

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SANEAMENTO,
MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS**

**VIABILIDADE TÉCNICA E AMBIENTAL DA
UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE MADEIRA PARA
PRODUÇÃO DE UM COMBUSTÍVEL ALTERNATIVO**

Artur Tôrres Filho

**Belo Horizonte
2005**

**VIABILIDADE TÉCNICA E AMBIENTAL DA
UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE MADEIRA PARA
PRODUÇÃO DE UM COMBUSTÍVEL ALTERNATIVO**

Artur Tôrres Filho

Artur Tôrres Filho

VIABILIDADE TÉCNICA E AMBIENTAL DA UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE MADEIRA PARA PRODUÇÃO DE UM COMBUSTÍVEL ALTERNATIVO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração: Meio Ambiente

Orientador: Prof. Dr. Gilberto Caldeira Bandeira de Melo

Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental
Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG

Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos

Escola de Engenharia

Universidade Federal de Minas Gerais

Belo Horizonte

2005

DEDICATÓRIA

À memória de Arthur Tôrres, exemplo de generosidade e confiança no ser humano.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Gilberto pela orientação, apoio e pelas imprescindíveis correções de rumo, sem as quais não seria possível desenvolver este trabalho com o mesmo aprofundamento;

Aos sócios da empresa Engenho Nove, André Luiz e José Andrade, por abraçarem este projeto e pelo fornecimento da estrutura física e recursos necessários para a pesquisa;

Aos parceiros da SEGMA, Luciano, Rodrigo, Gustavo e Nilson pelo rigor técnico nas medições e disponibilização da equipe técnica, equipamentos de campo e laboratório;

Às empresas FITED e Padaria São Geraldo, pela disponibilização das estruturas de produção;

Aos colegas da Engenho Nove, Paulo Roberto, Fernanda, Élyda, Miriam, Pedro, Agnaldo, Demétrio, Antônio Pedro, Érica, Fátima, João Luiz e Kenso, por todo o apoio e colaboração;

A Érica, Patrícia e Lorena pelos conhecimentos de informática e normalização que conferiram toda a estrutura para publicação da dissertação;

Aos técnicos da SMLU – Secretaria Municipal de Limpeza Urbana, Heuder e Max, pela disponibilização dos dados e toda a estrutura do Aterro Sanitário de Belo Horizonte;

Aos técnicos do CETEC - Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais, Gisele e Fernando, pelo empenho e esclarecimentos sobre as metodologias de realização das análises;

Às técnicas do IPT - Instituto de Pesquisa Tecnológico do Estado de São Paulo, Lígia e Heloísa, pelo profissionalismo e interesse nos serviços prestados;

Aos meus pais, Grace e Arthur, por minha formação e pelo exemplo de vida;

À minha esposa Patrícia, pelo companheirismo, confiança e compreensão no dia a dia;

Aos meus filhos, Vítor, Guilherme e Eduardo, fontes de combustível para minha existência.

"Triste não é mudar de idéia. Triste é não ter idéia
para mudar."

Francis Bacon

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS	i
LISTA DE FIGURAS	iii
LISTA DE TABELAS	iv
1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 - Contextualização	1
1.2 – Utilização de fontes de energia	2
1.3 - Justificativas	6
2 - OBJETIVOS	7
2.1 - Objetivo Geral	7
2.2 - Objetivos específicos	7
3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
3.1 - Características dos resíduos de madeira e fontes potenciais de geração	8
3.2 - Influência das reações de pirólise e carbonização no poder calorífico da madeira e seus derivados	16
3.3 - Torrefação da madeira e derivados	30
3.4 - Adaptação de fornalhas para utilização de combustíveis alternativos derivados de madeira	36
3.5 - Impactos ambientais associados à combustão dos derivados de madeira	41
4 – METODOLOGIA	56
4.1 – Considerações Gerais	56
4.2 - Estratégia de desenvolvimento dos trabalhos	57
4.3 – Preparo do material lenhoso – tratamento mecânico dos resíduos	58
4.4 – Primeira fase do experimento – ensaios de laboratório	59
4.5 - Tratamento térmico em forno rotativo - ensaios em escala real	65
4.6 - Teste de queima em fornalha - campanhas de amostragens isocinéticas	69

5 – RESULTADOS	72
5.1 - Ensaio em escala laboratorial	72
5.1.1 - Determinação do poder calorífico superior e inferior em cadinho aberto – tratamento térmico em mufla	72
5.1.2 - Determinação do poder calorífico superior e inferior em cadinho fechado com tampa – tratamento térmico em mufla	77
5.2 - Ensaio em escala industrial	82
5.3 - Campanhas de amostragem isocinéticas	84
6 – DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	87
6.1 - Potencial para aplicação do produto e adaptação de fornalhas	88
6.2 - Análise comparativa entre os resultados obtidos nos experimentos em escala laboratorial, escala industrial e na literatura consultada	92
6.3 - Análise comparativa da performance dos combustíveis nos testes de queima e campanhas de amostragens isocinéticas	96
7 – CONCLUSÕES	101
8 – RECOMENDAÇÕES	103
9 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

cal/g – caloria por grama

CETEC - Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais

CFC – Clorofluorcarbono

CH₄ – metano

CO - monóxido de carbono

CO₂ - dióxido de carbono

COPAM - Conselho Estadual de Política Ambiental

CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente

DN - Deliberação Normativa

FEAM - Fundação Estadual do Meio Ambiente

FET – Fator de equivalência de toxicidade

ha – hectare

IPT- Instituto de Pesquisa Tecnológico do Estado de São Paulo

kcal/kg - quilocaloria por quilograma

kcal/m³ - quilocaloria por metro cúbico

kcal/Nm³ - quilocaloria por normal metro cúbico

kg - quilograma

kgf/cm² - quilograma força por centímetro quadrado

kg/m³ - quilograma por metro cúbico

m² - metro quadrado

m/s – metros por segundo

MDF – médium density fibreboards

mg/Nm³ - miligrama por normal metro cúbico

NBR – Norma Brasileira Registrada

NO_x - óxidos de nitrogênio

NO₂ - dióxido de nitrogênio

NO - óxido de nitrogênio

NTO/CCMS – North Treaty Organization's – Comitee on Challenges of Modern Society

O₃ - ozônio

PCDD/F – dibenzo-p-dioxinas policloradas e dibenzofuranos policlorados

PCI - Poder Calorífico Inferior

PCS - Poder Calorífico Superior

SINDUSCON - Sindicato da Industria da Construção Civil

SMLU – Secretaria Municipal de Limpeza Urbana

SO₂ - dióxido de enxofre

tep - tonelada equivalente de petróleo

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Oferta interna de energia no Brasil em 2002	3
Figura 1.2 - Oferta interna de energia no mundo em 2000	3
Figura 1.3 - Estrutura da oferta interna de energia (%) no Brasil, nos países da OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development) e no mundo	4
Figura 3.1 - Resíduos de poda de árvores	13
Figura 3.2 - Resíduos de construção civil	14
Figura 3.3 - Análise termogravimétrica da madeira e de seus componentes	20
Figura 3.4 - Variação do poder calorífico em função do teor de carbono fixo	27
Figura 3.5 - Variação do poder calorífico em função do teor de cinzas	27
Figura 3.6 - Variação do poder calorífico em função do teor de cinzas + materiais voláteis	28
Figura 3.7 - Variação do PCS em função da temperatura de carbonização	30
Figura 3.8 - Aparato experimental para teste de combustão	48
Figura 3.9 - Características da combustão em função do tempo de queima	49
Figura 4.1 - Picador de toras utilizado para a fragmentação do material	56
Figura 4.2 - Fluxograma da estratégia de desenvolvimento dos trabalhos	58
Figura 4.3 - Calorímetro adiabático utilizado na determinação do poder calorífico	61
Figura 4.4 - Analisador CNHS	61
Figura 4.5 - Amostras após tratamento térmico	62
Figura 4.6 - Forno cilíndrico rotativo– vista 1	66
Figura 4.7 - Forno cilíndrico rotativo – vista 2	66
Figura 4.8 - Peneira ventilada	67
Figura 4.9 - Cavaco cru (a esquerda) e cavaco após tratamento térmico	69
Figura 6.1 - Comparação qualitativa entre a taxa de energia fornecida pela combustão da lenha e a demandada para produção de vapor	90
Figura 6.2 - Forno da unidade de panificação queimando lenha	96
Figura 6.3 - Forno da unidade de panificação queimando cavaco	97
Figura 6.4 - Concentração de material particulado nas amostragens isocinéticas realizadas com cavaco torrado	98
Figura 6.5 - Concentração de material particulado nas amostragens isocinéticas realizadas com cavaco cru	99
Figura 6.6 - Concentração de material particulado nas amostragens isocinéticas realizadas com lenha	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Composição elementar da madeira	10
Tabela 3.2 - Proporção dos diversos componentes da madeira segundo diversos autores	11
Tabela 3.3 - Razão da absorção da radiação de calor entre os principais gases responsáveis pelo efeito estufa e o dióxido de carbono (CO ₂)	12
Tabela 3.4 - Produção de fitomassa em duas culturas de eucalipto	12
Tabela 3.5 - Percentual do calor absorvido na fornalha em relação ao calor desenvolvido na combustão (rendimento térmico percentual)	17
Tabela 3.6 - Poder calorífico superior - PCS e inferior - PCI da lenha em função da umidade	17
Tabela 3.7 - Evolução da carbonização da madeira em função do aumento das temperaturas	23
Tabela 3.8 - Variação da composição elementar e rendimento do processo de carbonização em função da temperatura	23
Tabela 3.9 - Rendimento percentual em massa de processos de carbonização	24
Tabela 3.10 - Poder calorífico inferior de produtos utilizados como combustíveis sólidos	25
Tabela 3.11 - Valores de A, em função da relação $\frac{V}{V+C}$	26
Tabela 3.12 - Poder calorífico do carvão vegetal em função da temperatura de carbonização*	29
Tabela 3.13 - PCS calculado a partir da análise elementar do carvão e da equação (3.3)	29
Tabela 3.14 - Características da madeira após torrefação	32
Tabela 3.15 - Características da madeira torrada	34
Tabela 3.16 - Influência do tempo de processamento na torrefação da madeira	34
Tabela 3.17 - Poluentes atmosféricos e principais consequências associadas	45
Tabela 3.18 - Características do produto obtido com o processo de torrefação de madeira em comparação com a madeira seca ao ar e carvão vegetal (base úmida)	46
Tabela 3.19 - Composição elementar do produto obtido com o processo de torrefação da madeira em comparação com a madeira seca ao ar e carvão vegetal	47
Tabela 3.20 - Rendimento em massa e energia do processo de torrefação em cavacos de madeira e briquetes de serragem	47
Tabela 3.21 - Emissão de fumaça dos diferentes combustíveis no teste de queima	50
Tabela 3.22 - Combustíveis utilizados nas avaliações e campanhas de amostragem	51
Tabela 3.23 - Análises dos gases das misturas de combustíveis	52

Tabela 3.24 - Concentração de dioxinas e furanos no fluxo gasoso proveniente da queima de diversas proporções de mistura de combustíveis	52
Tabela 3.25 - Concentração de metais nas emissões provenientes da queima de diversas misturas de combustíveis	53
Tabela 3.26 - Concentração de metais nas cinzas provenientes da queima de diversas misturas de combustíveis	54
Tabela 3.27 - Concentração de metais na fuligem proveniente da queima de diversas misturas de combustíveis	54
Tabela 5.1 - Planilha para determinação do poder calorífico inferior e superior - tratamento térmico em mufla com cadinho aberto	73
Tabela 5.2 - Planilha para determinação do teor de enxofre na amostra (S) - tratamento térmico em mufla com cadinho aberto	75
Tabela 5.3 - Planilha para Determinação do teor de carbono, nitrogênio e hidrogênio - Método Aparelho C.H.N. - tratamento em mufla com cadinho aberto	76
Tabela 5.4 - Planilha de determinação do PCI e PCS - tratamento térmico em mufla com cadinho fechado	77
Tabela 5.5 - Planilha para determinação do teor de enxofre na amostra - tratamento térmico em mufla com cadino fechado	79
Tabela 5.6 - Planilha para determinação do teor de carbono, nitrogênio e hidrogênio - Método Aparelho C.H.N. tratamento térmico em mufla cadinho fechado	80
Tabela 5.7 - Perda de massa nos tratamentos térmicos em laboratório a diversas temperaturas com cadinho sem tampa	81
Tabela 5.8 - Perda de massa nos tratamentos térmicos em laboratório a diversas temperaturas com cadinho fechado (com tampa) e ganho de umidade após 24, 48 e 72 horas	81
Tabela 5.9 - Percentual de umidade, enxofre, hidrogênio em cavacos de madeira submetidos a tratamento térmico em forno rotativo em diversas faixas de temperatura	82
Tabela 5.10 - Poder calorífico superior e inferior em cavacos de madeira submetidos a tratamento térmico em forno rotativo em diversas faixas de temperatura	83
Tabela 5.11 - Resultados obtidos em amostragem isocinética nos gases de exaustão na chaminé de uma fornalha queimando lenha	84
Tabela 5.12 - Resultados obtidos em amostragem isocinética nos gases de exaustão na chaminé de uma fornalha queimando cavaco tratado a 160 – 180° C	84

Tabela 5.13 - Resultados obtidos em amostragem isocinética nos gases de exaustão na chaminé de uma fornalha queimando cavaco torrado	85
Tabela 5.14 - Composição volumétrica dos gases – Medições realizadas durante as amostragens isocinéticas com ORSAT	85
Tabela 5.15 - Planilha para determinação do consumo de combustível em fornalha durante teste de queima para avaliação de combustíveis diversos	85
Tabela 5.16 - Planilha para determinação de perda de massa nos diversos tratamentos em forno rotativo e rendimento energético*	86
Tabela 6.1 - Valores de PCI em kcal/kg, de produtos obtidos com a torrefação da madeira em diversas temperaturas e tempos de processamento - Comparativo entre o ensaio em escala real e a bibliografia	93
Tabela 6.2 - Comparativo do poder calorífico superior e inferior nos experimentos conduzidos em laboratório com cadinho aberto (sem tampa) e em escala real (forno rotativo)	94
Tabela 6.3 - Comparativo do poder calorífico superior e inferior nos experimentos conduzidos em laboratório com cadinho fechado (com tampa) e em escala real (forno rotativo)	95
Tabela 6.4 - Concentração de material particulado nas amostragens isocinéticas realizadas com diversos combustíveis	98
Tabela 6.5 - Taxa de geração de material particulado por quilo de combustível aplicado em fornalha durante teste de queima	100

RESUMO

Os resíduos sólidos de madeira encontram-se freqüentemente associados a problemas de disposição em operações de aterramento. Apesar da vocação natural desses materiais para sua utilização em processos de combustão, um volume expressivo desses resíduos tem sido descartado em aterros, em função de inúmeros impasses, tais como a desuniformidade dimensional das peças, a eventual presença de elementos estranhos ao material lenhoso (pregos, fios, arames), a umidade excessiva, o baixo poder calorífico, dentre outros fatores que levam diariamente uma elevada quantidade desses materiais ao descarte. Podas de árvores em grandes centros urbanos, resíduos provenientes da indústria da construção civil, bem como resíduos de madeira provenientes de processos industriais são alguns dos materiais avaliados no presente trabalho para o estudo da viabilidade de transformação desses resíduos em um combustível sólido com características adequadas para uma potencial aplicação do produto no mercado de combustíveis para geração de energia térmica.

