

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL
TESE DEFENDIDA POR Felix E. Fonseca
Felfli E APROVADA PEI
COMISSÃO JULGADORA EM 29.09.2003
Carlos Alberto Luengo
ORIENTADOR

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2004 13643

Torrefação de biomassa, viabilidade técnica e potencial de mercado

Autor: **Felix Eliecer Fonseca Felfli**
Orientador: **Carlos Alberto Luengo**

18/03

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENERGIA
ÁREA INTERDISCIPLINAR DE PLANEJAMENTO DE
SISTEMAS ENERGÉTICOS**

**Torrefação de biomassa, viabilidade
técnica e potencial de mercado**

Autor: Felix Eliecer Fonseca Felfli
Orientador: Carlos Alberto Luengo

Curso: Engenharia Mecânica
Área de Concentração: Planejamento de Sistemas Energéticos

Tese de doutorado apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Doutor em Planejamento de Sistemas Energéticos.

Campinas, 2003
S.P. – Brasil

UNIDADE	BC
Nº CHAMADA	17/UNICAMP
	F733t
V	EX
TOMBO BC/	59564
PROC.	16 P.117/04
C	☐
D	☒
PREÇO	4,00
DATA	14/09/2004
Nº CPD	

CM00197620-5

Bib Id 321223

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

F733t

Fonseca Felfli, Felix Eliecer

Torrefação de biomassa, viabilidade técnica e potencial de mercado / Felix Eliecer Fonseca Felfli.-- Campinas, SP: [s.n.], 2003.

Orientador: Carlos Alberto Luengo
Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Briquete (combustível) Industria. 2. Pesquisa de mercado. 3. Resíduos vegetais. I. Luengo, Carlos Alberto. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

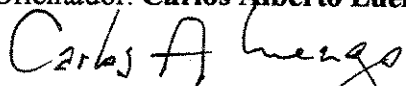
**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA INTERDISCIPLINAR DE PLANEJAMENTO DE
SISTEMAS ENERGÉTICOS**

TESE DE DOUTORADO

**Torrefação de biomassa, viabilidade
técnica e potencial de mercado**

Autor: Felix Eliecer Fonseca Felfli

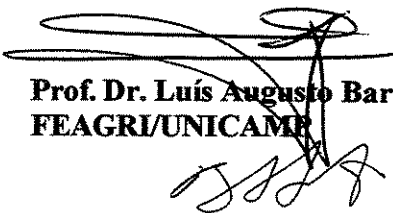
Orientador: Carlos Alberto Luengo



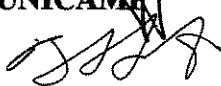
**Prof. Dr. Carlos Alberto Luengo, Presidente
IFGW/UNICAMP**



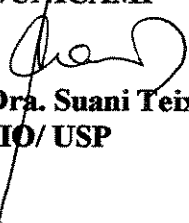
**Prof. Dr. Isaias de Carvalho Macedo
NIPE/UNICAMP**



**Prof. Dr. Luis Augusto Barbosa Cortez
FEAGRI/UNICAMP**



**Prof. Dr. Douglas Soares Galvão
IFGW/UNICAMP**



**Prof. Dra. Suani Teixeira Coelho
CENBIO/ USP**

Campinas, 24 setembro 2003

Dedicatória:

Dedico este trabalho à minha esposa, pela cumplicidade, amor e amizade

À minha mãe, pelo exemplo de vida e dedicação

Ao meu pai *in memoriam*

Agradecimentos

Agradeço ao Professor Dr. Carlos A. Luengo pela valiosa orientação, sem a qual este trabalho não poderia ser culminado.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo-FAPESP, pela concessão da bolsa de estudos (99/01064-3) e pelo apoio financeiro (02/03215-3) e institucional a esta pesquisa.

Aos colegas do Grupo Combustíveis Alternativos pelo apoio e amizade.

Ao Professor Dr. Pedro Beaton pelo incentivo nesta pesquisa.

Ao Professor Dr. Caio Glauco Sanchez pelo apoio material nesta pesquisa.

Ao Professor Dr. José Dilcio Rocha pelas valiosas observações realizadas durante a elaboração do manuscrito.

Ao Senhor Leonardo Conde (BIOENERGY do BRASIL S.A.) por facilitar as amostras de briquetes de alta densidade para esta pesquisa.

Expresso minha gratidão a todos meus colegas e amigos que ajudaram de forma direta e indireta na conclusão deste trabalho

Resumo

FONSECA FELFLI, Felix Eliecer. *Torrefação de biomassa, viabilidade técnica e potencial de mercado*: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2003. 137 p.

Neste trabalho, procurou-se, através de uma abordagem multidisciplinar, identificar as principais barreiras técnicas e mercadológicas a serem debeladas para se produzir e comercializar a biomassa torrefeita. Para isto, foi desenvolvido um forno com capacidade para torrefazer pedaços de madeira ou briquetes de biomassa em ciclos de 5 a 6 horas, operando entre 230 e 270°C. Os perfis térmicos e operacionais do forno foram avaliados através de balanços de calor e massa. Com o intuito de identificar as possíveis aplicações da biomassa torrefeita, foram analisados os perfis de combustão e as características físico-químicas deste combustível. Através do estudo de mercado, identificou-se as pizzarias, as indústrias produtoras de cerâmicas e o consumidor residencial como potenciais consumidores de biomassa torrefeita. Esta pesquisa também determinou a estrutura destes mercados, assim como as características dos consumidores. Este processo de recopilção de informação de mercado foi o suporte estratégico utilizado para fazer uma análise de viabilidade técnico-econômico-financeira deste processo e definir algumas das possíveis vias para inserir o processo e os produtos da torrefação no mercado.

Palavras Chaves: Torrefação, Biomassa, Briquetes, Mercados.

Abstract

FONSECA FELFLI, Felix Eliecer. Biomass *Torrefaction, technical feasibility and market prospects*: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2003. 137 p.

In this work, a multidisciplinary approach was used to study the market and technical drawbacks to manufacture and trade torrefied biomass. A batch torrefactor was developed to manufacture torrefied wood logs or briquettes, operating between 230 and 270°C in periods of 5 or 6 hours. The operating and temperature profiles were evaluated through heat and mass balances in the furnace. In order to identify possible torrefied biomass users, combustion profiles and physical-chemical characteristics were analyzed. Through a market research ceramics, pizza restaurants and domestic customers were identified as potential marketplace for torrefied biomass. Market structure and customers characteristics were studied. This marketing information was the strategy support to make a technical-economics-financial feasibility study and find the possible ways to introduce torrefaction in the marketplace.

Key Words: Torrefaction, Biomass, Briquettes, Markets.

Índice

Capítulo 1: Introdução	1
1.1 A diversificação do mercado de bio-combustíveis	1
1.2 A torrefação como alternativa para diversificar a oferta de bio-combustíveis	2
1.3 Objetivos	4
Capítulo 2: Aspectos Teóricos e Práticos da Torrefação	5
2.1 O processo de torrefação	5
2.2 Características da biomassa torrefeita	6
2.3 Aplicações da biomassa torrefeita	8
2.4 Estado da arte para torrefação de biomassa	9
2.5 Modelagem matemática do processo de torrefação	14
Capítulo 3: Proposta Tecnológica para a Torrefação	31
3.1 Forno para a torrefação de madeira e briquetes de biomassa	31
3.2 Procedimento para dimensionar o forno de torrefação	38
Capítulo 4: Ensaios no Forno de Torrefação	46
4.1 Perfil de funcionamento do forno de torrefação	46
4.2 Caracterização da biomassa torrefeita	65
Capítulo 5: Estudo de Mercado e Viabilidade Econômica da Torrefação	88
5.1 Pesquisa de mercado	88
5.2 Estudo de viabilidade econômica do processo de torrefação	113
Capítulo 6: Conclusões	128
Referências Bibliográficas	134
Anexos	

Lista de Figuras

2.1 Planta de torrefação industrial em Laval de Cere	11
2.2 Planta Pillar	12
2.3 Sistema “ <i>Airless Drying</i> ” para torrefação de biomassa	13
2.4 Esquema cinético da pirólise a temperaturas inferiores a 300°C	17
2.5 Perfis de temperatura em função do tempo e da posição	23
2.6 Perfis de condutividade térmica em função do tempo e da posição	23
2.7 Número de Biot em função do tempo durante a torrefação da torra de madeira	24
2.8 Fluxos de vapor d’água e gases da torrefação em função do tempo	25
2.9 Perfis de umidade em função do tempo e da posição	26
2.10 Comportamento do tempo mínimo de torrefação em função do raio e da umidade	28
2.11 Comportamento do tempo mínimo de torrefação em função do raio e de h	29
3.1 Vista em corte lateral do forno de torrefação	32
3.2 Vista em perspectiva do sistema de exaustão e refluxo de gás	33
3.3 Exemplificação da carga ou descarga do forno de torrefação	34
3.4 Forno carregado com biomassa e lenhas de fluxo de gás	35
3.5 Sistema de condensação e injeção de água	36
3.6 Vista em corte do condensador e linhas de fluxo	37
3.7 Consumo de calor em função do tempo	39

3.8 Esquema de injeção de ar na câmara de combustão	43
4.1 Perfil médio de temperatura, taxa de combustão e fases da torrefação	47
4.2 Perfil de temperatura durante a torrefação de madeira com 40 cm. 1°C.min	49
4.3 Perfil de temperatura durante a torrefação de madeira com 40 cm. 3°C.min	49
4.4 Perfil de temperatura durante a torrefação de madeira com 10 cm. 3,5°C.min	51
4.5 Perfil de temperatura durante a torrefação de madeira com 10 cm. 3°C.min	52
4.6 Perfil de temperatura durante a torrefação de BAD. 3°C.min	52
4.7 Perfil de temperatura durante a torrefação de BAD. 5°C.min	53
4.8 Eficiência e taxa de combustão em função da carga térmica no forno	58
4.9 Fluxo e acidez dos efluentes líquidos do processo a 250°C em função do tempo	63
4.10 Perdas de calor em função da temperatura dos gases de exaustão	64
4.11 Gráfico das relações atômicas O/C vs H/C em função do combustível	70
4.12 Montagem experimental para determinar a friabilidade	75
4.13 Esquema da montagem experimental para estudar perfil de combustão	77
4.14 Emissão de CO durante a queima de 500g de ME ₂₇₀ e CV	78
4.15 Emissão de CO durante a queima de 300g de ME ₂₇₀ e CV	78
4.16 Emissão de CO durante a queima de 400g de BAD ₂₇₀ e CV	79
4.17 Concentração de CO ao redor de uma churrasqueira na queima de ME ₂₇₀	80
4.18 Perfil de combustão das amostras BAD ₂₇₀ e CV	81
4.19 Perfil de combustão das amostras ME ₂₇₀ e CV	82
5.1 Série histórica de consumo de lenha por setores	90
5.2 Série histórica de consumo de carvão vegetal por setores	92
5.3 Distribuição do consumo de lenha nos principais mercados de São Paulo	94

