacts, economy and planning aspects. Elsevier: London. 2004. 945 p.
- Stubbing, T. J. Method and apparatus for continuous drying in superheated steam. United States Patent 5711086. Disponível em:
<http://www.freepatentsonline.com/5711086.html>
- Udaeta, M. E. M.; Burani, G. F.; Grimoni, J. A. B.; Nyimi, D. R. Slaughter. Energia. *In: Iniciação a Conceitos de Sistemas Energéticos para o Desenvolvimento Limpo*. Grimoni, J. A. B.; Galvão, L. C. R.; Udaeta, M. E. M. (org.). São Paulo: Edusp, 2004. p. 67 – 97.
- Uslu, A. Pre-Treatment technologies and their effects on the international bioenergy supply chain logistics - Techno-economic evaluation of torrefaction, fast pyrolysis and pelletisation. Dissertação de mestrado (2005), 114 p.
- Von Bertalanffy, L. Teoria Geral dos Sistemas. Ed. Vozes, Petrópolis, RJ. 2ª ed. 1975. 351 p.
- Wenzl, H. F. J. The Chemical technology of Wood. Academic Press: New York. 1970. 692 p.
- Weststeijn A. First Torrefied Wood Successfully Cofired with Coal. *In: Biomass Pyrolysis Network April 2004 Newsletter*.
- Winandy, J., Rowell, R. M. Chemistry of Wood Strength. *In: Handbook of wood chemistry and wood composites*. Rowell, R. M. (ed.) Boca Raton, Florida: CRC, 2005. p 303-347.
- Windeisen, E.; Strobel, C.; Wegener, G. Chemical changes during the production of thermo-treated beech wood. *Wood Science Technology*. 2007. DOI 10.1007/s00226-007-0146-5.
- Yildiz, S.; Gezer, E. D.; Yildiz, U. C. Mechanical and chemical behavior of spruce wood modified by heat. *Building and Environment*. 41, 2006. 1762-1766.
- Zanzi, R.; D. Ferro T.; Torres, A.; Soler, P. B.; Björnbohm, E. BIOMASS TORREFACTION. *In: 2nd World Conference and Technology Exhibition on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection*. Roma, Itália, 2004.4p.