Foram aplicados diversos tratamentos envolvendo o processamento mecânico para obtenção de cavacos e o processamento térmico dos mesmos, onde foram testadas faixas de temperaturas de 160 a 260° C, em escala de laboratório e escala real, durante quinze minutos para avaliação do incremento do poder calorífico nos materiais. A perda de massa no processo em escala real variou de 10,50 a 21,53%, com o rendimento energético tendo variado de 87,51 a 96,88 %. A comparação entre os resultados obtidos em escala de laboratório e escala real variou dentro de uma faixa de 1,82 a 17,23%. O poder calorífico superior do produto obtido nos diversos tratamentos, em escala real, ficou entre 4.653 e 4.796 kcal/kg. Na aplicação do produto obtido, foram realizados testes em um forno de panificação, onde foram realizadas amostragens isocinéticas na chaminé, para avaliação dos níveis de emissão de partículas para a atmosfera, em comparação com outros tipos de aplicação de biomassa como combustível. A taxa de geração de material particulado por quilo de combustível aplicado foi de 4,57 g/kg com o forno utilizando lenha, 2,77 g/kg com o forno utilizando cavaco sem tratamento térmico e de 1,73 g/kg com a unidade operando com o cavaco processado termicamente.

Palavras chave: resíduos de madeira, torrefação de madeira, combustível de biomassa, cavacos de madeira torreficados.

ABSTRACT

Wood wastes are often associated to problems in landfill disposal. In spite of the natural tendency of the use of these materials in combustion processes, the most part is being landfilled without use, due to several deadlocks such as uneven shape of the pieces, eventual presence of strange elements in the ligneous material (nails and wires), the excessive humidity, the low calorific power, among other facts that result in a great quantity of these materials being daily discharged. Trees pruning in large urban areas, waste from building construction as well as wooden waste deriving from industrial procedures are some of the material evaluated in this work in order to test the feasibility of their transformation into a solid fuel with adequate characteristics for use in thermal energy production, achieving economic value in the fuel market.

Different treatments were applied involving mechanical procedure to obtain splinters of regular size, and their thermal processing at temperature range from 160° to 260° C for fifteen minutes, in laboratory and industrial scale, evaluating the increment in the calorific value. The weight loss in industrial scale showed variation from 10.50% to 21.53% with an energetic yield varying between 87.51 and 96.88%. The comparison between the results obtained in laboratory and industrial scales varied within a range of 1.82% to 17.23%. The gross calorific value of the product obtained in several treatments, in industrial scale, varied between 4,653 and 4,796 kcal/kg. Application tests of the obtained product were undertaken in a bakery furnace, with isokinetic sampling of particles in the stack gases, in order to evaluate the level of particles emission in the atmosphere, comparing the emission with the results when using other biomass fuels. The rate of particle emission per kilogram of fuel burnt was 4.57 g/kg with the furnace using conventional timber; 2.77 g/kg with the furnace using the splinters without thermal treatment and 1.73 g/kg with the unit operating with the splinter thermally processed.

KEYWORDS: wood wastes; wood pyrolysis; biomass fuel; roasted wood chips.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

O acelerado processo de industrialização observado no último século, aliado à crescente concentração demográfica e urbanização da sociedade, tem acarretado um aumento considerável na produção de resíduos sólidos, com inevitáveis implicações ambientais (ROCCA et al., 1993).

Os resíduos sólidos de madeira, apesar do baixo potencial poluidor, têm-se constituído de problemas com significativa magnitude nos locais de disposição final, principalmente pelas dificuldades observadas em operações nas frentes de aterramento, além do comprometimento da qualidade da compactação nas células de aterros. Esses resíduos, da forma como são dispostos, encontram-se em condições impróprias para utilização direta como combustível sólido, em função de inúmeros problemas, tais como a desuniformidade dimensional das peças, a eventual presença de elementos metálicos (pregos, arames, parafusos), a umidade excessiva, o baixo poder calorífico, entre outros fatores que levam diariamente uma elevada quantidade desses materiais ao descarte, apesar da aptidão natural que os mesmos possuem para sua utilização nos processos de combustão.

Resíduos lenhosos provenientes da poda de árvores, descarte de estrados, galhadas de maciços florestais, carretéis, restos de embalagens, sobras da indústria de construção civil, são algumas fontes que podem ser utilizadas para viabilização da produção de combustíveis sólidos como alternativa de reciclagem de materiais, contribuindo, dessa forma, para o efetivo desenvolvimento sustentável.

O uso da madeira como fonte de energia é, talvez, a mais antiga das alternativas (MATOS et al., 1982). Na década de 50, cerca de 50% da energia consumida no Brasil era originada da biomassa (REZENDE, 1982). Com o passar do tempo, o consumo total e a contribuição da biomassa caíram, chegando a faixa de 27%, enquanto no mesmo período, combustíveis fósseis passaram de 28% para 44% de participação na matriz energética nacional. O futuro do país vem apontando, no entanto, para a necessidade do estabelecimento de um perfil energético auto-sustentável, de grande estabilidade e, sobretudo, livre de fontes de suprimento externas (D'ÁVILA e MAKRAY, 1981).

Um ponto relevante a ser abordado encontra-se relacionado às emissões atmosféricas provenientes dos processos de combustão. A atual preocupação ecológica levou ao estabelecimento de normas ambientais rigorosas. Os limites especificados para alguns poluentes atmosféricos dependem do tipo de combustível e da capacidade nominal das fontes estacionárias (PINHEIRO, 1995). A viabilidade ambiental de um combustível alternativo, portanto, encontra-se também relacionada aos níveis de emissão de poluentes verificados quando o mesmo é utilizado e não apenas à sua origem como matéria reciclada.

1.2 Utilização das fontes de energia

O fogo foi a primeira fonte de energia descoberta e conscientemente controlada pelo homem. Fazer fogo e utilizá-lo de maneira produtiva foi fundamental para iniciar o caminho rumo à civilização. Durante quase todo o tempo histórico, o homem dispôs somente da energia de sua própria força muscular, da tração animal, da lenha, da captação do movimento das águas (roda hidráulica) e dos ventos (moinhos de vento). A partir do século XIX, a lenha passou a ser substituída pelo carvão, e no século XX, a base da moderna civilização industrial foi assentada pelo uso generalizado do petróleo e da eletricidade, fundamentando grande parte da economia no uso de recursos fósseis. Depois da II Guerra Mundial, foi desenvolvido o aproveitamento tecnológico da energia nuclear como fonte geradora de eletricidade e como recurso adicional, para atender à expansão crescente do consumo de energia. A evolução da tecnologia moderna é caracterizada por um aumento e um controle cada vez maior sobre a energia. O acesso ao suprimento energético é base importante da existência humana, essencial à satisfação das necessidades básicas da sociedade moderna.

No mundo contemporâneo, a energia proveniente dos combustíveis fósseis – carvão mineral, gás natural e petróleo – é a mais solicitada, como pode ser observado nas Figuras 1.1 e 1.2. O consumo energético tem aumentado sempre, uma vez que está intimamente associado ao desenvolvimento das forças produtivas. Desta forma, o vertiginoso progresso experimentado pela humanidade nas últimas décadas aumentou drasticamente o consumo dos combustíveis fósseis, a ponto de as previsões para os próximos cinquenta ou cem anos indicarem o esgotamento das reservas, se mantidas as taxas anuais de crescimento industrial (NEIVA, 1987).

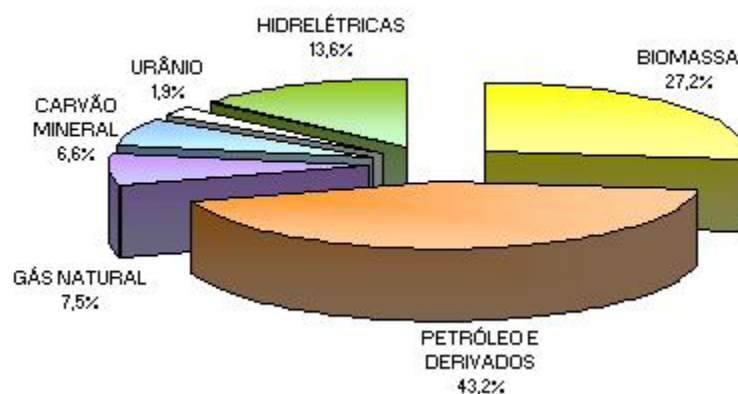
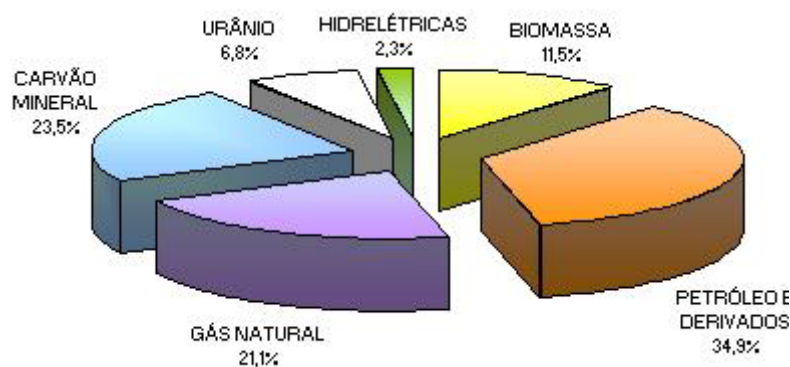


Figura 1.1 - Oferta interna de energia no Brasil em 2002

Fonte - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2004.



Fonte - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2004.

Apesar das previsões de exaustão das reservas, o homem prossegue manipulando as mesmas fontes de energia, sem grandes alterações nas proporções de uso das matrizes energéticas tradicionais. Por outro lado, procura-se otimizar o uso das fontes energéticas disponíveis, partindo-se para o desenvolvimento de formas não convencionais de energia, como o uso direto da energia solar armazenada na biomassa¹, a energia geotérmica, a eólica e a oriunda das marés e correntes. Surge então o conceito de energia renovável, assim denominada por ser proveniente de fontes renováveis de energia e, por conseguinte, reservas inesgotáveis e de menor potencial poluidor. No Brasil, 41% da matriz energética é renovável², enquanto a

¹ A energia de todos os biocombustíveis, diretos ou derivados, vem originalmente da radiação solar incidente, capturada durante a fotossíntese. A matéria orgânica carbonácea reage com oxigênio durante a combustão ou outras reações, liberando essa energia em forma de calor (Evans, 2001).

² Este valor foi obtido considerando a energia hidrelétrica como sendo uma fonte renovável, o que atualmente não se constitui de um consenso. Alguns aspectos considerados relevantes tais como a vida útil atribuída às barragens para geração de energia e os impactos causados pela inundação de áreas, alimentam uma discussão polêmica em torno da inclusão da energia hidrelétrica no mesmo patamar do grupo das energias consideradas limpas.

média mundial é de 14%, caindo nos países desenvolvidos para apenas 6%, segundo dados do Balanço Energético Nacional - edição 2003 (Figura 1.3).

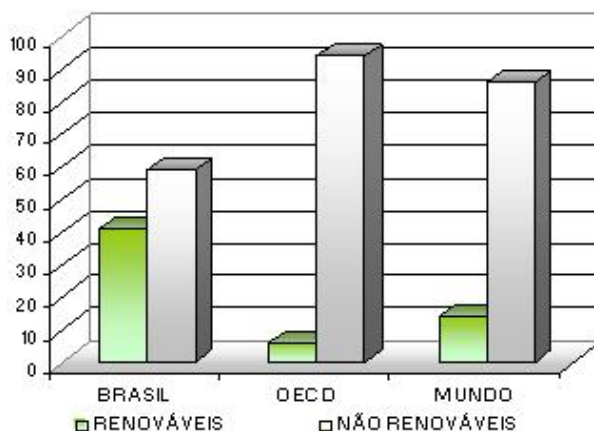


Figura 1.3 - Estrutura da oferta interna de energia (%) no Brasil, nos países da OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development) e no mundo

Fonte - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2004.