5.4 Destino do carvão vegetal no Estado de São Paulo	95
5.5 Índice de relevância dos parâmetros de qualidade do carvão vegetal	96
5.6 Distribuição das classes sócio-econômicas na amostra pesquisada	98
5.7 Frequência de uso de CV em atividades domésticas	99
5.8 Frequência de compra de CV dos consumidores entrevistados	100
5.9 Fatores de influência na decisão de compra do CV	101
5.10 Avaliação dos consumidores domésticos da qualidade do CV	101
5.11 Distribuição do consumo de lenha nas pizzarias pesquisadas	104
5.12 Índice de relevância no critério de compra da lenha	105
5.13 Avaliação da qualidade da lenha pelas pizzarias	106
5.14 Índice de relevância na qualidade da lenha	106
5.15 Faixa de consumo de lenha nas cerâmicas pesquisadas	109
5.16 Índices de relevância nos critérios de compra da lenha nas cerâmicas	110
5.17 Índice de relevância na qualidade da lenha nas cerâmicas	111
5.18 Planta de briquetagem-torrefação	115
5.19 Comportamento da TIR em função da participação de recursos de terceiros	126

Lista de Tabelas

2.1 Caracterização de briquetes de resíduos de madeira torreficados	8
2.2 Parâmetros usados para as reações de secagem e pirólise	22
2.3 Parâmetros de projeto, obtidos por simulação	27
3.1 Composição elementar e poder calorífico inferior (PCI) do Eucalipto	40
3.2 Principais características do forno de torrefação e sistemas periféricos	45
4.1 Caracterização imediata em função da posição. Teste a 250°C e 3°C/min	50
4.2 Características da madeira de eucalipto usada nos testes de combustão	56
4.3 Resultados dos testes de combustão em função da taxa de combustão	57
4.4 Resultados dos testes de combustão durante o ciclo de alimentação do forno	59
4.5 Dados adquiridos durante a torrefação de madeira a 250°C	61
4.6 Balanço de calor no forno durante a torrefação de madeira a 250°C	62
4.7 Balanço de massa no forno durante a torrefação de madeira a 250°C	63
4.8 Análise imediata da biomassa em função da temperatura de torrefação	67
4.9 Análise elementar da biomassa em função da temperatura de torrefação	69
4.10 Rendimento de conversão e índices energéticos	71
4.11 Propriedades mecânicas da biomassa torrefeita	73
4.12 Dados relativos aos efeitos carcinogênicos, genotóxicos e mutagenicos de HPAs	84
4.13 Concentração de HPAs nas amostras de biomassa torrefeita e no CV	86
5.1 Pesquisa estimulada: Critérios sobre a qualidade do carvão vegetal	102

5.2 Preço das máquinas e equipamentos de briquetagem-torrefação	115
5.3 Investimento fixo em ativos tangíveis	116
5.4 Mão de obra industrial	117
5.5 Despesas administrativas e comerciais	118
5.6 Custos de matéria-prima, combustível e embalagem	119
5.7 Estrutura de custos	119
5.8 Ponto de equilíbrio durante a produção de BAD ₂₇₀	120
5.9 Custo industrial e despesas operacionais	121
5.10 Capital de Giro	122
5.11 Investimento total	123
5.12 Despesas financeiras	123
5.13 DER e capacidade de pagamento	124
5.14 Fluxo de Caixa	125
5.15 Resultados da análise econômico-financeira para diferentes produtos	126

Nomenclatura

Letras Latinas

<i>A</i> -fator pré-exponencial	s^{-1}
<i>c</i> -calor específico	$\text{kJkg}^{-1}\text{K}^{-1}$
<i>E</i> -energia de ativação	kJmol^{-1}
<i>h</i> -coeficiente de transferência de calor por convecção	$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$
<i>k</i> -condutividade térmica	$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
<i>K</i> -taxa de reação	s^{-1}
<i>l</i> -comprimento	m
<i>m</i> -fluxo de massa sólida	kg h^{-1}
<i>Q</i> -taxa de calor	W
<i>q</i> -taxa de calor unitária	W/kg
<i>R</i> -constante universal dos gases	$\text{kJmol}^{-1}\text{K}^{-1}$
<i>r</i> -raio	m
<i>r</i> -taxa de conversão	$\text{Kgm}^{-3}\text{s}^{-1}$
<i>T</i> -temperatura	$\text{K}, ^\circ\text{C}$
<i>t</i> -tempo	s
<i>u</i> -velocidade da fase gasosa	ms^{-1}

V-volume de gás $\text{Nm}^3\text{kg}^{-1}$

x-umidade -

Letras Gregas

Δh -calor de reação de pirólise kJkg^{-1}

η -rendimento %

λ -coeficiente de excesso de ar na combustão -

ρ -densidade kgm^{-3}

τ -tempo mínimo min

Φ -fator de interpolação -

Subscritos

0-vapor d'água na reação de pirólise -

1-gás na reação de pirólise

2-vapor na reação de pirólise

3-carvão na reação de pirólise

a-área, ar

b-biomassa

c-carvão

d-liberado, disponível

eff-efetiva

ev-evaporação

f-forno, fluido

g-gás

M-umidade

o-inicial

u-consumo

v- volumétrico

va- fase de vapor d'água

v-vapor

w-madeira ou biomassa

wo-biomassa inicial

Superescritos

●-instantâneo

o-teórico

Abreviações

BAD₂₃₀-Briquete de alta densidade torrefeito a 230°C

BAD₂₅₀-Briquete de alta densidade torrefeito a 250°C

BAD₂₇₀-Briquete de alta densidade torrefeito a 270°C

BAD-Briquete de alta densidade

CV-Carvão vegetal

DER-Demonstração de resultado de exercício

ME₂₃₀-Madeira de eucalipto torrefeita a 230°C

ME₂₅₀-Madeira de eucalipto torrefeita a 250°C

ME₂₇₀-Madeira de eucalipto torrefeita a 270°C

ME-Madeira de eucalipto

PCI-Poder calorífico Inferior

PCS-Poder calorífico superior

PE-Ponto de equilíbrio

PVV-Preço de venda à vista

TIR-Taxa interna de retorno

TJLP-Taxa de juros de longo prazo

Siglas

ACERVIR-Associação das cerâmicas de Itu e região

ANICER-Associação nacional da indústria cerâmica

BEN-Balanço energético nacional

FCESP-Federação e centro de comércio do Estado de São Paulo

SEBRAE-Serviço de apoio às micro e pequenas empresas

SICOV-Sindicato da indústria cerâmica e olarias de Vargem Grande do Sul.

SINCAL-Sindicato do comércio varejista e carvão vegetal e lenha do Estado de São Paulo

Sumula Curricular

Felix Eliecer Fonseca Felfli
Avenida Francisco Glicério, no. 1730 apto 81, Centro,
13012-100 Campinas-SP
E-mail: fffelfli@hotmail.com

Formação

Mestrado, PSE, FEM, UNICAMP (1999)
Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidad de Oriente (UO)
(1995)

Publicações sobre o tema

- Fonseca Felfli, F, Luengo C.A, Suarez J A, Beaton P. Wood briquettes torrefaction.
(submitted to Energy Journal)
- Fonseca Felfli, F, Luengo C.A, Beaton P. Torrefação de biomassa: Potencial de mercado e viabilidade econômica. *(Submetido à Revista Brasileira de Energia)*
- Suarez J A, Bezon G, Beaton P, Luengo C A, **Fonseca Felfli F**. Coffee Husk Briquettes: A New Renewable Energy Source. *Energy Sources* 2003; 25:961-967.
- Fonseca Felfli, F, Luengo C.A, Beaton P. Torrefacao de biomassa: Características, Aplicações e perspectivas. In: NIPE (ed), AGRENER 2000, UNICAMP, Campinas-SP.; 2000 4p.
- Suarez J A, Luengo C A, **Fonseca Felfli F**, Bezon G, Beaton P. Thermochemical proprieties of Cuban Biomass. *Energy Sources* 2000; 22:851-857.
- Fonseca Felfli, F, Luengo C.A, Beaton P, Suarez A. Efficiency test for bench unit torrefaction and characterization of torrefied biomass. 4th Biomas Conference of Americas. California, 1999. Vol 1, p 589-592.
- Fonseca Felfli F, Luengo, C. A., Beaton, P. A numerical model for biomass torrefaction.. In: H. Kopetz, Weber, Palz, Chartier and Ferrero, editors. *Biomass for Energy and Industry*. Wurzburg; 1998. p. 1596-99.
- Fonseca Felfli F, Luengo, C. A., Beaton, P. Bench unit for biomass residues torrefaction.. In: H. Kopetz, Weber, Palz, Chartier and Ferrero, editors. *Biomass for Energy and Industry*. Wurzburg; 1998. p. 1593-95.

Patentes

Forno para torrefação de madeira e de briquetes lenho-celulósicos. Fonseca Felfli, F, Luengo C.A, Beaton P. PI0300090-7.

Capítulo 1

Introdução

1.1 A diversificação do mercado de bio-combustíveis

Em vários segmentos¹ econômicos, a biomassa de origem vegetal constitui o principal recurso energético (BEN, 2002). No entanto, a lenha e o carvão vegetal, são os principais insumos disponíveis no mercado. Com exceção do bagaço de cana, o qual é consumido quase integralmente nas usinas de açúcar e álcool, raramente são encontrados outros derivados² disponíveis para uso e/ou comercialização. É importante frisar que a exploração racional dos bio-combustíveis envolve a diversificação e o aproveitamento integral de seus derivados.

Embora a maior parte da lenha consumida provenha de florestas plantadas, é necessário ressaltar que seu aproveitamento como combustível ainda não é eficiente, pois são desperdiçados muitos resíduos florestais, e quando a lenha chega ao consumidor ainda possui alto teor de umidade e nenhum padrão energético estabelecido, causando perdas econômicas tanto para o produtor quanto para o consumidor. Por outro lado, a transformação da lenha em outros combustíveis mais “nobres” limita-se praticamente à produção de carvão vegetal, provocando que o mercado se encontre praticamente “monopolizado” por apenas dois produtos: lenha e carvão. A eventual disponibilidade de outros bio-combustíveis tornaria o mercado mais competitivo e dinâmico, promovendo melhoras na qualidade das ofertas e conseqüentemente obrigando o segmento produtivo a modernizar-se para aproveitar de forma mais racional a lenha e os recursos da biomassa vegetal.

¹ Indústria de cerâmicas, pizzarias, indústria de alimentos, usinas de açúcar e consumidores residenciais.

² Briquetes e pellets de resíduos de biomassa, briquetes de carvão vegetal, bio-óleos, biomassa torrefeita, entre outros.