Não obstante ao fato de terem reservas finitas, a produção e o uso de energia não renovável são algumas das atividades humanas que produzem maior impacto sobre o meio ambiente. Mudanças climáticas globais sempre ocorreram ao longo da história da Terra em ciclos alternados de aquecimento e resfriamento. Entretanto, há evidências de uma tendência acelerada de aquecimento global a partir do início do século XX. Esta tendência estaria principalmente associada a alterações na composição dos gases atmosféricos, causadas por emissões provenientes das atividades antrópicas recentes. Esses gases são especialmente o dióxido de carbono (CO_2), o ozônio (O_3), o metano (CH_4), o óxido de nitrogênio (N_2O) e o vapor d'água (H_2O), produtos oriundos da utilização de energia. Essas alterações ambientais consistem de um dos maiores problemas enfrentados pela humanidade, uma vez que poderão proporcionar efeitos com graves conseqüências, como a alteração do nível do mar e do regime das chuvas, enfim, modificando profundamente o clima da Terra. Dentre os gases citados, o dióxido de carbono é considerado o principal responsável por esta tendência de aquecimento do clima mundial, uma vez que representa quantitativamente a maior parte das emissões, e pequenas modificações em sua concentração são capazes de produzir intensas flutuações na temperatura do globo (DREW, 1989). Esses gases atuam absorvendo parte da energia térmica desprendida pela superfície terrestre e voltando a irradiá-la, energia esta que assim retorna, em parte, à Terra (FELLENBERG, 1980). Esse fenômeno é conhecido como "efeito estufa".

É neste contexto que a utilização de recursos renováveis surge como uma alternativa viável e necessária, possibilitando a melhoria da qualidade de vida, o que significa a redução da emissão de poluentes, a busca de um desenvolvimento sustentável e a ampliação do acesso à energia, influenciando na inserção econômica e social das populações excluídas. O Brasil apresenta baixa taxa de emissão de CO₂ – 1,7 tCO₂/tep - pela utilização de combustíveis³, quando comparada com a média mundial, de 2,36 tCO₂/tep. A inserção de novas fontes renováveis na matriz energética brasileira poderá reduzir a emissão de milhões de toneladas de gás carbônico/ano, ampliando as possibilidades de negócios de Certificação de Redução de Emissão de Carbono, nos termos do Protocolo de Kyoto (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2004).

Outro fator deve ser levado em consideração quando se trata da determinação da fonte de energia a ser utilizada, o fator econômico. Existem hoje, inúmeros fornos e caldeiras funcionando com óleo combustível, o qual atingiu tal preço, que se tornou vantajosa a adaptação desses equipamentos para a utilização de combustíveis alternativos, tais como a lenha e seus derivados. Entretanto, estima-se que a utilização de combustíveis sólidos possa proporcionar perda de potência nas fornalhas, tornando necessário fazer algumas adaptações para manter a produção de calor demandada pelo processo. A perda ocorre devido à necessidade de permanência da partícula sólida por um maior período no interior da fornalha, para que a sua combustão seja completada, além da elevada umidade do material, uma vez que a água presente sofrerá evaporação. Esses fatores ocasionam baixas taxas de liberação de calor. É neste âmbito que os estudos de tecnologias que proporcionem a redução e uniformidade das dimensões da madeira a ser utilizada como combustível, além da eliminação do excesso de umidade, poderão proporcionar uma minimização na perda de potência nas unidades de geração de energia térmica, possibilitando ainda, maior controle sobre o processo de produção. Mesmo levando em consideração os custos com a transformação da matéria-prima, essa alternativa pode tornar-se ainda mais econômica que a utilização de óleo combustível. Aliado ao aspecto econômico, o produto a ser obtido incorpora a vantagem de ser uma tecnologia aplicável no Brasil, país tropical com grande vocação para produção de biomassa, além do fato de que o acesso à produção, independe de reservas e de fatores políticos e econômicos internacionais, como ocorre com o petróleo e seus derivados.

³ As taxas de emissão são normalmente dadas por *tep* – tonelada equivalente de petróleo – que é calculada através de fatores de conversão pela relação entre o poder calorífico de cada fonte e o poder calorífico do petróleo adotado como referência. Para cada tonelada equivalente de petróleo queimada no Brasil, ocorre uma maior proporção de combustíveis considerados renováveis (lenha, etanol) do que nos demais países.

No que concerne ao aspecto ambiental, além de ser uma fonte de energia renovável, o produto pode ser obtido através da reciclagem de resíduos de madeira, tais como o material proveniente de podas de árvores, galhadas, estrados, restos de embalagens, sobras da indústria da construção civil, além dos resíduos florestais descartados nos grandes maciços.

1.3 Justificativas

Os trabalhos de desenvolvimento de técnicas de reciclagem de resíduos têm sido suficientemente justificados por proporcionarem condições de reintrodução dos materiais nos processos produtivos. Entretanto, a opção pelo desenvolvimento de um combustível alternativo exige, de forma a viabilizar o processo, uma especial atenção às implicações ambientais decorrentes das emissões atmosféricas e resíduos gerados na queima.

Os estudos da viabilidade técnica e ambiental irão constituir-se da base de dados necessária para a aplicação das técnicas propostas de reciclagem dos resíduos de madeira, proporcionando a otimização dos processos de combustão com o uso de um recurso renovável, o qual, seguramente, tem sido a fonte primária de energia em que se encontram depositadas as maiores chances de redução do consumo de combustíveis fósseis.

Cabe salientar que os resíduos provenientes da combustão da madeira e seus derivados, tais como cinzas e fuligem, constituem-se de materiais com características adequadas para disposição em solos de utilização agrícola, sem maiores restrições quanto às concentrações de contaminantes presentes. Em contrapartida, existem trabalhos técnicos alertando para os riscos dos resíduos gerados (cinzas, fuligem) pela queima dos combustíveis fósseis, por possuírem níveis de concentração de contaminantes tóxicos que podem exigir cuidados especiais para sua disposição final (PROBSTEIN e HICKS, 1985). Entretanto, cuidados especiais também deverão ser tomados quanto à utilização de resíduos de madeira contaminados com aditivos orgânicos, tanto em relação às emissões de substâncias tóxicas (dioxinas e furanos), como em relação aos resíduos sólidos provenientes da queima.

O presente trabalho busca o aproveitamento de uma fonte energética alternativa, reunindo técnicas de reciclagem, otimização dos processos de combustão e minimização dos níveis de emissão de poluentes, visando contribuir, dessa forma, para a adoção de processos produtivos mais equilibrados, no atendimento aos requisitos de geração de energia térmica.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Estudar a viabilidade técnica e ambiental da utilização de resíduos de madeira para a produção de um combustível alternativo.

2.2 Objetivos específicos

Avaliar a variação do poder calorífico de resíduos de madeira submetidos ao processo de fragmentação mecânica e tratamento térmico em diversas temperaturas;

Avaliar os níveis de emissões de partículas no fluxo gasoso proveniente da combustão dos resíduos de madeira em seu estado natural e após tratamento mecânico e térmico, em fontes estacionárias, através de campanhas de amostragens isocinéticas e análises laboratoriais;

Avaliar a possibilidade da utilização do combustível alternativo, com atendimento aos padrões legais de emissão de poluentes, sem a adoção de dispositivos de tratamento de gases.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Características dos resíduos de madeira e fontes potenciais de geração

ROCCA et al. (1993) apresentam a reciclagem, através do reuso ou recuperação de resíduos ou de seus contribuintes com algum valor econômico, como a forma mais atraente de solução dos problemas de gerenciamento de resíduos, tanto do ponto de vista empresarial, como dos órgãos do poder público ligados à proteção e defesa do meio ambiente.

O adequado transporte, tratamento e disposição final de resíduos apresentam, via de regra, um custo que pode ser considerado elevado para a sociedade. Do ponto de vista dos órgãos de proteção do meio ambiente, essa prática pode ser acatada com grande conveniência, pois diminui a quantidade de resíduos lançados no meio ambiente, além de contribuir para a conservação dos recursos naturais, minimizando ainda a utilização dos recursos naturais não renováveis. Sob o enfoque da iniciativa privada, o reaproveitamento dos resíduos que seriam descartados poderá transformar-se em receita adicional ou mesmo em economia na aquisição de novos insumos. Em termos práticos, alguns fatores são relacionados por ROCCA et al. (1993) para viabilização da recuperação de um resíduo:

- proximidade da instalação de reprocessamento;
- custos de transporte dos resíduos;
- volume dos resíduos disponíveis para reprocessamento;
- custos de estocagem do resíduo no ponto de geração ou fora do local de origem.

Dessa forma, só haverá viabilidade econômica na recuperação de um material se seu valor de mercado atingir um preço superior aos custos relativos ao transporte, estocagem e reprocessamento. Dentro dessa linha, SHREVE e BRINK JR (1977) apontam os aumentos dos preços da energia, do transporte, além da diminuição das áreas disponíveis para disposição de rejeitos, como os fatores de maior incentivo ao aproveitamento da energia contida nos resíduos sólidos através da sua utilização em sistemas de combustão.

Para incentivar as atividades de reciclagem, têm sido criados em muitos países, inclusive no Brasil, sistemas de troca de informações através de publicações denominadas "Bolsas de Resíduos". Os interessados em disponibilizar resíduos anunciam na publicação, indicando volumes, características físico-químicas e quantidades dos resíduos. Os interessados na aquisição entram em contato com a "Bolsa de Resíduos" ou diretamente com o anunciante para acertar os aspectos econômicos e operacionais da transação. No Brasil, as iniciativas, até então, têm sido consideradas ineficientes, seja por desconhecimento, desconfiança por parte do empresariado, ou mesmo por algum tipo de receio em anunciar os resíduos gerados pelos processos de produção. De qualquer forma, um dos maiores problemas relacionados a qualquer "Bolsa de Resíduos" tem sido a dificuldade de se controlar a "qualidade" dos materiais anunciados, de modo a atender aos padrões requeridos para os processamentos. Por serem gerados em processos que apresentam variações, quase todos apresentam composições e características diferentes, dificultando a sua utilização direta como matéria-prima (ROCCA et al., 1993). Em relação aos resíduos de madeira, a variabilidade da composição e as influências sobre as suas características proporcionam o mesmo tipo de problema.

A madeira se constitui de uma substância complexa, de caráter polimérico. De 40 a 50% do peso da madeira seca são de celulose. As paredes das células são constituídas por polissacarídeos, a hemicelulose e a lignina. A hemicelulose é uma mistura de polímeros de cadeia curta da arabinose, da galactose, da glicose, da manose e da xilose (como anidridos). A lignina é um polímero complexo de fenóis substituídos, que atuam como ligantes das fibras de celulose. Estão presentes em pequenas quantidades diversos materiais extraíveis (SHREVE e BRINK JR., 1977).

VIVACQUA FILHO et al. (1982) pesquisaram as variações da composição elementar da madeira, segundo referências de diversos autores. As variações verificadas na composição química elementar não foram consideradas conflitantes, de acordo com os valores apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Composição elementar da madeira

Composição química	Referência dos autores					
	Goldstein	Charles	Kanury e Blackshear	Klar	Jones	
					*	**
Carbono	50,0	48,5-50,5	50,0	40,0	40,0	50,0
Oxigênio	44,0	43,0-45,0	43,5	34,2	34,0	42,5
Hidrogênio	6,0	6,0-7,0	6,0	4,8	4,8	6,0
Nitrogênio e cinzas	<1,0	-	-	-	-	-
Nitrogênio	-	-	0,1	-	0,4	0,5
Cinzas	-	-	0,4	1,0	0,8	1,0
Água	-	-	-	20,0	20,0	-

(*) Base úmida

(**) Base seca

Fonte - VIVACQUA FILHO et al., 1982. p. 61.

Em função das variações ocasionadas pela diversidade de espécies vegetais, idade das plantas, tipos de terreno e clima, os valores médios obtidos foram considerados representativos pelos autores, para fins práticos.

Os átomos de carbono, oxigênio e hidrogênio ordenam-se de diferentes formas, montando os três principais polímeros que compõem a madeira, dando origem à formação da celulose, hemicelulose e lignina. Ocorre dessa forma, o armazenamento da energia solar na biomassa, através dos processos fotossintéticos desenvolvidos pelos vegetais. A proporção dos principais componentes da madeira, segundo autores diversos, é apresentada na Tabela 3.2:

Tabela 3.2 - Proporção dos diversos componentes da madeira segundo diversos autores

Composição química	Referência dos autores					Média
	Goldstein	Charles	Kanury e Blackshear	Jones		
				*	**	
Celulose	50,0	30,0-63,0	40,0	40,0-44,0	43,0-47,0	44,7
Hemicelulose	25,0	20,0-30,0	40,0	25,0-29,0	25,0-35,0	29,4
Lignina	25,0	20,0-30,0	20,0	25,0-31,0	16,0-24,0	23,6
Extrativos	-	-	-	1,0-5,0	2,0-8,0	4,0

(*) Madeira macia

(**) Madeira dura

Fonte - VIVACQUA FILHO et al., 1982. p. 62.

Como fonte de caráter renovável, o potencial da madeira é elevado, mas o desperdício é verificado em grande proporção. Segundo SHREVE e BRINK JR (1977), os resíduos da floresta explorada chegam a 30% do material aproveitado para as indústrias de polpa e papel. "Sucata Verde" é a denominação aplicada por esses pesquisadores aos restos de árvores das áreas exploradas, os quais indicam uma tendência ao aumento da competitividade das atividades de aproveitamento desses materiais, em virtude das constantes elevações de preço dos derivados de petróleo.

Enquanto nos maciços florestais implantados com a finalidade de suprimento de carvão vegetal para o segmento metalúrgico boa parte dos resíduos florestais são normalmente utilizados na produção de carvão, outras atividades nem sempre conseguem o mesmo nível de aproveitamento. A produção de celulose e papel, as indústrias moveleiras ou de painéis de madeira conseguem aproveitar apenas o fuste principal das árvores em seus processos, tratando todo o resto como resíduo. POGGIANI (1981) ressalta em seus estudos o impasse entre realizar a deposição dos resíduos florestais no solo, reciclando nutrientes e matéria orgânica para a própria cultura, e a exportação desses resíduos para fora dos maciços. Considerando que as galhadas precisariam ser recolhidas na área, picadas e transportadas, as vantagens do aproveitamento desses resíduos para geração de energia encontram-se estreitamente ligadas à quantidade dos resíduos gerados, facilidade de transporte e aproveitamento industrial, cabendo uma análise criteriosa para cada situação específica.

Levando em consideração a decomposição dos resíduos florestais no maciço, pela ação dos agentes biológicos, pode-se considerar a geração do metano como um fator relevante, em relação ao balanço das emissões dos principais gases responsáveis pelo "efeito estufa".

Estudos conduzidos por LEVANDER (1990) sobre as contribuições relativas dos diversos gases sobre o efeito estufa indicam que cada mol de metano (CH₄) pode absorver 25 vezes mais radiação de calor que cada mol de dióxido de carbono (CO₂). A Tabela 3.3 apresenta a razão da relação entre a absorção da radiação de calor dos principais gases responsáveis pelo efeito estufa e o dióxido de carbono (CO₂).

Tabela 3.3 – Potencial de aquecimento global entre os principais gases responsáveis pelo efeito estufa e o dióxido de carbono (CO₂)

Gases	Razão da absorção da radiação de calor em relação ao dióxido de carbono	
	Por mol	Por kg
Dióxido de carbono	1	1
Metano	25	70
Óxidos de nitrogênio	200	200
Ozônio	2.000	1.800
CFC – 11	16.000	5.000
CFC – 12	20.000	7.000
HCFC - 22	7.000	3.500

Fonte - LEVANDER, 1990. p. 2.708.

Duas culturas de eucalipto de diferentes espécies e idades são comparadas em um experimento conduzido por POGGIANI (1981), em que pode ser observada a relação entre a fitomassa total e a fitomassa do fuste. Pode-se observar que em torno de 15% da fitomassa total gerada pelas duas culturas não faz parte do fuste das árvores, podendo ser considerada como resíduo florestal, como mostra a Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Produção de fitomassa em duas culturas de eucalipto

Espécie	Idade	Espaçamento	Fitomassa total (kg/ha)	Fitomassa do fuste (kg/ha)	Resíduo florestal (%)
E. saligna	8 anos	3 m x 2 m	106.250	89.970	15,32
E. grandis	2,5 anos	1 m x 1,5 m	85.714	72.311	15,64

Fonte - Adaptado de POGGIANI, 1981. p. 29.

Em grandes centros urbanos ou áreas industrializadas, outras fontes de resíduos podem gerar quantidades significativas de madeira, para a avaliação da possibilidade de aproveitamento desses materiais. As grandes cidades, urbanizadas com espécies florestais nativas e exóticas, administram a interferência do crescimento das árvores com a limitação de espaço, tanto para o crescimento da copa e do fuste principal, como das raízes. O suprimento de energia elétrica, telefonia, cabos de TV, são levados até pontos de conexão através de postes, na maioria das

cidades brasileiras, exigindo podas constantes nas copas das espécies vegetais utilizadas nos planos de urbanismo. Por outro lado, as raízes, em busca de água e nutrientes no subsolo, interferem constantemente nas tubulações destinadas ao suprimento de água potável, esgotamento sanitário e escoamento de águas pluviais. Essa constante divisão do espaço entre as redes de serviços urbanos e a arborização, ambos essenciais à manutenção da qualidade de vida da população nas cidades, leva diariamente uma quantidade significativa desses materiais obtidos nas operações de poda às células de aterramento.

O material proveniente das podas urbanas que chega diariamente ao aterro sanitário do município de Belo Horizonte é encaminhado, após pesagem, à central de compostagem. No local são separados os "materiais verdes" e galhos finos, para serem triturados e incorporados às pilhas de produção de composto orgânico. Os materiais lenhosos, via de regra com alto teor de umidade (acima de 30%), são separados para utilização como lenha ou seguem para as frentes de aterramento (Figura 3.1). A desuniformidade dimensional das peças, os elementos estranhos ao material (pregos, arames, faixas de tecidos, plásticos, fios), o alto teor de umidade e a grande variação na taxa de geração são dificuldades enfrentadas para se agregar valor econômico ao material e despertar interesse no mercado consumidor.



Figura 3.1 – Resíduos de poda de árvores

A indústria de construção civil, em função da grande utilização de madeira nas técnicas construtivas, constitui-se em outra fonte alternativa de geração desses materiais (Figura 3.2). O SINDUSCON (Sindicato da Indústria da Construção Civil) estima que mais de um terço da madeira utilizada nas obras transforma-se em resíduo, ao final dos trabalhos. A

desuniformidade das peças, a variação na taxa de geração e a presença de elementos metálicos são os maiores entraves ao aproveitamento desses materiais para geração de energia, o que torna mais viável, na maioria das vezes, o descarte.



Figura 3.2 – Resíduos de construção civil

Outras fontes viáveis a serem consideradas são as indústrias de transformação. Não só as unidades industriais associadas ao segmento da madeira, mas a maioria das indústrias, possuem em seus inventários de resíduos um controle da taxa de geração dos resíduos de madeira. Embalagens de equipamentos, descartes de peças, estrados, são armazenados transitoriamente nos depósitos dessas unidades, para posterior descarte.

Em se tratando da possibilidade da utilização de resíduos como combustíveis em substituição aos derivados de petróleo, a propriedade de maior importância consiste no poder calorífico desses produtos. Define-se o poder calorífico de um combustível como a quantidade de calor liberado na combustão completa de uma unidade de massa do combustível, podendo ser expresso em kcal/kg ou cal/g para combustíveis sólidos e líquidos e em kcal/m³ para combustíveis gasosos. O poder calorífico pode ser determinado teoricamente através da composição química ou experimentalmente em bomba calorimétrica. (VIVACQUA FILHO et al., 1982)

LEME (1984), estudando a composição física do lixo de diversas comunidades, inclui a madeira como um componente que varia dentro de uma faixa de 1 a 4% na composição do lixo, apresentando 2% como uma ocorrência típica, com o material se apresentando com

umidade entre 15 e 40% (média típica de 20%), massa específica entre 128,1 kg/m³ e 320,4 kg/m³ (média típica de 240,3 kg/m³) e composição elementar de 49,5% de carbono, 6,0% de hidrogênio, 42,7% de oxigênio, 0,2% de nitrogênio e 0,1% de enxofre, com 1,5% de cinzas.

MENDES et al (1982) apresentam uma equação para cálculo do poder calorífico, a partir da composição elementar:

$$PCI = \frac{\%C}{100} \times 8.100 + \frac{34.000}{100} \left(\%H - \frac{\%O}{8} \right) \quad (3.1)$$

Em que:

PCI = poder calorífico, em kcal/kg;

%C = percentual de carbono, em peso seco;

%H = percentual de hidrogênio, em peso seco;

%O = percentual de oxigênio, em peso seco;

Como 1 BTU = 0,252 kcal e 1 libra = 0,4536 kg, obtém-se que 1 BTU/Lb = 0,5556 kcal/kg.

Assim sendo, a equação modificada pode ser escrita como:

$$PCI = \frac{\%C}{100} \times 14.580 + \frac{61.200}{100} \left(\%H - \frac{\%O}{8} \right) \quad (3.2)$$

Em que:

PCI = poder calorífico, em BTU/libra.

%C, % H e %O são os percentuais dos elementos contidos no material, em peso seco.

O conhecimento do grau de umidade faz-se necessário para a avaliação do poder calorífico e tem grande importância para a determinação da potência liberada pela sua combustão. O grau de umidade, em percentagem, é expresso pela massa de água por unidade de massa do material seco ou úmido, podendo ser calculado pela equação (LEME, 1984):

$$P_u = \left[\left(\frac{a - b}{a} \right) \right] \times 100 \% \quad (3.3)$$

Em que:

P_u = Percentual de umidade, em %;

a = massa inicial do material, quando amostrada;

b = massa do material após secagem.

3.2 Influência das reações de pirólise e carbonização no poder calorífico da madeira e seus derivados

Designa-se combustão, o fenômeno da oxidação de um corpo realizado em um tempo breve, determinando uma combinação química de caráter exotérmico (TORREIRA, 1995).

Estudos desenvolvidos por MITRE (1982) e DINIZ (1981) relatam o processo de combustão da lenha como ocorrendo em três estágios ou zonas definidos por faixas de aquecimento, a saber:

- zona de secagem ou evaporação de água contida no material, o que ocorre de fora para dentro e requer certo tempo, sendo maior o tempo em pedaços maiores;
- zona de destilação e queima dos voláteis contidos no material, com a ocorrência de chama longa;
- zona de queima do carbono fixo, o que ocorre em temperaturas da ordem de 400 °C a 550 °C com a extinção da chama em temperaturas inferiores.

Observando um pedaço de madeira úmida sendo introduzido numa fornalha em chamas, no entanto, verifica-se a ocorrência dos três estágios simultaneamente, uma vez que há interferência do vapor d'água que se desprende do primeiro estágio com a destilação ocorrida no segundo e assim sucessivamente, durante a alimentação de combustível. As flutuações de carga e de liberação de energia ocorrerão tanto quanto maiores forem as dimensões das toras de madeira introduzidas na fornalha, assim como quanto maior for a umidade do material. Pode ser justificada dessa forma, a pretensão da utilização de um combustível sólido dividido

em partes menores, que poderão proporcionar uma maior superfície de contato com o ar, possibilitando um menor excesso de ar na queima, menores flutuações nas taxas de transmissão de energia térmica para a fornalha, tornando o processo de combustão mais uniforme e eficiente (DINIZ, 1981).

Quanto à eliminação da umidade antecedendo à combustão, dois fatores de eficiência encontram-se relacionados:

- o rendimento térmico, definido como o percentual do calor absorvido pela fornalha em relação ao calor gerado pelo processo de combustão;
- a relação entre o poder calorífico da lenha e o percentual de umidade contido.

As Tabelas 3.5 e 3.6 ilustram claramente as vantagens da eliminação da umidade.

Tabela 3.5 – Percentual do calor absorvido na fornalha em relação ao calor desenvolvido na combustão (rendimento térmico percentual)

Temperatura (°C) dos gases na chaminé	%Umidade da Lenha								
	0	10	20	30	40	50	60	70	80
200	81,4	80,0	78,1	75,8	72,7	68,4	61,9	51,1	29,4
225	80,2	78,7	76,9	74,5	71,4	67,0	60,4	49,3	27,3
250	79,0	77,5	75,7	73,3	70,0	65,6	58,8	47,6	25,2
275	77,8	76,3	74,4	72,0	68,7	64,1	57,3	45,9	23,0
300	76,6	75,1	73,2	70,7	67,4	62,7	55,7	44,1	20,9
325	75,5	73,9	71,9	69,4	66,0	61,3	54,2	42,4	18,8
350	74,3	72,7	70,7	68,1	64,7	59,9	52,7	40,7	16,7

* Cálculos com PCS

Fonte - DINIZ, 1981. p. 120.

Tabela 3.6 – Poder calorífico superior - PCS e inferior - PCI da lenha em função da umidade

Poder calorífico	%Umidade da Lenha								
	0	10	20	30	40	50	60	70	80
PCS (kcal/kg)	5083	4575	4067	3558	3050	2542	2033	1525	1017
PCI (kcal/kg)	4756	4221	3687	3153	2619	2085	1551	1016	482

Fonte - DINIZ, 1981. p. 117.

As tabelas apresentadas demonstram os ganhos significativos no rendimento térmico e poder calorífico com a eliminação da umidade. Contudo, mesmo após a zona de secagem, ainda há uma fase de aquecimento do material em que a energia consumida é maior do que a energia liberada (fase endotérmica), precedendo a carbonização do material.

Alguns fatores que influenciam o processo de secagem da madeira foram descritos por GALVÃO e JANKOWSKY (1985):

- a difusão da água higroscópica ocorre através das paredes celulares, em consequência do gradiente de umidade;
- a rapidez ou facilidade de secagem (coeficiente de difusão da água higroscópica), varia diretamente com a temperatura e umidade, inversamente com a densidade e depende da direção estrutural na madeira;
- durante o aquecimento da peça, o vapor d'água move-se na madeira, pelo interior das cavidades das células e aberturas que as ligam, através do fenômeno de difusão que ocorre em consequência da formação de um "gradiente de pressão de vapor".

De acordo com SIAU (1971), citado por GALVÃO e JANKOWSKY (1985), outro fator que influencia na facilidade de a água higroscópica difundir-se na madeira é a direção estrutural considerada. O coeficiente de difusão longitudinal é em média, de duas a quatro vezes maior que o transversal à umidade de 25% e de cem vezes maior à umidade de 5%. Os autores concluem que a movimentação da água do interior para a superfície depende da temperatura de secagem, permeabilidade, densidade da madeira, espessura das peças e gradientes de umidade. Durante o processo de secagem, há uma fase em que a quantidade de água transferida para a superfície é menor que a água que se evapora na superfície. Nessas condições, o teor de umidade superficial diminui para valores inferiores à umidade de saturação do ar. Da primeira Lei de Fick pode-se inferir que o fluxo de umidade na madeira é proporcional ao gradiente de umidade:

$$\frac{m}{tA} = K \cdot \frac{\Delta u}{e} \quad (3.4)$$

Em que (m) é a massa de água movimentando-se através da peça de madeira com espessura (e), em tempo (t), através de uma área (A) perpendicular à direção do fluxo considerado; (K) é o coeficiente de difusão; (Δu) é a diferença do teor de umidade entre as duas superfícies consideradas na peça.