1.2 A torrefação como alternativa para diversificar a oferta de bio-combustíveis

Uma alternativa para aproveitar de forma eficiente a lenha consiste em tratá-la termicamente, entre 230 e 300°C, para diminuir o teor de umidade e de voláteis, e aumentar o poder calorífico. Isto é conhecido como “retificar” ou torrefazer a madeira. Este processo, além de melhorar as características energéticas da lenha, é capaz de produzir vários tipos diferentes de combustíveis em função dos parâmetros de operação (Bourgois, 1985, Doat, 1985, Fonseca Felfli, 1999).

Outro tratamento que pode contribuir para diversificar a oferta de bio-combustíveis é a briquetagem de resíduos de biomassa ou finos de carvão. É importante destacar que em Brasil já existe o comércio deste produto, entretanto, muito reduzido se comparado ao volume da lenha consumida. Embora os briquetes sejam uma boa alternativa, a comercialização destes encontra dificuldades para ganhar espaço no mercado. Atualmente a produção de briquetes, no Estado de São Paulo, se restringe a do briquete de resíduo de biomassa (serragem ou resíduos de madeira) enquanto que a produção de briquetes de carvão vegetal não existe. De acordo com este cenário o consumo de briquetes está praticamente restrito às pizzarias e pequenas indústrias, enquanto que o consumo doméstico³ é praticamente inexistente. Uma opção para expandir o mercado de briquetes poderia ser a “valorização energética” dos briquetes de biomassa através da torrefação. Um sistema para este processo não necessitaria de grandes investimentos e poderia ser viável para os pequenos produtores de briquetes. Desta maneira, o briquete poderia ser lançado no mercado doméstico, ou mesmo torná-lo um produto de maior valor para uso industrial ou comercial.

A torrefação pode ser uma alternativa para diversificar a oferta de bio-combustíveis. No entanto, podem existir barreiras técnico-econômicas e mercadológicas que dificultem a implementação do processo e a comercialização da biomassa torrefeita. É importante destacar que existe uma grande variedade de métodos de conversão energética da biomassa (Bridgwater & Bridge, 1991; Cortez et alli, 1997), mas o sucesso de sua implementação

³ Consumo doméstico: Churrasco, Queima em fogões e Lareiras.

não depende exclusivamente das vantagens tecnológicas, existem barreiras mercadológicas e financeiras que em muitos casos são determinantes. Um exemplo que ilustra esta situação é o caso da produção de carvão vegetal. Apesar de existir várias tecnologias que comprovadamente, melhoram o rendimento de conversão, a produtividade do processo e a qualidade do carvão (Antal, 1990), ainda no Brasil são usados métodos de carbonização, que em muitos casos são rudimentares e de baixo rendimento gravimétrico (Rosillo-Calle, 1996). Isto pode parecer contraditório se analisado apenas pela ótica das vantagens tecnológicas, mas existem barreiras econômicas e mercadológicas que devem ser consideradas seriamente. Neste sentido, é importante ressaltar que no Estado de São Paulo a maior parte da produção de carvão vegetal está em mãos de pequenos produtores, e portanto, para este setor torna-se muito difícil implementar tecnologias que requerem altos investimentos e que somente são viáveis para um grande volume de produção. Outro aspecto que deve ser considerado é a estrutura do mercado, pois para introduzir estas tecnologias deve existir um mercado estruturado que dê suporte à produção.

Conforme o acima analisado, a implementação de qualquer solução tecnológica deve passar necessariamente por um estudo de mercado, e de viabilidade técnico-econômica. É necessária uma visão multidisciplinar de forma que seja possível conciliar a tecnologia com as barreiras econômicas e mercadológicas. Partindo desta ótica fundamentou-se a idéia central deste trabalho. A qual procurou, utilizando como pivô central a estrutura do mercado, estudar as vias para a inserção do processo e dos produtos da torrefação no mercado. É importante ressaltar que o estudo de mercado é peça fundamental em qualquer projeto técnico-econômico, pois uma análise puramente técnica ou econômica não é capaz de considerar a influência de fatores que vão além dos custos e das questões tecnológicas, é necessário considerar também os canais de distribuição e comércio, sem isto não haverá a orientação estratégica necessária para implementar corretamente o projeto.

Para atingir os objetivos deste estudo foi, primeiramente desenvolvido um forno para a torrefação de biomassa, o qual pode ser utilizado para a produção em pequena escala. De forma que possa adaptar-se as características dos produtores regionais. Também, foi realizado um estudo para identificar os potenciais consumidores de biomassa torrefeita e determinar o tamanho e a estrutura destes mercados. Este processo de recopilção de

informação de mercado foi o suporte estratégico utilizado para definir algumas das possíveis vias para inserir o processo e os produtos da torrefação no mercado, e fazer uma análise de viabilidade técnico-econômico-financeira deste processo.

1.3 Objetivos

Os objetivos básicos deste trabalho são estudar e fundamentar as vias para introduzir a torrefação no mercado de insumos energéticos:

1. Propor uma unidade de torrefação destinada ao uso de pequenos e médios produtores.
2. Identificar e caracterizar os mercados que futuramente podem vir a consumir biomassa torrefeita.
3. Estudar a viabilidade econômico-financeira do processo de torrefação e fundamentar as vias para introduzir a biomassa torrefeita no mercado.

Capítulo 2

Aspectos Teóricos e Práticos da Torrefação

Esta parte trata dos aspectos teóricos e práticos da torrefação. Seu objetivo é mostrar, as características principais do processo e seus produtos, assim como o estado da arte. Neste capítulo, é desenvolvido um modelo matemático que descreve os fenômenos físicos e químicos que ocorrem durante o processo de torrefação. Através deste modelo se realiza um estudo da influência de algumas variáveis no processo, e também são estimados alguns parâmetros úteis para o projeto de sistemas de torrefação.

2.1 O processo de torrefação

Na década de 1930, o processo de torrefação já era conhecido e praticado na França (Bouteille, 1937). Naquela época o principal objetivo deste processo era produzir combustíveis para gasogênios, pois a madeira torrefeita apresentava um melhor desempenho na gaseificação que a madeira *in natura*. Com o decorrer do tempo, os gasogênios caíram em desuso e o interesse pela torrefação foi diminuindo. Posteriormente, demonstrou-se que a aplicação deste combustível era muito mais variada, e então na década de 1980 um grupo francês de cientistas decidiu retomar as pesquisas sobre a torrefação, procurando estudar não apenas as aplicações na gaseificação, senão também outras, tais como a redução, e seu uso como combustível em fornos, caldeiras, e também no uso doméstico (Girard & Shah, 1991).

A torrefação de biomassa desenvolve-se entre 220 e 300°C, embora alguns autores recomendem não ultrapassar o limite de 280°C (Schwob, 1985). Nestas condições a umidade é removida e a hemicelulose degradada, provocando a liberação de ácido acético, frações de fenol e outros compostos de baixo poder calorífico. A lignina também sofre uma

ligeira despolimerização. O rendimento de conversão varia entre 60 e 80% em função das condições de temperatura em que se realiza o processo. O material resultante apresenta características intermediárias entre o carvão e a biomassa original. O processo de torrefação tem como objetivo concentrar a energia da biomassa em curto tempo e obter altos rendimentos, operando com baixas taxas de aquecimento e temperaturas moderadas para permitir que os voláteis de maior poder calorífico fiquem retidos no produto sólido denominado *Biomassa Torrefeita ou Torrificada* (Antal, 1990; Doat J, 1985).

Durante a torrefação podem ser identificados dois tipos de reações, classificadas em reações de termocondensação e carbonização (Bourgeois, 1990; Marcos Martin, 1989). Esta última é cineticamente lenta no domínio térmico da torrefação, mas pode crescer bruscamente acima de 250°C, com reações fortemente exotérmicas, o que pode conduzir a um aumento descontrolado da temperatura e, conseqüentemente a uma carbonização total do material. Portanto, para garantir que o processo se desenvolva no domínio térmico visado é necessário evacuar o calor gerado durante as reações parasitárias de carbonização. A experiência mostra que estas reações começam nos pontos mais aquecidos da biomassa e se propagam rapidamente ao resto do material, caso não seja evacuado o calor em excesso. Também é recomendado que a torrefação seja executada em uma atmosfera neutra ou redutiva, para inibir a oxidação ou ignição do material. A expressão termocondensação indica o processo no qual um material lenho-celulósico é submetido a reações químicas acompanhadas de eliminação de água e com eventuais reações de descarboxilação interna. É, em especial, o caso das reações que empregam heterociclos do tipo *Pentosano* que podem provocar, por formação de pontes, a eliminação de moléculas de água (Bourgeois, 1990). De acordo com o anterior, o processo de torrefação é um tratamento bem definido e notavelmente diferente da carbonização.

2.2 Características da biomassa torrefeita

As propriedades da biomassa torrefeita variam em função do tempo e temperatura de processamento (Bourgeois, 1985). Para cada combinação destas variáveis pode-se obter produtos de diferentes propriedades energéticas, pois os teores de voláteis e carbono fixo variam em função de cada combinação realizada (tabela 2.1). A biomassa torrefeita em condições isotérmicas se caracteriza por apresentar um conteúdo de hemi-celulose inferior

a 2%, de benzopireno inferior a 2 ppb, e aproximadamente 1,8 % de pentosanos residuais (Bourgeois, 1990). O padrão comum (Bourgeois, 1985) é caracterizado por:

1. Alta densidade energética: Os voláteis de alto teor energético são conservados no sólido.
2. Hidrofobia: Devido a transformações de caráter físico-químico a reabsorção de umidade é praticamente nula durante a armazenagem. A umidade de equilíbrio estabiliza-se em torno de 3%.
3. Bom Balanço de durabilidade-friabilidade: A biomassa torrefeita se torna friável, porém em menor grau que o carvão vegetal, o que facilita o manejo do material sem perdas consideráveis na forma de finos.

Processando diferentes espécies de madeira achou-se que o poder calorífico da madeira torrefeita se encontra entre 23 e 24 MJ/kg, e o teor de carbono fixo em torno de 28 a 31%, sempre em função da temperatura e o tempo de tratamento. Nesses experimentos obtiveram-se rendimentos gravimétricos entre 74 e 77%. Também, foi demonstrado que para a madeira processada a 280°C o poder calorífico teve um comportamento assintótico com relação ao aumento do tempo de residência, portanto prolongar o tempo de residência indiscriminadamente com objetivo de melhorar as características do produto final não oferece resultados favoráveis (Bourgeois., 1985).

Experimentos de torrefação realizados com briquetes de resíduos de madeira, no Grupo Combustíveis Alternativos (GCA), demonstraram a viabilidade deste procedimento para melhorar as características dos briquetes e mostraram a importância relativa dos parâmetros de torrefação. Por exemplo, como pode ser observado na tabela 2.1, a temperatura tem uma influência predominante no processo, pois quando a temperatura é aumentada em 22,7% (de 220 a 270°C) o poder calorífico aumenta em média 10%. Entretanto, aumentos do tempo de residência de até 200% (de 0,5 a 1 hora) proporcionam apenas 4% de incremento no poder calorífico (Fonseca Felfli, et alii, 1999; Fonseca Felfli, 1999). Também é importante destacar a resistência à umidade, demonstrada submetendo os briquetes torrefeitos a imersão em água. Os briquetes torreficados permaneceram inalterados, enquanto que os briquetes sem tratamento se desintegraram em apenas 10

minutos. Isto demonstra o caráter hidrófobo da biomassa torrefeita. Resultados similares foram obtidos por outros pesquisadores (Bhattacharya., 1990).