Almeida e Rezende (1982) definem a secagem como a evaporação da água contida na madeira sob diversas formas:

- água higroscópica, contida no interior das fibras, evaporada até a temperatura de 110 °C;
- água absorvida pelas paredes das células, evaporada à faixa de temperatura compreendida entre 110 °C e 150 °C;
- água quimicamente ligada, evaporada à faixa de temperatura compreendida entre 150 °C e 200 °C.

Acima de 150 °C, entretanto, já se iniciaram as reações de degradação térmica de alguns constituintes da madeira, como a lignina, dando seguimento ao processo conhecido como pirólise.

Diversos autores definem pirólise, tais como em BARROS (1996), PROBSTEIN e HICKS (1985), ALMEIDA e REZENDE (1982), como sendo o processo de decomposição térmica em que a matéria orgânica é convertida em diversos subprodutos, sob atmosfera redutora. Como a atmosfera é redutora, com a ausência de oxigênio livre, o processo tende a aumentar a concentração de carbono, sendo denominado carbonização (ALMEIDA e REZENDE, 1982).

A origem da utilização do processo de carbonização da madeira pode ser traçada desde a mais remota antiguidade. O primeiro processo químico foi provavelmente a fabricação do carvão de madeira, usado pelos habitantes das cavernas como combustível sem fumaça. No antigo Egito, conhecia-se um processo de destilação da madeira, da qual se obtinha não apenas o carvão, mas também o alcatrão e o ácido pirolenhoso, sendo este usado nos embalsamentos (SHREVE e BRINK JR., 1977).

Conforme os estudos desenvolvidos por VIVACQUA FILHO et al. (1982), o comportamento da madeira diante do processo de carbonização pode ser representado pelo somatório dos comportamentos isolados dos seus três principais componentes, que são a celulose, a

hemicelulose e a lignina. Embora tenha sido detectada uma pequena interação quando estes componentes estão juntos, os efeitos frequentemente podem ser considerados quase desprezíveis e o estudo de cada um separadamente representa uma boa aproximação do fenômeno como um todo. Cada um desses componentes participa de formas diferentes, gerando diferentes produtos, devido à natureza de sua composição química.

O trabalho de enumerar todos os produtos obtidos da decomposição térmica da madeira seria bastante extenso. BEAL e EICKMER (1977), citados por VIVACQUA FILHO et al. (1982), informam, em suas pesquisas, que já foram identificados 213 compostos produzidos durante a carbonização da madeira.

As reações envolvendo liberação ou absorção de energia e perda de massa são bastante distintas, caracterizando cada um dos principais componentes da madeira, fornecendo-lhes uma identidade peculiar. A perda de massa experimentada pela madeira e seus componentes isoladamente, quando submetida a um aquecimento contínuo e controlado, consiste de uma técnica denominada termogravimetria, de grande importância para se identificar as etapas que ocorrem durante a carbonização. O resultado obtido é apresentado em um gráfico, onde é mostrada a evolução da perda de massa sofrida pelo material em função da temperatura de aquecimento (Figura 3.3).

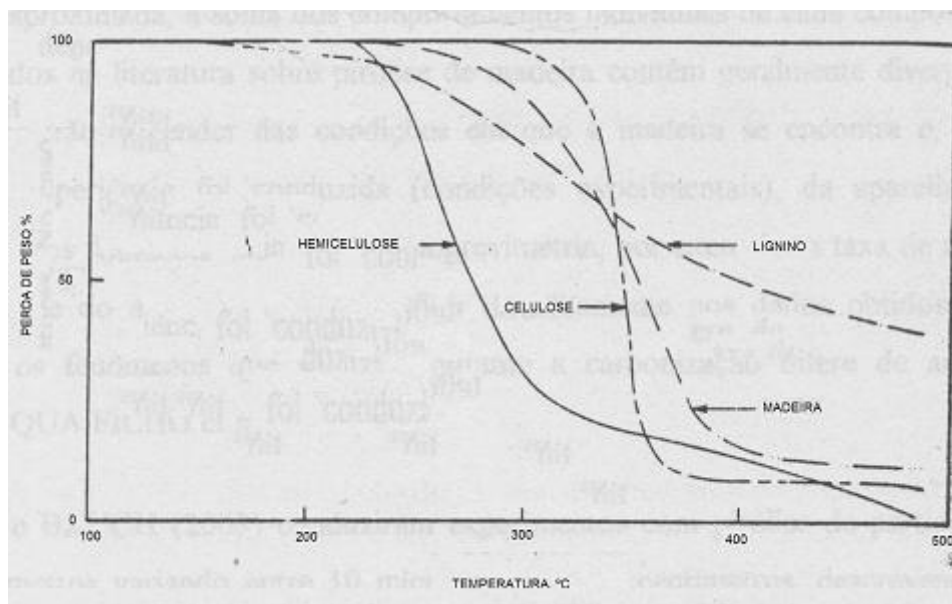


Figura 3.3 - Análise termogravimétrica da madeira e de seus componentes

Fonte – VIVACQUA FILHO (1982). p.64.

A degradação da celulose se processa rapidamente num curto intervalo de temperatura – cerca de 50 °C – provocando drásticas mudanças de comportamento e perdendo 77% da sua massa.

A hemicelulose começa a perder massa em temperatura próxima dos 225 °C, sendo o componente menos resistente ao tratamento térmico, pois sua degradação é quase completa na temperatura de 325 °C, perdendo massa continuamente sob ação do calor.

A lignina é o composto mais importante quando se objetiva a produção de carvão vegetal, pois o rendimento gravimétrico do processo de carbonização está diretamente relacionado com o conteúdo de lignina na madeira. Embora a lignina comece a ser degradada em temperatura mais baixa, por volta de 150 °C, observa-se, ao contrário do comportamento da celulose e da hemicelulose, que a sua degradação é mais lenta. A lignina continua a perder massa, mesmo a temperaturas superiores a 500 °C, gerando um resíduo carbonoso. A perda de massa final experimentada pela lignina é bem menor do que os outros dois componentes principais da madeira.

A curva termogravimétrica da madeira, também representada na Figura 3.3, reflete, de maneira aproximada, a soma dos comportamentos individuais de cada componente. Os dados encontrados na literatura sobre pirólise de madeira contêm geralmente divergências, pois os resultados irão depender das condições em que a madeira se encontra e, principalmente, como a experiência foi conduzida (condições experimentais), da aparelhagem utilizada, dentre outros fatores. No caso de termogravimetria, por exemplo, a taxa de aquecimento e a sensibilidade do aparelho poderão influir decisivamente nos dados obtidos. A maneira de agrupar os fenômenos que ocorrem durante a carbonização difere de autor para autor (VIVACQUA FILHO et al., 1982).

PETER e BRUCH (2003) conduziram experimentos com pirólise de partículas de madeira com diâmetros variando entre 10 µm e 10 cm, descrevendo as faixas de temperatura de degradação da celulose entre 200 °C e 400 °C, da hemicelulose entre 200 °C e 260 °C e da lignina entre 280 °C e 500 °C.

Em todos os autores pesquisados, no entanto, há um consenso em que a lignina é o composto com a faixa mais ampla de temperatura no processo de degradação.

VIVACQUA FILHO et al. (1982), pesquisando BEALL e EICKMER (1977), adotaram uma classificação para os fenômenos decorrentes da pirólise em quatro regiões distintas:

zona A: compreendida até 200 °C. Esta é caracterizada pela produção de gases não combustíveis, tais como o vapor d'água e dióxido de carbono (CO₂). São produzidos também ácido fórmico e ácido acético;

zona B: compreendida na região de temperatura entre 200 °C e 280 °C. Nessa etapa são produzidos os mesmos gases da zona A, com uma substancial diminuição dos vapores de água e o aparecimento do monóxido de carbono (CO). As reações que ocorrem nesta zona são de natureza endotérmica;

zona C: de 280 °C a 500 °C. Ocorre a carbonização através de reações exotérmicas. As temperaturas em que as reações exotérmicas ocorrem não são identificadas com precisão, tendo sido objeto de estudos e discussões. Os produtos obtidos nessa etapa estão sujeitos a reações secundárias, são combustíveis e incluem o alcatrão, o licor pirolenhoso, monóxido de carbono (CO) e metano (CH₄).

zona D: acima de 500 °C. Nesta região existe o carvão já formado. Várias reações secundárias ocorrem, catalisadas pelo leito de carvão.

DOAT e PETROFF (1975), citados por ALMEIDA e REZENDE (1982), demonstram esquematicamente a evolução dos produtos da carbonização da madeira em relação à temperatura, conforme a Tabela 3.7:

Tabela 3.7 – Evolução da carbonização da madeira em função do aumento das temperaturas

	Fases da Carbonização						
	Secagem da Água	Produção de Gases Oxigenados	Índice da produção de hidrocarbonetos	Fase dos hidrocarbonetos	Dissociação	Fase do hidrogênio	
Temperatura (°C)	150-200	200-280	280-380	380-500	500-700	700-900	
Teor de carbono % em peso	60	68	78	84	89	91	
Gases não condensáveis (%)	CO ₂	68,0	66,5	35,5	31,5	12,2	0,5
	CO	30,0	30,0	20,5	12,3	24,6	9,7
	H ₂	0,0	0,2	6,5	7,5	42,7	80,9
Hidrocarbonetos	2,0	3,3	37,5	48,7	20,5	8,9	
Poder calorífico do gás (kcal/Nm ³)	1.100	1.210	3.920	4.780	3.630	3.160	
Constituintes condensáveis dos voláteis	Vapor d'água	Vapor d'água + Ácido acético	Ácido acético + metanol + alcatrão leve	Alcatrão pesado	Alcatrão	-	
Quantidade de voláteis	Muito pequena	Pequena	Importante	Importante	Pequena	Muito pequena	

Fonte – DOAT E PETROFF (1975), citados por ALMEIDA e REZENDE, 1982. p. 144.

Alguns aspectos térmicos da carbonização são descritos por VIVACQUA FILHO et al. (1982), tais como a influência da temperatura, da taxa de aquecimento e da pressão. O controle desses fatores exerce influência não só no rendimento do processo, como também nas propriedades físicas e químicas do produto a ser obtido. A Tabela 3.8 apresenta a variação do teor de carbono fixo no produto obtido em relação à temperatura de carbonização.

Tabela 3.8 – Variação da composição elementar e rendimento do processo de carbonização em função da temperatura

Temperatura de carbonização (°C)	Composição elementar			Rendimento (%)
	C	H	O	
200	52,3	6,3	41,4	91
300	73,2	4,9	21,9	51
400	82,7	3,8	13,5	37
500	89,6	3,1	6,7	33
600	92,6	2,6	5,2	31
800	95,8	1,0	3,3	26
1.000	96,6	0,5	2,9	26

Fonte - WENZEL, 1970⁴, citado por MENDES et al., 1982. p. 84.

⁴ WENZEL, H. F. J. *Chemical technology of wood*, New York: Academic Press, 1970. 692 p.

O controle da pressão no sistema consiste em outro importante fator de influência no processo de carbonização. A Tabela 3.9 apresenta os resultados obtidos em um experimento de carbonização, em que se verifica o rendimento percentual em massa de um processo à pressão atmosférica e outro realizado em um recipiente hermeticamente selado, sob pressão.

Tabela 3.9 – Rendimento percentual em massa de processos de carbonização

Temperatura de carbonização (°C)	Rendimento percentual em massa, base seca (%)	
	Carbonização em recipiente sem pressão	Carbonização sob pressão, em recipiente hermeticamente selado
160	98,0	97,4
180	88,59	93,0
200	77,10	87,7
220	67,50	86,4
240	50,79	83,0
260	40,22	82,5
280	36,16	83,8
300	31,77	78,7
320	29,66	79,1

Fonte - VIOLETTE, 1951, citado por VIVACQUA FILHO et al., 1982. p. 72.

Os mesmos autores obtiveram rendimentos crescentes na produção de alcatrão, à medida que a temperatura aumentava, quando o sistema era operado a uma pressão inferior à pressão atmosférica.

O poder calorífico pode ser determinado experimentalmente pelo método ASTM D-240 (ABNT- MB 454), mediante queima da amostra em calorímetro, sob condições controladas. O calor da combustão é determinado com o auxílio das temperaturas observadas antes, durante e após a combustão, com as compensações devidas pela termoquímica e as correções referentes à transferência de calor. O poder calorífico superior corresponde ao calor liberado pela combustão da unidade de massa do combustível a um volume constante (volume da bomba), estando a água formada pela combustão no estado líquido. O poder calorífico inferior corresponde ao calor liberado pela combustão de uma unidade de massa do combustível, na pressão constante de 1 atmosfera, permanecendo a água formada na combustão no estado gasoso (TORREIRA, 1995).

A Tabela 3.10 indica o poder calorífico inferior (PCI) de alguns produtos utilizados como combustíveis.