Tabela 2.1 Caracterização de briquetes de resíduos de madeira torreficados.

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

Fonte: Fonseca Felfli, 1999.

A biomassa torrefeita possui algumas vantagens com relação ao carvão vegetal. Por exemplo, com 80% de rendimento gravimétrico durante a torrefação se produz um combustível com poder calorífico de 22 560 kJ/kg, o qual representa um teor energético 24% maior que a produção de carvão em sistema pressurizado com 45% de rendimento mássico e poder calorífico superior de 30 000 kJ/kg. Ou seja, em termos de conversão energética a torrefação é mais vantajosa.

De acordo com a literatura e as experiências prévias, pode-se afirmar que a biomassa torrefeita é um produto bem definido, com características padronizadas e particulares, que o diferenciam do carvão vegetal.

2.3 Aplicações da biomassa torrefeita

O controle dos parâmetros de torrefação permite que possam ser produzidos combustíveis para diferentes propósitos. São varias as aplicações práticas, por exemplo:

Combustível industrial e doméstico: Combustível para uso industrial e doméstico. Segundo Bourgeois (1985) o fato de a biomassa torrefeita possuir baixas emissões de fumaças durante a combustão, além de poder ser estocada por longos períodos, facilita seu uso doméstico. Industrialmente, pode ser utilizada para a produção de eletricidade através da queima em caldeiras para a produção de vapor. Também outra alternativa e seu uso na

co-combustão com carvão mineral, o que traria benefícios ambientais pela redução de emissões de dióxido de enxofre (Arcate, 2002).

Redução: Devido às características peculiares da madeira torrefeita esta apresenta potencialidade para ser aplicada como redutor na indústria eletrometalúrgica. Ensaios realizados num forno para a redução de silício, o qual requer redutores reativos e de alta resistência mecânica, indicaram que a madeira torrefeita teve um melhor desempenho que a mistura de carvão e madeira tradicionalmente usada para estes propósitos (Girard & N Shah, 1991).

Gaseificação: Devido ao alto grau de padronização da madeira torrefeita, sua utilização nos gaseificadores facilita a regulação e otimização destes equipamentos. Embora este combustível possua menor valor energético específico que o carvão vegetal, seu uso é mais conveniente pois a madeira torrada é menos friável o que evita a formação de pó e portanto o gás obtido é mais limpo (Girard & N Shah, 1991).

Retificação: A madeira torrefeita também pode ser usada como excelente material de construção, pois esta combina três qualidades difíceis de encontrar em madeiras comuns: *hidrofobia, resistência mecânica e resistência às pragas*, esta é uma linha de pesquisa muito desenvolvida na França atualmente (Guyonnet, 1993).

2.4 Estado da arte para a torrefação de biomassa

As primeiras publicações sobre tecnologias de torrefação de madeira datam de inícios do século XX, mas o termo torrefação já era utilizado na França para designar o processo de aquecimento intenso de materiais (ouro e produtos químicos, assim como grãos) para eliminar a umidade. O termo “torrificado” tem origem na palavra francesa *torréfié* que por sua vez se deriva do latim *torrere*. Na década de 1930 já existiam patentes registradas sobre o processo de torrefação de madeira. Por exemplo, em 1937, M. Josef Bouteille propõe melhoramentos em um sistema contínuo para torrificar pequenos pedaços de madeira em um reator vertical contra-corrente. Neste sistema era utilizado ar como fluido aquecedor, e para evitar a oxidação da madeira era introduzido na corrente de ar um pequeno fluxo de vapores de hidrocarbonetos (Bouteille, 1937).

Na década de 1940 foram propostos diferentes procedimentos e tecnologias para produzir combustíveis torreficados, através do desfibramento da madeira, desidratação, torrefação e posterior aglomeração ou briquetagem (Bethenod et alli, 1942; Pinel, 1949; Barrier, 1951). Estas operações requerem infraestrutura de grande porte, e ainda, encontra-se a dificuldade de ter que, eventualmente, adicionar-se um ligante durante a operação de aglomeração do material.

É importante ressaltar que nos anos em que estas tecnologias foram propostas se deflagrava a Segunda Guerra Mundial. Na época havia uma necessidade estratégica de procurar alternativas aos derivados do petróleo. Portanto, é nesse cenário que se desenvolve a torrefação como método para melhorar a qualidade da madeira usada nos gasogênios, que eventualmente produziriam gás para substituir os derivados do petróleo. Com o fim da guerra e com os baixos preços do petróleo, os gasogênios entraram em desuso e conseqüentemente a torrefação deixou de ser interessante, até que na década de 1980 surgiu novamente o interesse na torrefação, mas desta vez se procuravam mais aplicações além de combustível para gasogênio. Neste período foram redefinidos alguns conceitos e procedimentos para a torrefação, estabelecendo-se de forma precisa os parâmetros e as características do processo (Schwob, 1985; Bourgeois, 1985).

Na literatura especializada são mencionadas algumas plantas demonstrativas desenvolvidas na França, nos anos 80. Uma delas foi implementada entre 1985 e 1988 com apoio financeiro da Comunidade Européia⁴ (Girard & N Shah, 1991). Este projeto foi executado pela companhia *Le Bois Torréfié du Lot*, localizada em Laval de Cere (*Pechiney Electrometallurgie*). Nesta planta a torrefação é realizada num forno rotatório com uma produção anual de 12 000 t (ver figura 2.1). A transferência de calor se efetua através do contato das paredes quentes do forno com a biomassa que é alimentada. As paredes do forno são aquecidas pelo vapor produzido numa caldeira. Para obter bons resultados a biomassa deve ser primeiramente seca e picada em pedaços de aproximadamente 10 mm antes de entrar no forno de torrefação. Esta unidade foi posta em operação desde início do ano 1987 para fornecer madeira torrefeita na redução do silício.

⁴ O projeto foi desenvolvido no marco do programa "European community demonstration projects for energy saving and alternative energy sources". Projeto BM/333/84-F: **Wood roasting unit**.

Os ensaios realizados tiveram sucesso: “a madeira torrefeita se mostrou mais reativa e com menos resistência elétrica que a tradicional mistura de carvão e madeira usada para tais propósitos (Girard . & N Shah , 1991)”.

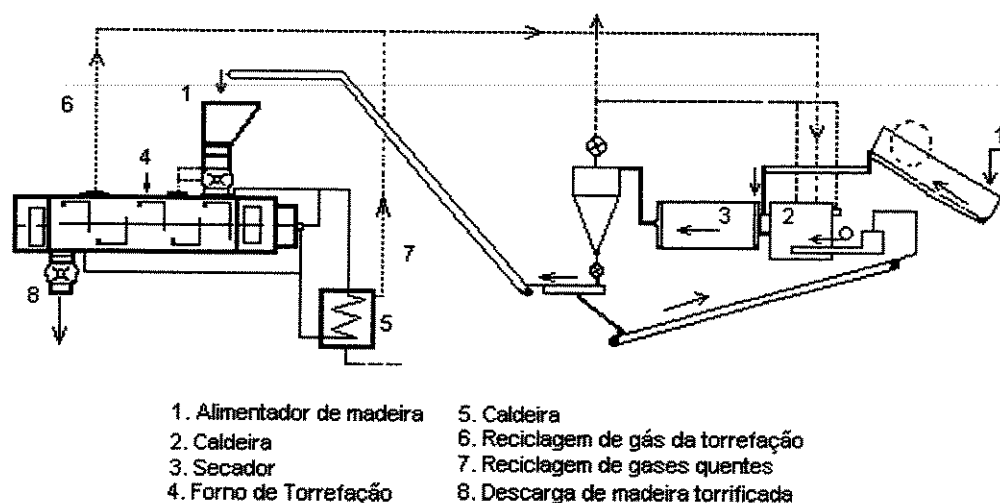


Figura 2.1 Planta de torrefação industrial em Laval de Cere .

Fonte: Girard & N. Shah, 1991.

Outra tecnologia, que também é mencionada na literatura, foi desenvolvida pela companhia francesa *Pillar*. A planta foi projetada para produzir 2000 toneladas por ano. O sistema estava composto de um forno de túnel, dentro do qual a madeira era transportada através de duas câmaras. Na primeira, realizava-se a secagem e na segunda a torrefação. O meio de aquecimento utilizado era o gás da combustão forçado a passar através da madeira. Na figura 2.2 pode-se observar um esquema desta planta. Nesse mesmo período, outras plantas de torrefação foram desenvolvidas e comercializadas por industriais Franceses. Por exemplo, uma planta com capacidade de 500 t por ano, desenvolvida pela firma *Fages Habermann*, e que consistia em dois reatores nos quais o gás passava forçadamente através da madeira. O objetivo desta planta era produzir madeira torrefeita para churrasqueiras e lareiras. Este sistema foi testado pelo *Center Technique Forestier Tropical (CTFT)* do instituto Cirad da França (Girard & N Shah , 1991).

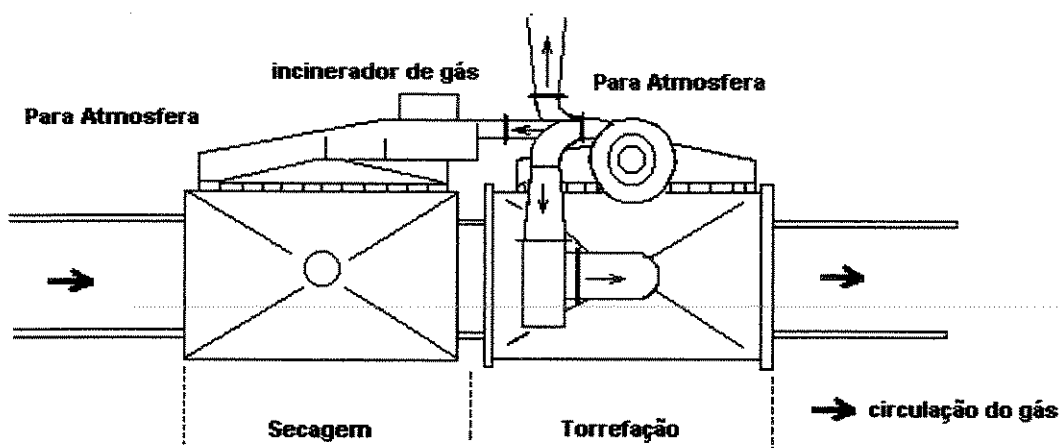


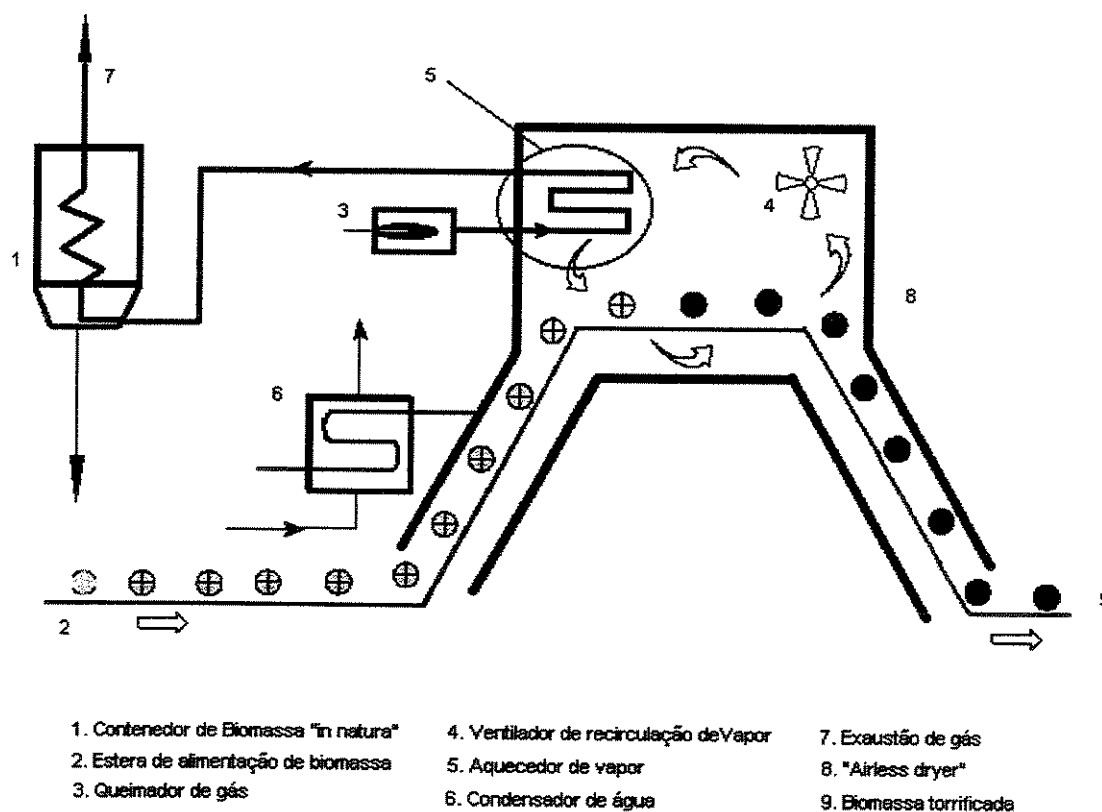
Figura 2.2 Planta Pillar. Fonte: Girard & N. Shah, 1991.

A maior parte das tecnologias propostas estava encaminhada ao preparo de materiais em estado muito dividido. Por exemplo, Leclerc de Bussy propõe um processo que inclui a preparação e homogeneização do material lenho-celulósico em pedaços de 15 mm de comprimento e 5 a 20 mm de diâmetro, e sua secagem seguida de torrefação. Neste procedimento propõe-se que os materiais a torreficar sejam os rejeitos dos cultivos processados em colheitadeiras mecanizadas. Para o tratamento térmico propõe-se um reator vertical onde o material é atravessado por um fluxo de gás a alta velocidade. Os processos de secagem, torrefação e resfriamento ocorrem no mesmo reator (Leclerc de Bussy, 1988).

Outro exemplo de tecnologia para processar materiais dispersos é a proposta por Bourgeois (1989), o qual propõe um processo de termocondensação de materiais lenho-celulósicos. O material é obtido por torrefação isotérmica durante 30 minutos num forno horizontal com correntes cruzadas entre o material tratado e gases quentes. Este forno possui dispositivos de agitação para transportar e homogeneizar o material e um gerador de gases, os quais são postos em circulação por um ventilador. Este forno opera com materiais em estado muito dividido e previamente em estado seco. Já Gerar e Cimetière propõem a torrefação contínua de materiais úmidos de pequenas dimensões; num forno, seca-se o material até 180°C e, em seguida, realiza-se a torrefação em outro forno a 280°C em uma atmosfera carregada de vapor d'água, o qual é extraído do forno de secagem. Ambos os

fornos encontram-se num mesmo recinto fechado, disposto horizontalmente e dotado de meios para o transporte do material (Gerar & Cemitière, 1989).

Recentemente uma tecnologia para secagem de materiais celulósicos com vapor superaquecido (Stubbing, 1998) também tem sido recomendada para torrefação de biomassa. Nesta invenção, a biomassa é torrefeita através de vapor superaquecido, o qual é reciclado entre a biomassa e um sistema de aquecimento que fornece a energia necessária para o processo (ver figura 2.3). Esta tecnologia tem a particularidade de pode torrefazer pedaços de madeira ou briquetes com dimensões relativamente grandes, porém é recomendável para produção em grande escala devido à complexidade do sistema (Arcate, 2000).



*Figura 2.3 Sistema "Airless Drying" para Torrefação de biomassa.
 Fonte: Arcate.,2000.*

Como se pode ver, existe uma diversidade de tecnologias para a torrefação, desde as mais simples até as mais complexas. No entanto, a maioria foi projetada para o processamento de material em pequenas dimensões e poucas oferecem solução para o processamento de pedaços grandes de madeira ou briquetes de biomassa. Outro aspecto comum é a escala de produção. Todas as propostas são para produções em grande escala, e praticamente não existem tecnologias para produção em pequena escala. Estes dois aspectos devem ser considerados para a introdução da torrefação no Brasil, pois as condições locais apontam, em primeira instância, que a melhor forma de introduzir este processo seria propondo um sistema de produção em pequena ou média escala e que processe pedaços grandes de madeira ou briquetes. Estas considerações serão tratadas posteriormente em mais detalhes neste estudo.

2.5 Modelagem matemática do processo de torrefação

A simulação numérica é uma ferramenta muito utilizada no projeto ou diagnóstico de sistemas de conversão térmica (Antal, 1985), pois os custos são consideravelmente menores que a simulação através de maquetes ou modelos em escala reduzida. Considerando isto, neste trabalho é proposto um modelo matemático para a simulação do processo de torrefação. O objetivo básico do modelo é servir de ferramenta para o cálculo de parâmetros úteis para o projeto de unidades de torrefação, ou seja uma ferramenta de orientação e não apenas um modelo de estudo paramétrico.

Para realizar o projeto de um forno de torrefação é necessário o conhecimento prévio de parâmetros tais como: tempo mínimo de torrefação, consumo energético e rendimento gravimétrico do processo, entre outros. O modelo proposto permite estimar a grandeza destes parâmetros. Em trabalhos anteriores (Fonseca Felfli, 1999), foram apresentadas as bases para este modelo, porém na ocasião a umidade da biomassa não era considerada na simulação. O modelo que, a seguir, será apresentado é uma versão mais aprimorada, pois considera a umidade da biomassa e portanto descreve de forma mais coerente o processo de torrefação. Nesta versão também foram incluídas equações para o cálculo do calor consumido no processo.

2.5.1 Descrição do modelo físico-químico

Quando um briquete ou uma tora de madeira é submetido a temperaturas entre 220 e 300°C, o calor é conduzido ao interior do sólido produzindo ondas de aquecimento que desencadeiam frentes de secagem e pirólise que se deslocam na mesma direção e com intensidade proporcional ao fluxo de calor. A umidade migra das camadas mais internas do material, por meio de mecanismos de difusão e capilaridade, até atingir a frentes de secagem onde é evaporada. O vapor d'água produzido se desloca fora do sólido por mecanismos de convecção e difusão. Devido à formação de gradientes de pressão internos, uma pequena porção do vapor d'água retorna às camadas mais profundas do sólido, que ainda não foram degradadas, e se desencadeia um fenômeno conhecido como recondensação (Kenneth et alli, 2002; Kenneth & Mathew, 2003).

As reações de pirólise desencadeiam-se na superfície quando a temperatura ultrapassa 180°C. Isto forma uma zona de pirólise que penetra no material na medida que as camadas internas ultrapassam o limite de 180°C. Este efeito cria uma frente de reações de degradação primária, com caráter endotérmico (Di Blasi & Russo, 1994). As reações exotérmicas começam quando a temperatura se aproxima de 250°C, porém, são desprezíveis em comparação à magnitude das reações endotérmicas que ocorrem abaixo de 300°C. Durante a torrefação, não ocorrem reações secundárias, ou seja, não há produção de carvão nem gás secundário porque as temperaturas não são suficientemente altas para que isto ocorra. Os voláteis deixam o interior do sólido por meio de mecanismos convectivos, e ao passarem pela superfície provocam um efeito de resfriamento devido à troca de calor (com as camadas externas que estão a temperaturas maiores). Com o avanço das reações, as propriedades físicas e químicas do sólido variam, provocando que as taxas de aquecimento sejam variáveis. Devido à existência de micro-poros e poros na biomassa, ocorre acúmulo de voláteis, provocando gradientes de pressão que acabam produzindo rupturas internas e portanto aumentado a porosidade do sólido, assim como variações na geometria (Kenneth & Mathew, 2003).

Para modelar os fenômenos descritos acima foram realizadas simplificações: (i) os fenômenos de transporte de calor e massa ocorrem de forma unidimensional; (ii) durante a torrefação não ocorrem mudanças geométricas no sólido; (iii) os voláteis e o vapor d'água

estão a todo instante em equilíbrio térmico com o sólido; (iv) a difusão das espécies no interior dos poros é desprezível; (v) a migração por capilaridade d'água ligada quimicamente é desprezível; (vi) não ocorre re-condensação do vapor de água; (vii) a permeabilidade do sólido é assumida como suficientemente grande para que não se formem gradientes internos de pressão; (viii) o calor sensível da fase gasosa no interior do sólido é desprezível.

A primeira consideração pode ser aplicada em casos nos quais os fenômenos de transporte se desenvolvem na direção em que menor resistência térmica e fluidodinâmica existe (Kenneth et alli, 2002). Como os briquetes e as toras de madeira geralmente têm formato cilíndrico, quando a relação diâmetro/comprimento (d/l) é menos que 2 o fenômeno ocorre na direção radial, e quando d/l é maior que 2 o fenômeno ocorre longitudinalmente. A segunda simplificação do modelo está baseada no fato de que durante a torrefação não ocorre uma degradação intensa, apenas ocorre despolimerização da hemicelulose e a perda de massa é relativamente pequena (ver subtítulo 2.2). A terceira e oitava simplificações podem ser aceitas, já que a quantidade de calor absorvida na matriz sólida é aproximadamente 650 vezes superior que a quantidade absorvida nos voláteis (Wai-Chun et alii, 1985). A quarta simplificação tem bases em estudos comparativos entre as forças de transporte e difusão de fluxos mássicos (Wai-Chun et alii, 1985). Estes estudos mostraram que o transporte de massa por difusão é desprezível em comparação ao fluxo hidrodinâmico provocado pela destilação térmica. Da mesma maneira o movimento da água ligada quimicamente é desprezível se comparado ao fluxo hidrodinâmico do vapor formado. A sexta e sétima simplificações podem ser aplicadas se o fluxo de voláteis e vapor d'água é moderado. Durante a torrefação, a emissão destas substâncias é relativamente moderada, portanto a simplificação pode ser aplicada (Alves & Figueiredo, 1989).