Tabela 3.10 – Poder calorífico inferior de produtos utilizados como combustíveis sólidos

Combustível	PCI (kcal/kg)	Combustível	PCI (kcal/kg)
Aparas de vinilo	6.300	Pó de tabaco	2.300
Bagaço de cana (20% água)	3.200	Casca de amêndoa dendê	4.800
Bagaço de cana (50% água)	1.800	Casca de babaçu	4.000
Bambu (10% água)	3.700	Semente de girassol (9,5% água)	4.300
Carvão de bambu	7.000	Casca de caju	4.700
Carvão Mineral Tubarão/SC	4.500	Sisal (11% água)	3.400
Carvão vegetal	7.500	Palha de amendoim (12% água)	3.100
Casca de algodão	3.000	Palha de trigo (20% água)	3.200
Casca de arroz (12% água)	3.300	Trapos de pano	4.200
Casca de cacau	3.900	Papel	4.200
Casca de café	3.800	Piche alcatrão	8.600
Casca de côco	4.000	Pó de linho	4.000
Fibras de palmeira (48% água)	2.000	Recortes de couro (14% água)	4.400
Fibras de palmito	3.800	Resíduos de juta	3.800
Filme de polietileno	5.600	Restos de borracha	4.000
Carvão mineral Cambui/PR	6.200	Serragem de pinho (40% água)	2.000
Carvão mineral Charqueadas/RS	3.100	Tecido náilon	7.300
Casca árvore	2.200	Casca de eucalipto	3.750

Fonte – Adaptado de TORREIRA, (1995). p. 364.

Em virtude da dificuldade prática de se ter a composição química elementar do carvão vegetal, algumas equações e correlações utilizando-se a análise química imediata têm sido propostas e utilizadas para se determinar o poder calorífico. A fórmula de Goutal (equação (3.5)) permite calcular o poder calorífico superior (em kcal/kg) do carvão através da análise química imediata.

$$PCS = (82.Cf + A.V) \quad (3.5)$$

Em que:

PCS = Poder calorífico superior, em kcal/kg;

Cf = percentual de carbono fixo, em %;

V = percentual de matérias voláteis, em %;

A = coeficiente cujo valor depende da relação: $\frac{V}{V+C}$. (3.6)

Na Tabela 3.11 são apresentados valores de A para diversas relações $\frac{V}{V+C}$.

Tabela 3.11 – Valores de A, em função da relação $\frac{V}{V+C}$.

$\frac{V}{V+C}$	A
<0,05	150
0,05	145
0,10	130
0,15	117
0,20	109
0,25	103
0,30	96
0,35	89
0,40	80

Fonte - MENDES et al., 1982. p.87.

PETROFF e DOAT⁵, citados por MENDES et al. (1982), estudando carbonização de espécies tropicais e eucalipto, em escala de laboratório, fizeram correlações entre o poder calorífico superior em função do teor de carbono fixo, matérias voláteis e cinzas.

As Figuras 3.4, 3.5, 3.6 e 3.7 apresentam os resultados obtidos naquele estudo.

⁵ PETROFF, G.; DOAT, J. Pyrolyse des bois tropicaux: Influence de la composition chimique des bois sur les produits de distillation. *Revue des Bois et Forêts des Tropiques*, v. 177, p. 51-64, jan.fev. 1978.

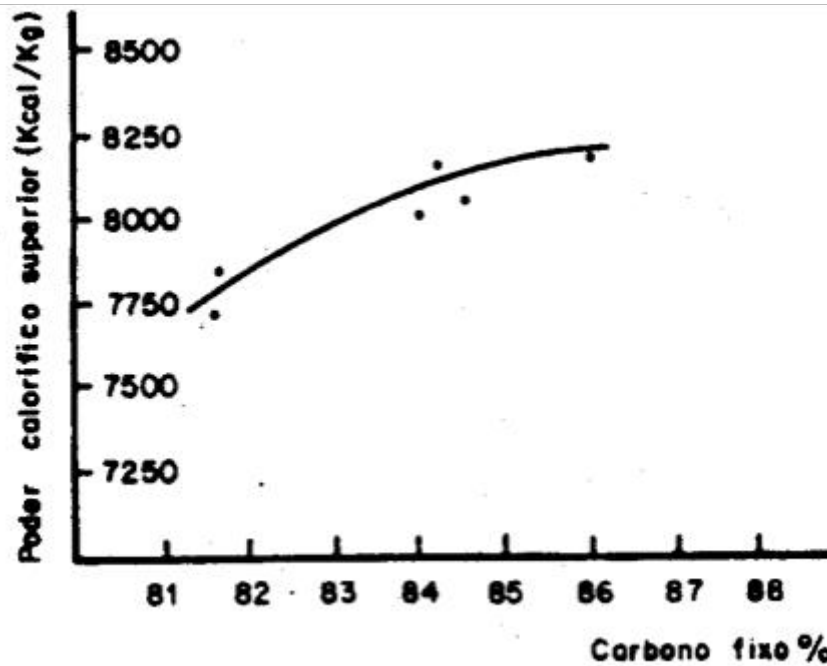


Figura 3.4 - Variação do poder calorífico em função do teor de carbono fixo

Fonte – PETROFF E DOAT citados por MENDES et al., 1982. p.87

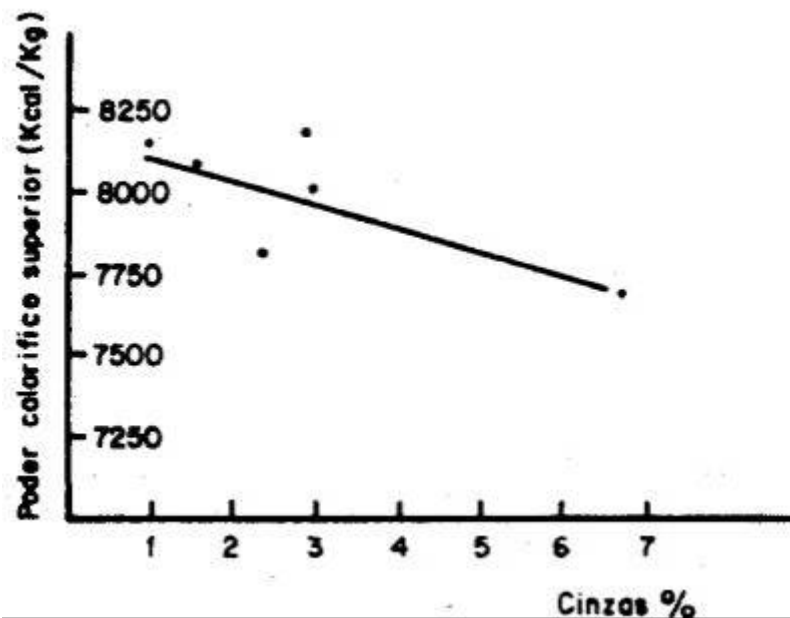


Figura 3.5 - Variação do poder calorífico superior em função do teor de cinzas

Fonte – PETROFF E DOAT (1978), citados por MENDES et al., 1982. p.88.

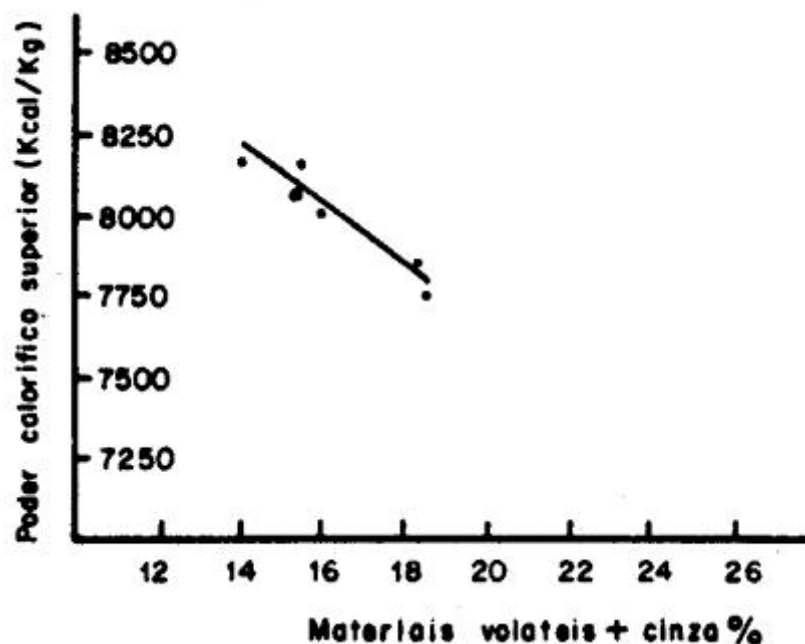


Figura 3.6 - Variação do poder calorífico em função do teor de cinzas + materiais voláteis

Fonte - PETROFF e DOAT (1978), citados por MENDES et al., 1982. p.88.

Esta correlação é de grande importância, uma vez que através da análise química imediata do carvão, para uma mesma espécie de madeira, pode-se obter um valor bem aproximado do poder calorífico superior do carvão produzido.

Estudos realizados na Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais, publicados por MENDES et al. (1982), mostram que o poder calorífico do carvão vegetal varia com a temperatura de carbonização. Conforme Tabela 3.12 observa-se que o carvão produzido a 500 °C tem um poder calorífico maior do que os carvões produzidos a 300 e 700 °C, enquanto que o carvão produzido a 700 °C tem um poder calorífico maior do que o produzido a 300 °C. O aumento no poder calorífico do carvão produzido a 500 °C é explicado em função da sua composição química elementar. Observa-se na Tabela 3.8 (apresentada no item referente à composição química elementar do carvão) que o teor de oxigênio cai significativamente quando se passa de 300 °C para 500 °C.

Tabela 3.12 – Poder calorífico do carvão vegetal em função da temperatura de carbonização*

		Temperatura de Carbonização		
		300 °C	500 °C	700 °C
Poder Calorífico (cal/g)	1ª medida	7012	8109	7647
	2ª medida	7122	8141	7693
	3ª medida	7085	8101	7563
	4ª medida	6980	8199	7720
	5ª medida	7151	8185	7671
	MÉDIA	7070	8147	7659
Desvio Padrão		72	44	60
Desvio Padrão (%)		1,02	0,54	0,78

*Carvão produzido a partir de *E. grandis*.

Fonte – Adaptado de MENDES et al., 1982. p.88.

A partir da equação (3.5), que permite calcular o poder calorífico superior e da Tabela 3.8, foram feitos os cálculos teóricos do poder calorífico superior (Tabela 3.13). Apesar de se tratar de madeiras de espécies diferentes, verifica-se, para ambas as espécies, que o poder calorífico passa por um máximo na faixa de temperatura próxima a 500 °C (Figura 3.8). Este comportamento foi também verificado em estudos realizados no CETEC pelo mesmo autor, carbonizando *E. grandis* de diversas idades nas temperaturas de 450, 550 e 700 °C.

Tabela 3.13 – PCS calculado a partir da análise elementar do carvão e da equação (3.3)

Temperatura de carbonização (°C)	Poder calorífico inferior * (kcal/kg)	Poder calorífico superior ** (kcal/kg)
200	3.618,8	-
300	6.664,5	7.070
400	7.416,9	-
500	8.026,9	8.147
600	8.061,6	-
700	-	7.659
800	7.959,5	-
1000	7.871,3	-

* Calculado a partir da análise química elementar e da relação $\frac{V}{V + C}$

** Determinado em bomba calorimétrica (CETEC).

Fonte - MENDES et al., 1982. p.89.

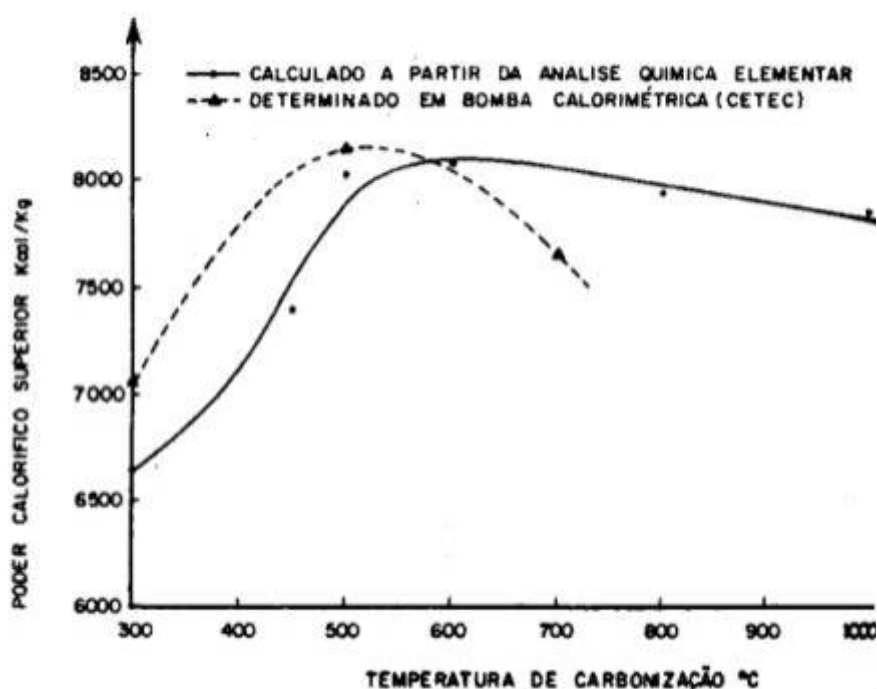


Figura 3.7 – Variação do PCS em função da temperatura de carbonização

Fonte - MENDES et al., 1982. p.88.

3.3 Torrefação da madeira e derivados

Como um meio alternativo de uso, queimar madeira para geração de energia dificilmente pode tornar-se uma sugestão revolucionária. No entanto, podem ser identificados dois caminhos, nos quais as pesquisas sobre essa forma de combustão direta pode ser relevante. A primeira, quando a madeira foi descartada como lixo, seja em um contexto doméstico, industrial ou mesmo nas florestas. A segunda consiste na pesquisa de soluções aplicáveis à transposição de uma das maiores limitações enfrentadas para o reaproveitamento de resíduos mais robustos, que é uma forma viável de manejo (EVANS, 2001).