Para modelar a cinética da torrefação foi adotado um esquema no qual se admite o desencadeamento simultâneo das reações em dois estágios, pirolisando a biomassa em gás (K_1), alcatrão (K_2) e carvão (K_3) (Wai-Chun et alii, 1985; Di Brasi, & Russo, 1994; Larfeld, et alii, 2000; Malaaem & Gronli, 1995; Kenneth et alii, 2002; Kenneth & Mathew, 2003). As taxas de reações são modeladas através da relação de *Arrhenius* de primeira ordem em função da temperatura. Mediante este tipo de esquema, podem ser estudadas separadamente a conversão do sólido e as emissões de voláteis (ver figura 2.4).

Vários modelos de secagem já foram propostos (Wai-Chun et alii, 1985; Alves & Figueiredo, 1989; Bilbao et alii, 1996; Malaaem & Gronli, 1995). Todos admitem a existência de uma frente de secagem que se desloca ao interior da biomassa. No modelo aqui apresentado é adotado o esquema proposto por Wai-Chun et alii (1985), no qual o processo de secagem é tratado como uma reação química que ocorre simultaneamente com a pirólise. A taxa de evaporação é modelada segundo uma reação química heterogênea de primeira ordem que segue a lei de *Arrhenius* (equação 2.1).

$$r_{ev} = x\rho_w A_0 \exp(-E_0 / RT) \quad (2.1)$$

Onde r_{ev} é a taxa de evaporação da umidade ($\text{kgm}^{-3}\text{s}^{-1}$), x fração de umidade no sólido, ρ_w densidade da biomassa (kgm^{-3}), A_0 fator pré-exponencial (s^{-1}), E_0 energia de ativação (kJmol^{-1}), R representa a constante universal dos gases ($\text{kJmol}^{-1}\text{K}^{-1}$) e T temperatura (K). Esta expressão é implementada numericamente em conjunto com as expressões para a pirólise (também expressas pela lei de *Arrhenius*). Na figura 2.4 é mostrado o esquema cinético adotado nesta modelagem.

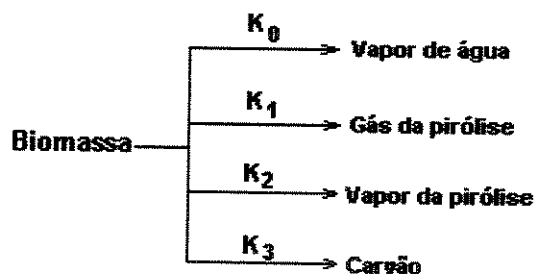


Figura 2.4 Esquema cinético da pirólise a temperaturas inferiores a 300°C .

2.5.2 Formulação matemática

O equacionamento matemático do fenômeno foi realizado aplicando as leis fundamentais de conservação da massa e da energia num volume de controle infinitesimal numa geometria cilíndrica (ver anexo I). Para solucionar o sistema de equações diferenciais foi aplicado o método das diferenças finitas para equações diferenciais parabólicas.

As equações de conservação das espécies sólidas podem ser escritas como:

$$\frac{\partial \rho_w}{\partial t} = -(K_1 + K_2 + K_3)\rho_w \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial \rho_c}{\partial t} = K_3\rho_w \quad (2.3)$$

Onde ρ_w e ρ_c são a densidade aparente (kgm^{-3}) da madeira e o carvão respectivamente, K_1 e K_2 são as taxas de reação das espécies sólidas de acordo com o esquema cinético adotado (ver eq. 2.10)

A equação de continuidade e conservação das espécies gasosas é:

$$\frac{\partial}{\partial r^n} (r^n \rho_g u) = (K_1 + K_2)\rho_w \quad (2.4)$$

Onde ρ_g é a concentração mássica dos voláteis da pirólise (kgm^{-3}), u representa a velocidade dos voláteis (ms^{-1}) e o termo n é um parâmetro geométrico ($n = 1$ para um cilindro e $n = 0$ para um disco).

Equação de balanço da umidade:

$$\frac{\partial (x\rho_w)}{\partial t} = -r_{ev} \quad (2.5)$$

Onde o termo x representa a fração de umidade contida na madeira, e r_{ev} é a taxa de evaporação da umidade (ver eq. 2.1).

Equação de continuidade para o vapor da água:

$$\frac{\partial}{\partial r^n} (r^n \rho_v u) = r_{ev} \quad (2.6)$$

Onde ρ_v é a densidade do vapor de água (kgm^{-3}) e u representa a velocidade do vapor (assume-se igual à dos voláteis). A equação da conservação do calor é:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} [(\rho_w c_w + \rho_c c_c + x\rho_w c_M)T] \\ & = \frac{\partial}{\partial r^n} \left(r^n k_{eff} \frac{\partial T}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial t} [(\rho_g u c_g + \rho_v u c_v)T] - \sum_{i=1}^3 \Delta h_i r_i - \Delta h_{ev} r_{ev} \end{aligned} \quad (2.7)$$

Onde c_w , c_c e c_M são os calores específicos ($\text{kJkg}^{-1}\text{K}^{-1}$) da madeira, do carvão e da umidade respectivamente, T a temperatura na matriz sólida, k_{eff} ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) representa a condutibilidade (condutividade térmica) efetiva do sólido (eq. 8), Δh_i é o calor das reações químicas (kJkg^{-1}), r_i representa a taxa de conversão das espécies (eq. 11) e Δh_{ev} é o calor para evaporar a umidade (kJkg^{-1}).

A condutibilidade efetiva pode se calculada de:

$$k_{eff} = \Phi k_w + (1 - \Phi) k_c \quad (2.8)$$

Onde k_w e k_c são a condutibilidade da madeira e do carvão respectivamente. O fator de interpolação Φ pode ser calculado de:

$$\Phi = \frac{\rho_w}{\rho_{w0}} \quad (2.9)$$

As taxas de reação no sólido são estimadas pela seguinte expressão:

$$K_i = A_i \exp(-E_i / RT) \quad 1 \leq i \leq 3 \quad (2.10)$$

Onde A_i corresponde ao fator de frequência, E_i a energia de ativação e R a constante universal dos gases.

As taxas de conversão no sólido são calculadas através de:

$$r_i = K_i \rho_w \quad 1 \leq i \leq 3 \quad (2.11)$$

Condições iniciais e de fronteira:

Para $t=0$, $\forall r$:

$$T=T_0 \quad (2.12)$$

$$\rho_w = \rho_0 \quad (2.13)$$

$$\rho_c = 0 \quad (2.14)$$

$$u = 0 \quad (2.15)$$

Para $r=0$, $\forall t$:

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad (2.16)$$

$$u = 0 \quad (2.17)$$

Para $r=R$, $\forall t$:

$$-k_{eff} \frac{\partial T}{\partial r} = h(T - T_f) \quad (2.18)$$

Onde h é o coeficiente de transferência de calor superficial e T_f a temperatura do meio ambiente. O cômputo da taxa instantânea de calor transferida no sólido pode ser realizado por:

$$\dot{q}_u = \int_0^R 2\pi r l (k_e) \frac{dT}{dr} \quad (2.19)$$

Onde r é o raio da tora ou briquete e l o comprimento. Cômputo do calor total transferido no processo:

$$q_u = \int_0^t \dot{q}_u dt \quad (2.20)$$

Em todas as equações, t representa o tempo e r a dimensão linear na direção da troca de calor e massa. Para validar o modelo foi realizada uma série de experimentos nos quais se utilizaram pequenos cilindros de pinho. Estas amostras foram torrefeitas em um forno com aquecimento elétrico automático. As experiências foram realizadas a temperaturas entre 130 e 280°C, e os resultados mostraram que o modelo descreve satisfatoriamente o processo de torrefação. No anexo I são mostrados os detalhes desta validação experimental.

2.5.3 Simulação numérica: resultados e discussão.

Durante o projeto ou avaliação de um sistema de torrefação é importante determinar o tempo mínimo para que o material seja totalmente torreficado, o calor utilizado no processo, a taxa de conversão, e o fluxo de voláteis entre outros parâmetros. De acordo com a literatura, esses parâmetros variam em função do tamanho, da umidade, da temperatura e

da intensidade com que se efetua a troca de calor entre a biomassa e o meio ambiente (Bourgeois,1985; Schwob,1985). É possível fazer uma correlação experimental entre as variáveis mencionadas. Entretanto, algumas são de difícil manejo, como por exemplo, a umidade da biomassa e a intensidade de transferência de calor. Isto torna difícil e oneroso os ensaios experimentais. Portanto, o mais viável é utilizar um modelo matemático como ferramenta de estudo e diagnóstico. Com bases nesta análise foi realizada uma simulação numérica com intuito de estudar algumas particularidades da torrefação, e determinar a influência do tamanho, a umidade, e a intensidade de transferência de calor, no tempo mínimo necessário para a torrefação.

2.5.3-a Processos e particularidades da torrefação de uma tora de madeira.

Com intuito de estudar alguns fenômenos durante a torrefação foi realizada uma simulação numérica considerando uma tora de eucalipto com diâmetro de 0,1 m e comprimento de 0,5 m (estas dimensões são comumente utilizadas na colheita da lenha). Também foi assumida uma umidade de 15% (b.s.), e $60 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ durante a troca térmica na câmara de torrefação. A temperatura do gás de aquecimento foi considerada como 300°C . As propriedades físicas utilizadas na simulação são as seguintes: $C_w = 1,5 \text{ kJkg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $C_c = 1,1 \text{ kJkg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $C_g = 1,1 \text{ kJkg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $k_w = 16,6 \times 10^{-2} \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $k_c = 7,1 \times 10^{-2} \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $\rho_0 = 500 \text{ Kgm}^{-3}$ (Di Blasi & Russo, 1994).

Os parâmetros cinéticos utilizados durante a simulação foram adotados segundo Wain-Chun et alli (1985). Na tabela 2.2, são mostrados os valores destes parâmetros. É importante ressaltar que o jogo de dados cinéticos adotados aqui é apenas um entre muitos outros propostos por diferentes autores. Na realidade, a cinética pode variar em função de muitos fatores, começando pelo tipo de biomassa. O critério para utilizar os dados propostos fundamentou-se na coerência dos resultados obtidos pelo autor (Wain-Chun et alli, 1985), entretanto vale destacar que outros dados também têm mostrado coerência nos resultados.

Tabela 2.2 Parâmetros usados para as reações de secagem e pirólise.

Reação	A_i (s ⁻¹)	E_i (kJmol ⁻¹)	Δh_i (kJkg ⁻¹)
<i>Secagem:</i>			
K_0 Umidade → vapor d'água	$5,13 \times 10^6$	88	2 257
<i>Pirólise:</i>			
K_1 Madeira → gás	$1,30 \times 10^8$	140	418
K_2 Madeira → vapor pirólise	$2,00 \times 10^8$	133	418
K_3 Madeira → carvão	$1,08 \times 10^7$	121	418

Fonte: (Wain-Chun et alli, 1985)

Antes de apresentar os resultados da simulação é necessário realizar alguns comentários com relação às hipóteses assumidas na modelagem. Na simulação considerou-se que o coeficiente de transferência de calor é constante em toda a superfície da tora (60 W/m²K). No processo real não é exatamente assim, pois a presença de outras toras dentro da câmara de torrefação afeta as demais. Durante a simulação considerou-se que a temperatura na camada limite em torno da tora é constante, mas a rigor acontecem flutuações da temperatura. Apesar das simplificações efetuadas no modelo, os resultados obtidos podem ser válidos para estudar o processo de torrefação e estimar alguns parâmetros de projeto.

Na figura 2.5 são mostrados os perfis de temperatura em 10 pontos da tora durante a torrefação. A distância entre cada ponto analisado corresponde a 0,005m. Na figura observa-se que na superfície ocorre um rápido aquecimento provocando que as propriedades físico-químicas se transformem de forma rápida e diferenciada com relação às demais regiões da tora. Isto propicia a criação de uma capa superficial muito fina com características similares ao carvão obtido a 450°C, e que funciona como uma barreira isolante, pois a condutividade térmica está na ordem de 8×10^{-2} Wm⁻¹K⁻¹ (ver figura 2.6). Deste modo, a condução do calor ao interior da madeira é mais difícil na medida que as sucessivas camadas de madeira são torrefeitas. Isto explica, em parte, a dificuldade de obter perfis de temperaturas homogêneos no interior da tora durante o processo. A rigor isto significa que a resistência térmica para conduzir o calor no interior do sólido é muito maior que a resistência térmica para transferir calor nas fronteiras deste.

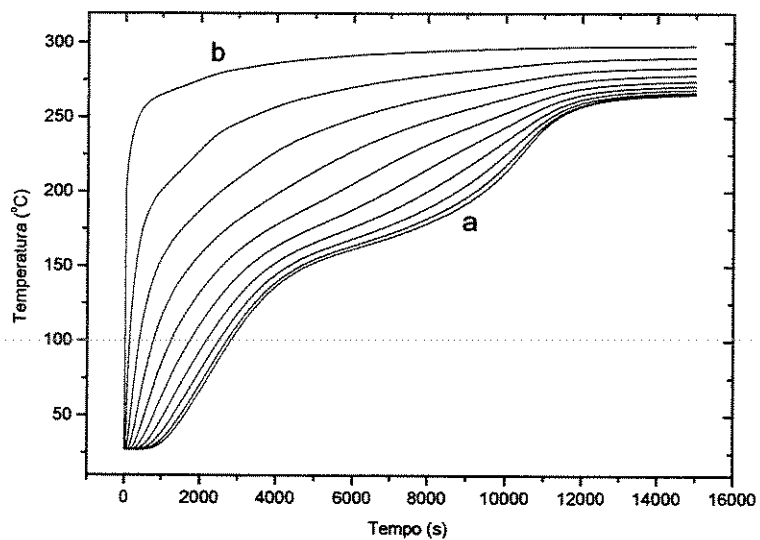


Figura 2.5 Perfis de temperatura em função do tempo e da posição. centro da tora, $r=0$ (a), superfície da tora, $r=0,05$ m (b).

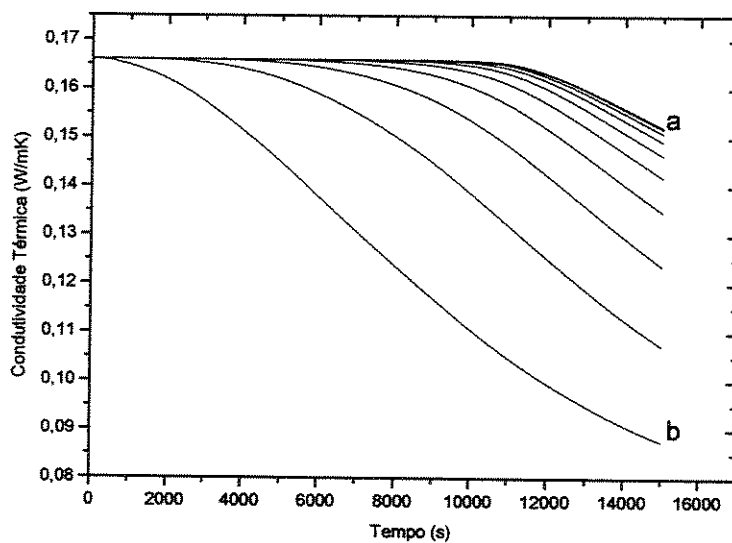


Figura 2.6 Perfis de condutividade térmica em função do tempo e da posição. centro da tora, $r=0$ (a), superfície da tora, $r=0,05$ m (b).

O numero de *Biot* (Bi) indica a relação que existe entre a transferência de calor interna e externa em um fenômeno de condução transiente, este critério pode ser calculado através da equação 2.21.

$$Bi = \frac{hr}{k_{eff}} \quad (2.21)$$

Segundo Incropera & De Witt (1990) para $Bi \ll 1$ a condução predomina sobre a convecção, e para $Bi \gg 1$ a convecção predomina, transferindo-se calor com menos intensidade ao interior do sólido do que na superfície. A última condição se confirma neste caso específico como pode ser observado na figura 2.7.

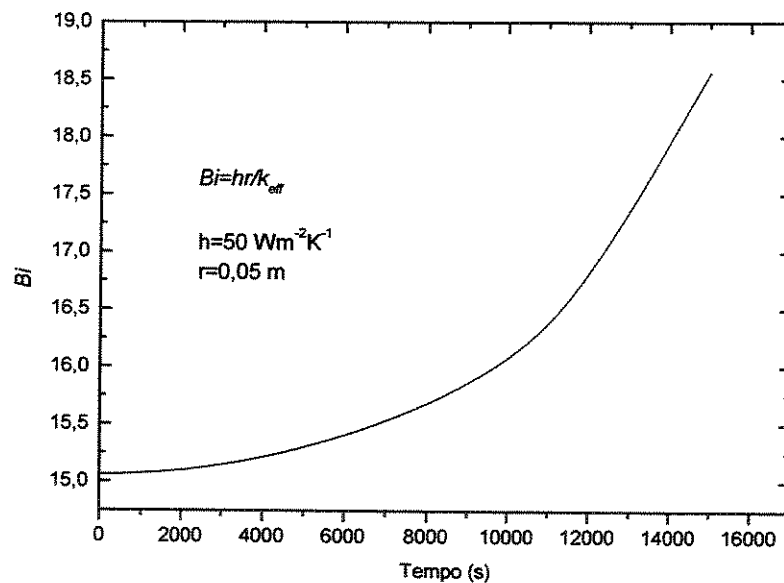


Figura 2.7 Numero de Biot em função do tempo durante a torrefação da tora de madeira. $r=0,05m$, $h=50Wm^{-2}K^{-1}$.

Como $Bi \gg 1$, confirma-se que realmente a intensidade de transferência de calor no interior do sólido é muito menor do que na superfície, onde a transferência se efetua por convecção. Na medida que o tempo transcorre, este efeito se acentua mais. Isto explica a existência de gradientes térmicos no interior da tora durante a torrefação e a dificuldade de diminuí-los, mesmo aumentando o tempo de permanência da tora.

Baseando-se nas observações anteriores, pode-se concluir que existe um tempo máximo “econômico” de permanência da tora, pois como se observa na figura 2.5, a partir de 3,3 horas de processo a homogeneização da temperatura dentro da tora é cada vez mais difícil. Nas camadas próximas ao centro, o aquecimento é desacelerado entre 120 e 150°C, pois nessa faixa de temperaturas ocorre a secagem da umidade. Nas camadas mais próximas à superfície não se observa essa desaceleração pois o fluxo de calor transferido nestas camadas é muito maior que o demandado para a secagem.

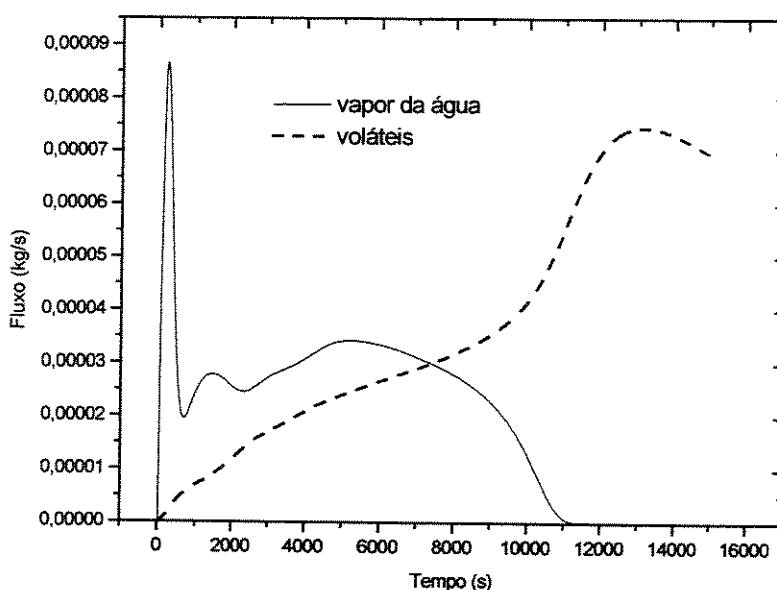
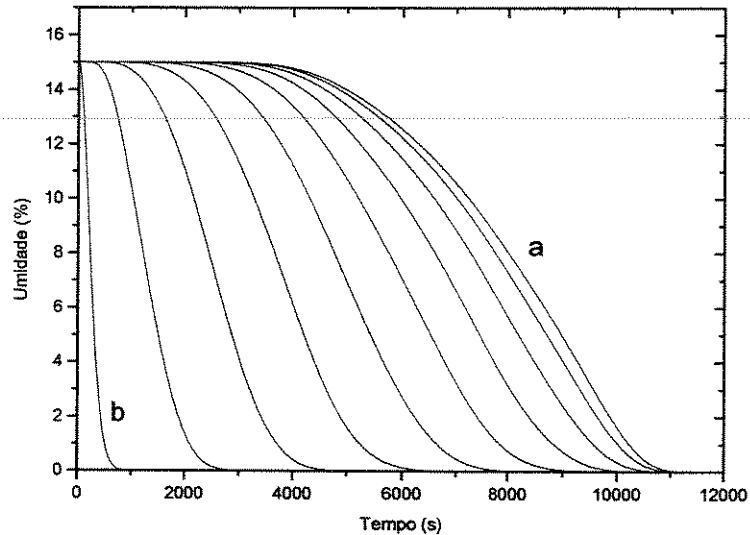


Figura 2.8 Fluxos de vapor d'água e gases da torrefação em função do tempo.