Propostas envolvendo a melhoria do poder calorífico dos derivados de madeira encontram-se em estudo em todo o mundo, proporcionando o uso de variadas técnicas de combustão. Estudos conduzidos por TILLMAN e GOLD (1996) e TILLMAN (2000), avaliaram técnicas de mistura de diferentes combustíveis sólidos, visando o aumento do poder calorífico dos resíduos de madeira utilizados em plantas de geração de energia. A técnica denominada "cofiring" – descrita pelos autores – ou "combustão simultânea", envolve a mistura de dois combustíveis sólidos, no caso madeira e carvão mineral, visando um aumento do poder

calorífico, para utilização em diversas proporções da mistura. Deve-se ressaltar as implicações ambientais decorrentes do uso do carvão mineral, relacionadas às emissões de óxidos de enxofre, além de problemas operacionais decorrentes da mistura e alimentação de fornalhas com materiais de densidade e granulometria diferentes. A otimização da co-geração de energia utilizando resíduos de madeira foi também estudada por EVANS e ZARADIC (1996), em turbinas.

Os estudos realizados visam, até então, resolver uma série de impasses relacionados aos fatores que envolvem o aproveitamento da madeira e seus derivados, tais como:

- padronizar as dimensões dos materiais de forma a facilitar o manejo e dar uniformidade ao comportamento das partículas sólidas durante o processo de combustão;
- reduzir o teor de umidade e higroscopicidade presentes na madeira e seus derivados;
- incrementar o poder calorífico;
- otimizar o rendimento dos processos até então aplicados à madeira e seus derivados, visando a obtenção de combustíveis;
- minimizar os efeitos da ação dos agentes biológicos que atacam a madeira, deteriorando sua qualidade durante o período de estocagem.

Surge nesse contexto, o processo de torrefação da madeira, que é descrito por diversos autores tais como PENTANANUNT et al. (1990), KANDPAL e MAHESHWARI (1992), LIPISNKY et al. (2002) e ARCATE (2002), como uma técnica promissora desenvolvida na França pelo pesquisador Jean Paul Bourgeois na década de 80, visando a obtenção de um produto que concentrasse maior quantidade de energia em relação à matéria-prima que o originou, no caso a lenha, com o mínimo de perda de energia. O carvão vegetal tradicionalmente obtido nos processos é considerado como um produto que encerra perdas energéticas elevadas, apresentando baixo rendimento em relação ao processo proposto. Não só a França, mas outros grupos de pesquisa são apontados como centros de desenvolvimento de produtos obtidos com técnicas de torrefação, tais como a Tailândia (Asian Institute of Technology, Bangkok), a Finlândia e até mesmo o Brasil (Grupo de Combustíveis Alternativos – Universidade de Campinas – São Paulo). ARCATE (2002), relaciona algumas patentes registradas na França, de processos envolvendo métodos de obtenção de produtos de torrefação de madeira, no

período compreendido entre os anos de 1985 e 1990. Técnicas utilizando combustão simultânea de lenha torrada e carvão, em usinas termoelétricas nos Estados Unidos, também são relatadas pelo autor, ressaltando detalhes de alimentação dos dois combustíveis separadamente ou em conjunto.

As vantagens descritas pelos autores pesquisados, do material obtido com a torrefação, um produto intermediário entre madeira e carvão vegetal, compreendem:

- Rendimento superior ao processo de carbonização convencional, uma vez que conserva entre 80 e 90% da energia contida na matéria-prima original (madeira);
- Poder calorífico mais elevado que a matéria-prima original, no caso a madeira;
- Baixa higroscopicidade, com o teor de umidade sendo estabilizado em no máximo 3%, após o processo de torra;
- Resistência a agentes biológicos durante a estocagem.

LIPINSKY et al. (2002), apresentam o processo de torrefação da madeira ocorrendo a uma faixa de temperatura entre 200 °C e 280 °C (fase endotérmica). O rendimento do processo proporciona uma perda de massa de 20% a 30%, retendo de 80% a 90% da energia contida na matéria-prima original. A Tabela 3.14 evidencia as características do produto obtido.

Tabela 3.14 – Características da madeira após torrefação (*Pinus sp*)

Parâmetros	Resultados	
Rendimento energético (na madeira seca)	77%	
Poder calorífico (kcal/kg)	5.710	
Cinzas (%)	0,55	
Voláteis (%)	71,9	
Carbono fixo	27,7	
Análises elementares	C (%)	59,7
	H (%)	5,6
	N (%)	0,25
	O (%)	32,9

Fonte – Adaptado de LIPINSKY et al., 2002. p. 1.

O processo de torrefação da madeira é descrito por ARCATE (2002) em três etapas distintas, compreendendo:

- secagem, com utilização de vapor superaquecido e exaustão de condensados;
- torrefação, com utilização de vapor superaquecido e recuperação dos voláteis como combustível auxiliar no processo;
- resfriamento através de ventilação de ar, visando a não ocorrência de mecanismos de combustão espontânea, com o teor de umidade estabilizado em torno de 3%. O processo determina uma perda de massa em torno de 20 a 30%, possibilitando uma conservação da energia do produto inicial na faixa entre 80 e 90%.

ARCATE (2002) apresenta a utilização do vapor superaquecido como uma inovação importante, frente a outros processos de torrefação, como a utilização da circulação de ar quente. O autor indica algumas etapas do processo, ocorrendo à medida que há elevação da temperatura e dos tempos de detenção do material, como sendo:

- até 160 °C, há predominância das reações envolvendo a perda da umidade, sem contudo haver modificações estruturais na madeira, particularmente quanto à absorção de umidade (higroscopicidade);
- entre 180 ° e 220 °C, fase em que a madeira começa a adquirir uma coloração amarronzada e perde umidade, com grande emissão de dióxido de carbono, ácido acético e alguns fenóis;
- acima de 220 °C, até 270 °C, fase em que ocorre o processo de torrefação (ponto de torra), em que o material adquire as características específicas da "madeira torrificada".

BOURGEOIS e DOAT, citados por ARCATE (2002), estudaram a influência da temperatura no processo de torrefação em várias espécies, nas características do produto obtido. Os resultados são apresentados na Tabela 3.15. A influência da temperatura e do tempo de torra são apresentados na Tabela 3.16.

Tabela 3.15 - Características da madeira torrada

		Espécie				
		Pinus pinaster	Castanea sativa + Quercus sp.	Pinus caribea	Eucalyptus urophylla	
Resultados da torrefação	Temperatura atingida (°C)	280	270	285	275	
	Rendimento (%)	77	77	76	74	
	Análise elementar	C (%)	59,7	56,8	58,6	57,2
		H(%)	5,6	5,2	5,5	5,1
		N (%)	0,25	0,45	0,15	0,15
		O (%)	32,9	36,2	35,3	37,2
	PCI da madeira seca (kcal/kg)	4581	4270	4629	4438	
	PCI da madeira termoprocessada (Kcal/Kg)	5406	5143	5346	5418	
	Rendimento energético (%)	90,8	92,7	87,8	90,3	

Fonte – Adaptado de ARCATE. 2002. p. 22 – 26.

Tabela 3.16 - Influência do tempo de processamento na torrefação da madeira

Tempo de processamento	Parâmetros avaliados	Temperatura (°C)			
		200	230	260	270
1 hora	Rendimento %			86,50	
	Carbono fixo%			24,3	
	PCI (kcal/kg)			5260	
1,5 horas	Rendimento %	94,3	90,9	82,5	79,5
	Carbono fixo%	20,2	22,7	26	28
	PCI (kcal/kg)	4904	5145	5201	5397
2 horas	Rendimento %	96,7	89,0	83,5	
	Carbono fixo%	20,4	21,6	28,5	
	PCI (kcal/kg)	4850	5043	5325	
2,5 horas	Rendimento %	92,6	88,8	82,5	
	Carbono fixo%	21,7	24,5	28,5	
	PCI (kcal/kg)	5012	5194	5330	
3 horas	Rendimento %	93,5	86,6	82,0	69,0
	Carbono fixo%	21,5	28,3	29,1	32
	PCI (kcal/kg)	4942	5215	5440	5540

Fonte - Adaptado de ARCATE, 2002. p. 22 – 26.

O autor assegura que a utilização de vapor superaquecido na secagem e torrefação, bem como o aproveitamento dos voláteis na torrefação como combustível auxiliar, proporciona uma substancial economia da energia desprendida no processo. Durante a etapa de secagem, a madeira com o teor de umidade em torno de 35%, tem a umidade reduzida para 5%. (ARCATE, 2002).

LIPINSKY et al. (2002), em pesquisas sobre torrefação de madeira e derivados, afirmaram que o tamanho das partículas tem um papel importante no processo, uma vez que esse parâmetro é determinante quanto ao tempo de detenção. Acredita-se que a cinética das reações varia das partículas finas do tipo dos materiais obtidos por fragmentação da madeira (cavacos) para os pedaços maiores, como as toras.

A diminuição do teor de umidade no material a ser encaminhado ao processo de torrefação, também é influenciado pela granulometria das partículas. JIRJIS (1995), apresenta em seus estudos as considerações sobre a perda de umidade em partículas de madeira na forma de cavacos e na madeira em toras, sendo que nas primeiras a velocidade é consideravelmente maior que na segunda.

Em outra linha de pesquisa, BOURGEOIS e DOAT, citados por ARCATE (2002), apresentam um tipo de produto derivado da madeira, submetido ao processo de torrefação, no qual o material é prensado e adquire uma densidade em torno de 800 kg/m^3 , na forma de briquetes. LIPINSKY et al. (2002) apresentam fluxos de processos de torrefação de madeira ocorrendo em reatores contínuos ou em bateladas. Os autores indicam que os melhores rendimentos de processo encontram-se associados a processos contínuos de produção, com utilização de vapor superaquecido na secagem e torrefação da madeira, com aproveitamento dos voláteis como combustível auxiliar.

O processo de torrefação da madeira, diante das características do produto obtido e do rendimento verificado, tem sido considerado como uma alternativa promissora para a utilização da madeira como combustível. Após o processo, o produto obtido possui baixa higroscopicidade, baixo teor de umidade, maior resistência ao ataque de agentes biológicos durante a estocagem e poder calorífico mais elevado que o material original. A redução da dimensão das peças a serem submetidas ao processo de torrefação, reduz o tempo de processamento, a temperaturas que variam entre $200 \text{ }^\circ\text{C}$ e $270 \text{ }^\circ\text{C}$. O tempo de secagem também se encontra relacionado às dimensões das peças a serem tratadas.

3.4 Adaptação de fornalhas para utilização de combustíveis alternativos derivados de madeira

Toda a técnica aplicada sobre a construção de uma fornalha vislumbra as condições ideais de combustão. Em geral, verifica-se em uma fornalha uma zona de radiação e outra de convecção. Na câmara de combustão, os combustíveis devem transformar-se em gases de combustão, os quais deverão permutar calor com as superfícies projetadas para a ocorrência da troca térmica. Sempre se atribui a uma boa combustão, a condição de se obter os seguintes requisitos (DINIZ, 1981):

- Turbulência, proporcionando a íntima combinação do oxigênio com o combustível. Nos combustíveis líquidos e gasosos, essa situação é facilmente atingida pela atomização. Para combustíveis sólidos, deve-se maximizar a sua área superficial de modo a poder atingir tal turbulência;
- Tempo, referindo-se à duração da combustão, ou seja, o tempo de residência ou permanência na fornalha. Uma partícula atingirá total combustão se permanecer tempo suficiente em contato com o oxigênio, o que lhe permitirá completar a combustão, ou seja, para que todos os seus elementos combustíveis (carbono, hidrogênio, enxofre, etc) se transformem em gases de combustão;
- Temperatura, constituindo-se em parâmetro relevante no dimensionamento da câmara de combustão, uma vez que se atribui à temperatura o papel mais importante na transmissão de calor.

TORREIRA (1995), determina as seguintes premissas para a otimização do uso de combustíveis nas fornalhas:

- Obtenção de uma combustão completa do combustível queimado, com o máximo desprendimento de calor;
- Fornecimento da mínima quantidade de ar para realização da combustão.

Levando-se em consideração a busca pelo atendimento das condições ótimas na aplicação de um combustível sólido derivado de resíduos de madeira, pode-se inferir que:

- Uma melhor condição de turbulência pode ser atingida com a utilização de partículas menores, com o conseqüente aumento da área superficial. Essa condição pode ser adequada através de processos mecânicos de fragmentação dos resíduos de madeira;
- Menores tempos de detenção poderão ser adotados no dimensionamento das fornalhas, para partículas sólidas de menor tamanho. O tempo de permanência na fornalha também poderá ser reduzido com a eliminação da umidade do combustível aplicado;
- O emprego de técnicas para elevação do poder calorífico dos combustíveis deverá proporcionar maiores temperaturas no interior da fornalha, com o conseqüente ganho na transmissão de calor.

Existem, atualmente, inúmeras fontes estacionárias, tais como fornos e caldeiras, funcionando com combustíveis fósseis, os quais atingiram um custo operacional tal que se torna vantajosa a procura por uma solução alternativa. Como os processos de conservação de energia possuem seus limites, a eterna busca da viabilidade técnica e econômica é apresentada sempre na forma de uma dessas soluções (PINHEIRO, 1992):

- Modificação da tecnologia dos processos, eliminando a necessidade de geração de energia térmica;
- Substituição de equipamentos de geração de energia por outros projetados para a utilização de fontes energéticas alternativas;
- Adaptação dos equipamentos existentes nos processos, para utilização de outras fontes energéticas.

Das três soluções, a que tem se apresentado de forma mais econômica tem sido a terceira. Cabe salientar no entanto, que nos estudos realizados por PINHEIRO (1992), constatou-se que a adaptação de equipamentos existentes para a queima de combustíveis sólidos provoca uma queda na produção das fornalhas entre 40 e 50%, devido à necessidade da permanência da partícula sólida por um tempo maior dentro da fornalha, para que se possa completar a combustão, levando a utilização de baixas taxas de liberação de energia. FONTENELE (1974), POWER (1976), MORIS (1979) e LOPES (1980), citados por PINHEIRO (1992), mostram em seus trabalhos as condições necessárias para que uma fornalha projetada para uso de combustível líquido possa funcionar queimando combustível sólido após as adequações.

DINIZ (1981) apresenta um estudo de caso da conversão de combustível de uma caldeira a óleo com capacidade de produção de vapor de 4.000 kg/h, à pressão de trabalho de 8 kgf/cm² para queima de lenha em toras. Trata-se de um exemplo escolhido de um equipamento de porte mediano para uso em escala industrial. (Adaptado de DINIZ, 1981):

Dados gerais:

Evaporação: 4.000 kg/h

Pressão de trabalho: 8 kg/cm²

Temperatura do vapor: saturado

Temperatura da água de alimentação: 60 °C

Temperatura dos gases de exaustão: 275 °C

Consumo de combustível: 292,2 kg de óleo/hora

PCS/PCI: 10.445/9886 kcal/kg

Excesso de ar: 20%

Para conversão do equipamento para queima de lenha em toras, observou-se as características construtivas e operacionais do sistema. O equipamento possui fornalha circular interna com diâmetro de 700 mm e comprimento de 3.400 mm, o que proporciona uma superfície de aquecimento (SA) da fornalha de 7,5 m², onde se realiza a combustão, com volume de 1,31 m³. Parte do calor produzido é perdido nos gases de exaustão.

A quantidade de calor pode ser fornecida pela expressão:

$$H_i = \text{PCI} \times \text{WF}, \text{ em que:} \quad (3.8)$$

H_i = quantidade de calor desenvolvido pelo combustível, em kcal/h;

PCI = poder calorífico inferior, em kcal/kg;

WF = consumo de combustível, em kg/h;

Aplicando-se a equação, obtém-se:

$$H_i = 9886 \times 292,2$$

$$H_i = 2.888.689,2 \text{ kcal/h}$$

O calor produzido na caldeira pode ser obtido pela equação:

$$H_0 = E \times (I_V - I_A) \quad (3.9)$$

Em que:

H_0 = calor produzido na caldeira, em kcal/h;

E = evaporação da caldeira, em kg/h;

I_V = entalpia do vapor, em kcal/kg (obtido nas tabelas de vapor saturado);

I_A = entalpia da água de alimentação, em kcal/kg;

Aplicando-se a equação ao exemplo, obtém-se:

$$H_0 = 4000 (662 - 60) = 2.408.000 \text{ kcal/h}$$

Conforme observado, cerca de 83% do calor desenvolvido pelo combustível é absorvido na caldeira (rendimento) e transformado em vapor. Para que se processe a queima de lenha em toras na fornalha, com PCS = 3050 kgcál/kg, 40% de umidade e 40% de excesso de ar, deve-se aplicar:

$$WF = \frac{H_0}{\frac{R_T}{100} \times PCS} \quad (3.10)$$

Em que:

WF = consumo de combustível, kg/h;

H_0 = calor produzido na caldeira, em kcal/h;

R_T = rendimento térmico, em %;

PCS = poder calorífico superior, em kcal/kg.

Aplicando-se a equação (3.9), com o rendimento térmico percentual sendo estimado pela Tabela 3.5, obtém-se:

$$WF = \frac{2.408.000 \text{ kcal/h}}{\frac{68,7}{100} \times 3050 \text{ kcal/kg}}$$

$$WF = 1.149,21 \text{ kg/h}$$

Segundo DINIZ (1981), deve-se limitar a liberação de calor na fornalha a uma taxa em torno de 300.000 kcal/m³.h. Assim sendo o volume de fornalha adaptada para queima de lenha pode ser fornecido pela equação:

$$V = \frac{WF \times PCS}{300.000 \text{ kcal/m}^3 \cdot \text{h}} \quad (3.11)$$

Em que:

V = volume da fornalha, em m³;

WF = consumo de combustível, kg/h;

PCS = poder calorífico superior, em kcal/kg.

Aplicando-se a equação (3.10), obtém-se:

$$V = \frac{1149,21 \text{ kg/h} \times 3050 \text{ kcal/kg}}{300.000 \text{ kcal/m}^3 \cdot \text{h}}$$

$$V = 11,68 \text{ m}^3$$

Como pode ser verificado, a fornalha adaptada para queima de lenha em toras deverá possuir um volume aproximadamente nove vezes maior que a fornalha para queima de óleo. Por essa

ração, utiliza-se nas adaptações, via de regra, a instalação de uma ante-fornalha ou pré-fornalha, ou seja, acrescenta-se uma câmara de combustão adicional que proporcione as condições para combustão da lenha.

Outros fatores considerados por DINIZ (1981) para que na adaptação não ocorra perda de capacidade de produção encontram-se relacionadas ao escoamento dos gases de exaustão, vazão dos gases e perdas de cargas associadas. Como a combustão de lenha deverá impor maior vazão de gases de exaustão em relação ao óleo, as perdas de carga na tiragem dos gases poderão limitar a capacidade de produção. Assim sendo, todo o sistema de exaustão deverá ser redimensionado para que não sejam verificadas velocidades dos gases nos dutos de exaustão superiores a 15 m/s (DINIZ, 1981).

3.5 Impactos ambientais associados à combustão dos derivados de madeira

O Conselho Estadual de Política Ambiental, órgão colegiado deliberativo, estabeleceu através da Deliberação Normativa nº 11, em 16 dezembro de 1986 (DN 011/86), as normas e padrões para emissões de poluentes na atmosfera no estado de Minas Gerais, em fontes estacionárias. Para “caldeiras a lenha”, a DN 011/86 estabeleceu o padrão de 200 mg/Nm³, enquanto que para caldeiras a biomassa o padrão estabelecido é de 600 mg/Nm³, como limites de emissão de material particulado. Para fontes não listadas na resolução, o padrão estabelecido é de 150 mg/Nm³ de material particulado.

Como biomassa, a DN 011/86 especifica alguns combustíveis sólidos, tais como o bagaço de cana, os resíduos de beneficiamento de cereais, aglomerados de madeira e outros resíduos de matéria orgânica permitidos (Deliberação Normativa nº 11, COPAM, 1986).

O Conselho Nacional de Meio Ambiente – CONAMA, através da Resolução nº 08, de 06 de dezembro de 1990, estabeleceu, em nível nacional, os limites máximos de emissão de poluentes do ar em fontes fixas de poluição. A Resolução nº 08 define como processo de combustão em fontes fixas toda a queima de substâncias combustíveis realizada em caldeiras, geradores de vapor, centrais para geração de energia elétrica, fornos, fornalhas, estufas, secadores para geração e uso de energia térmica, incineradores e gaseificadores (Resolução nº 08, CONAMA, 1990).

A verificação do atendimento aos padrões estabelecidos para emissão de partículas, poderá ser realizada por campanhas de amostragens isocinéticas nos dutos de exaustão das fontes estacionárias, com o emprego de metodologias nas coletas e análises, preconizadas em normas técnicas tais como:

- NBR 10.700 – Planejamento de amostragem em dutos e chaminés de fontes estacionárias (ABNT, 1989);
- NBR 10.701 – Determinação de pontos de amostragem em dutos e chaminés de fontes estacionárias (ABNT, 1989);
- NBR 10.702 – Efluentes gasosos em dutos e chaminés de fontes estacionárias – Determinação do peso molecular em base seca (ABNT, 1989);
- NBR 12.020 – Efluentes gasosos em dutos e chaminés de fontes estacionárias – Calibração dos equipamentos utilizados em amostragem (ABNT, 1992);
- NBR 12.827 – Efluentes gasosos com sistema filtrante no interior do duto ou chaminé de fontes estacionárias – Determinação de Material Particulado (ABNT, 1993).

De acordo com as orientações da norma técnica NBR 10.700 (ABNT, 1989), tornam-se necessárias algumas informações preliminares no planejamento das medições, tais como:

- as características do ciclo operacional;
- as matérias-primas utilizadas nos processos e suas características gerais;
- o tipo de combustível utilizado;
- a produção;
- as características do fluxo gasoso;
- a geometria do duto ou chaminé e sua localização;
- a verificação das dimensões internas do duto ou chaminé;

- a determinação da quantidade de furos para amostragem e suas posições;
- a definição da equipe de trabalho.

O estudo preliminar do efluente gasoso fornece informações básicas para viabilizar a amostragem. Os seguintes parâmetros, segundo a norma técnica NBR 10.700 (ABNT, 1989) devem ser observados:

- as condições de fluxo, verificando se não há ocorrência de fluxo ciclônico;
- as pressões de velocidade, verificando se a máxima e mínima são compatíveis com o manômetro do equipamento;
- a temperatura, verificando o perfil da temperatura na seção transversal e sua variação num mesmo ponto;
- a pressão estática;
- a umidade estimada no fluxo gasoso, bem como a existência de névoas ou gotículas;
- a composição dos gases no fluxo;
- a concentração de material particulado, associando-a com o tempo e vazão de amostragem, para evitar excesso de troca de filtros ou quantidade insuficiente de material particulado para pesagem;
- a possibilidade de entupimento ou aumento de perda de carga no trem de amostragem, devido à concentração ou natureza do material particulado.

Para seleção da seção transversal, onde serão determinados os pontos de amostragem, a norma técnica NBR 10701 (ABNT, 1989) preconiza que deverá ser escolhida em um trecho reto a uma distância de pelo menos 8 diâmetros a jusante e 2 diâmetros a montante de duas singularidades consecutivas, tais como curvas, joelhos, reduções, expansões, chama visível, etc. Caso essa condição seja impraticável, deverá ser selecionada uma seção transversal que esteja a pelo menos 2 diâmetros a jusante e 0,5 diâmetro a montante (NBR 10701, ABNT 1989).

MESQUITA et al. (1985), define os aerossóis ou aerodispersóides como sistemas dispersos cujo meio de dispersão é gasoso e cuja fase dispersa consiste de partículas sólidas ou líquidas, classificando os sistemas de acordo com as fases como:

- poeiras – aerossóis formados por dispersão e constituídos por partículas sólidas geralmente com diâmetros superiores a 1 μm , tais como as poeiras de sílica, asbesto, algodão, etc;
- névoas – aerossóis constituídos por partículas líquidas, independentemente da origem e do tamanho das partículas, tais como as névoas de ácido sulfúrico, névoas de pintura, dentre outras;
- fumos – aerossóis formados pela condensação, sublimação, ou reações químicas, constituídos por partículas sólidas geralmente com diâmetros menores que 1 μm , tais como os fumos metálicos, fumos de cloreto de amônio, dentre outros;
- fumaças – aerossóis resultantes da combustão incompleta de materiais orgânicos, constituídos geralmente por partículas inferiores a 1 μm .

Além do material particulado, a combustão da biomassa produz outros poluentes tais como o monóxido de carbono, dióxido de carbono, óxidos de enxofre e óxidos de nitrogênio (FEAM, 2003). A Tabela 3.17 apresenta alguns poluentes atmosféricos decorrentes da combustão de biomassa e suas principais consequências associadas.

Tabela 3.17- Poluentes atmosféricos e principais consequências associadas

Poluentes	Conseqüência
Monóxido de carbono	. Afeta a capacidade de oxigenação da hemoglobina; . Danos ao aparelho respiratório.
Óxidos de enxofre	. Danos à vegetação; . Danos à saúde humana; . Chuvas ácidas.
Óxidos de nitrogênio	. Danos à vegetação; . Chuvas ácidas; . Reagem com hidrocarbonetos, produzindo oxidantes fotoquímicos (danos à saúde humana).
Dióxido de carbono	. Efeito estufa.
Material particulado	. Redução da visibilidade. . Acúmulo de sujeira; . Carreamento de poluentes tóxicos para o trato respiratório.
Oxidantes fotoquímicos	. Irritação de olhos e pulmões; . Danos à vegetação; . Deterioração da borracha e produtos sintéticos.

Fonte – Adaptado de FEAM, 2003. p. 155

Os óxidos de nitrogênio são formados em todos os processos de combustão com utilização do ar e são altamente nocivos à saúde. Inicialmente produz-se o óxido de nitrogênio e gradualmente este gás combina-se com o oxigênio atmosférico para formar o dióxido de nitrogênio (MANCINTYRE, 1988).

Pode-se procurar diminuir o teor dos óxidos de nitrogênio nas emissões provenientes das caldeiras pela ação nos combustores, reduzindo o “ar em excesso” na combustão, mas de modo que não aumente, em contrapartida, a quantidade de fumaça, ou seja, de material particulado no fluxo gasoso (MANCINTYRE, 1988).

A qualidade da combustão encontra-se estreitamente relacionada ao controle operacional e afeta de forma direta a emissão de poluentes. Dessa forma, recursos mecânicos que proporcionam ao operador, calibrar a relação combustível/comburente são essenciais ao controle das emissões. O controle da combustão (razão ar/combustível) não pode ser realizado através do controle da vazão de combustível, uma vez que a energia gerada pela caldeira (vazão de vapor), depende da quantidade de combustível introduzido. Assim, a única variável que pode ser regulada é a vazão de ar de combustão. O excesso de ar é fator determinante da eficiência da combustão, pois controla o volume, temperatura e entalpia dos produtos da combustão. Um grande excesso de ar é indesejável, porque diminui a temperatura da chama e