A figura 2.8 mostra a evolução dos gases da torrefação e o vapor d'água durante o processo. No início, observa-se uma grande emissão de vapor d'água, mas depois de transcorridos alguns segundos o fluxo começa a decrescer aceleradamente. Isto ocorre porque no começo as camadas superficiais sofrem um rápido aquecimento, propiciando-se uma violenta remoção da umidade, entretanto, quando toda a umidade dessas camadas é evaporada o fluxo de vapor decresce rapidamente porque as camadas internas ainda não atingiram a temperatura de início da secagem. À medida que as sucessivas camadas são aquecidas, o fluxo de vapor d'água torna a crescer (700 seg. depois de iniciado o processo)

e a partir deste instante, a taxa de secagem permanece praticamente constante até o final da secagem (3 horas e 10 min.) (ver figura 2.9).



*Figura 2.9 Perfis de umidade em função do tempo e da posição.
centro da tora, $r=0$ (a), superfície da tora, $r=0,05$ m (b).*

A pirólise ocorre simultaneamente com a secagem. No início do processo o fluxo de voláteis da pirólise é menor que o fluxo de vapor d'água. Entretanto, à medida que a umidade é removida, o fluxo de voláteis aumenta, sendo mais notável este fenômeno a partir do instante em que toda a umidade é eliminada (figura 2.8).

De acordo com a simulação, pode-se concluir que existe um tempo econômico de permanência da tora para ser torrefeita. Por outro lado, as reações de pirólise se aceleram à medida que a umidade é removida, pois o vapor d'água atua como um agente regulador do fluxo térmico, e uma vez que ele é eliminado, o sólido recebe a totalidade do calor. Por esta razão, no final do processo podem aparecer reações parasitas de carbonização. Para evitá-las, é importante manter um regulador de fluxo térmico no final do processo.

Outros resultados úteis para o projeto de um sistema de torrefação são mostrados na tabela 2.3.

Tabela 2.3 Parâmetros de projeto, obtidos da simulação para uma tora de madeira com 0,1 m de diâmetro e 15% de umidade.

Tempo total de torrefação (t)	4:10 horas
Tempo de secagem (t_s)	3: 10 horas
Taxa média de calor utilizado	0,43 kW
Taxa média de calor utilizado por quilo de madeira	0,19 kWkg ⁻¹
Rendimento gravimétrico (b.s)	72%
Taxa média de evaporação	0,10 kgh ⁻¹
Taxa média de emissão de voláteis	0,134 kgh ⁻¹

2.5.3-b Influência da transferência de calor, da umidade e do tamanho da biomassa no tempo mínimo de torrefação

É importante ressaltar que os resultados acima discutidos são apenas para uma condição pré-definida (diâmetro 10 cm e umidade 15%). Os resultados podem ser diferentes para outras condições. Por esta razão, foram realizadas simulações em diferentes condições. Com intuito de estudar a influência da umidade, do tamanho e da transferência de calor no tempo mínimo de torrefação (τ_m -tempo necessário para que o centro da madeira seja torreficado).

A experimentação numérica foi planejada utilizando um esquema no qual o raio da tora variou entre 1 cm e 5 cm, a umidade entre 0 e 20% e o coeficiente de transferência de calor superficial entre 50 e 150 Wm⁻²K⁻¹. O objetivo foi estimar a importância relativa de cada variável em τ_m . Para realizar as simulações foram utilizados os dados cinéticos e as propriedades mostradas na tabela 2.2.

De acordo com esta abordagem, na simulação estão envolvidas três variáveis independentes e uma variável dependente (τ_m), portanto para representar graficamente os

resultados deve-se fixar ao menos uma variável. Na figura 2.10 é representada a variação de τ_m em função da umidade e do diâmetro da tora, para um coeficiente de transferência de calor superficial de $50 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$.

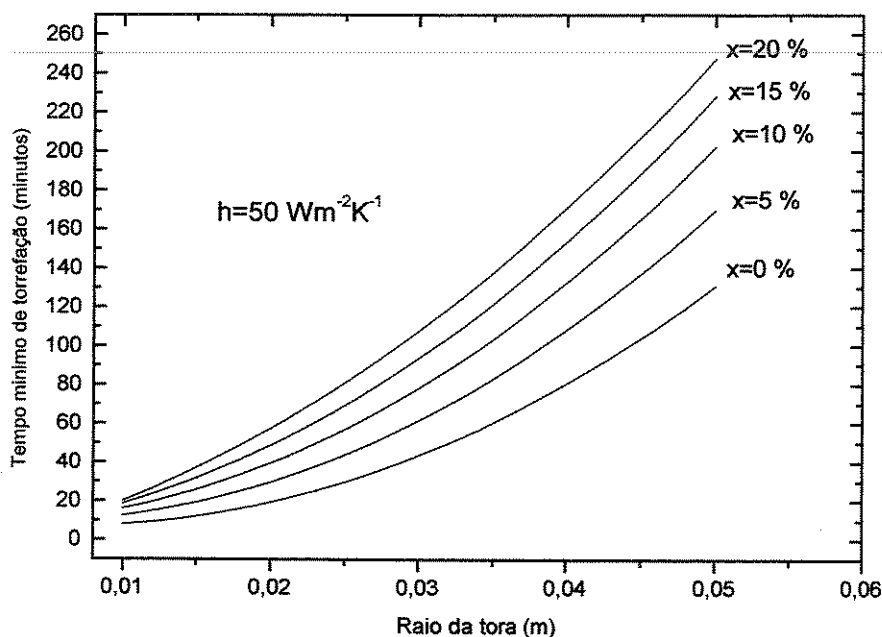


Figura 2.10 Comportamento do tempo mínimo de torrefação em função do raio e da umidade(x). Coeficiente de transferência de calor $50 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$.

A figura 2.10 mostra que τ_m aumenta de forma quadrática em função do diâmetro da tora, independentemente da umidade. Já para um diâmetro fixo com variação da umidade, pode-se observar que o comportamento de τ_m é praticamente linear. O efeito da umidade é mais evidente na medida que o diâmetro da tora é maior. Por exemplo, para um raio de 0,01m quando a umidade aumenta de 0 a 20%, o τ_m aumenta de 8 para 20 minutos (12 minutos). Entretanto, para um raio de 0,05 m, o aumento vai de 130 para 247 minutos (117 minutos). Outra conclusão que se deduz da figura 2.10 é que o diâmetro tem maior influência do que a umidade. Por exemplo, para um raio de 0,05 m e umidade variando de 0 a 20% τ_m aumenta em 117 minutos, mas para uma umidade fixa de 20% e o raio variando de 0,01 a 0,05 o tempo praticamente dobra (227 minutos).

A figura 2.11 mostra a variação do τ_m em função do raio e do coeficiente de transferência de calor superficial para uma umidade de 10%; como se pode observar o efeito da transferência de calor no τ_m é mínima se comparada à influência do raio. Isto ocorre porque a resistência térmica do sólido aumenta mais rapidamente em função do raio do que o calor transferido em função do coeficiente de transferência de calor. Este fenômeno se explica através da análise do número *Biot*, para as condições estudadas $Bi \gg 1$, portanto o efeito de transferência de calor na superfície se encontra limitado pela resistência térmica do sólido. Isto significa que não se obterão ganhos significativos de tempo com o aumento excessivo do coeficiente de transferência de calor na superfície do sólido.

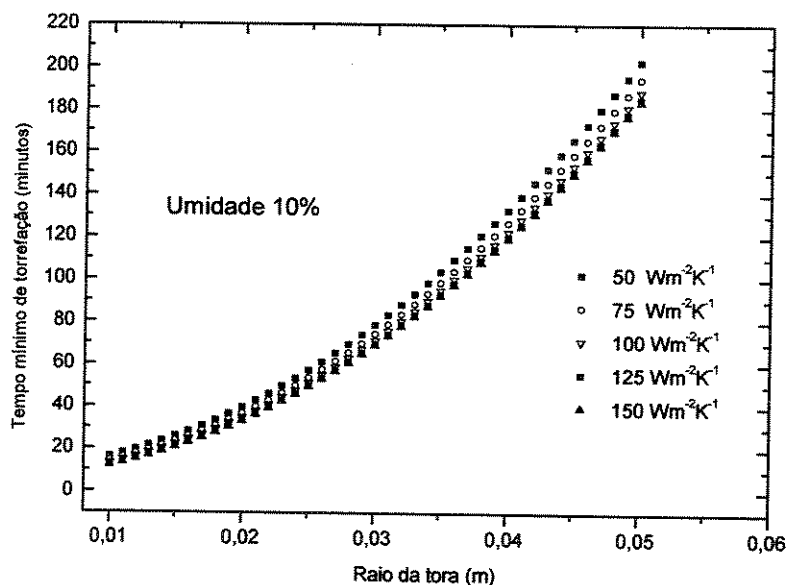


Figura 2.11 Comportamento do tempo mínimo de torrefação em função do raio e do coeficiente de transferência de calor. Umidade 10%.

Das simulações realizadas, pode-se concluir que existe um tempo econômico (τ) de permanência das toras durante a torrefação, o qual deve ser o suficiente para que o centro da biomassa alcance a temperatura de torrefação desejada. Como regra pode ser adotado que τ seja aproximadamente $(1,3)\tau_m$. Das variáveis estudadas, o diâmetro é a que mais influência tem, seguida da umidade e por último do coeficiente de transferência de calor. Com relação a esta última variável pode-se considerar que os ganhos em tempo de torrefação através do

incremento da transferência de calor na superfície do sólido são limitados. Para efeitos práticos, fixando o coeficiente de transferência de calor ($100 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$), pode-se ajustar uma equação para estimar τ_m em função do diâmetro e da umidade, para uma temperatura entre 250 e 300°C (equação 2.22).

$$\tau_m = 6,96 - 654,50(r) + 57137(r)^2 + 0,40(\chi) - 0,05(\chi)^2 + 16,85(r\chi) + 2851,87(r)^2(\chi) + 4,16(r)(\chi)^2 - 114,60(r)^2(\chi)^2 \quad (2.22)$$

Onde r é o raio da tora (em metros) e χ a umidade (%). Esta equação é válida para raios entre 0,01 e 0,05 m, e umidade entre 0 e 20%.

Capítulo 3

Proposta tecnológica para a torrefação

Neste capítulo são tratados os aspectos relacionados com a proposta de um forno para torrefazer biomassa em pequena escala. O qual tem capacidade de torrefazer madeira ou briquetes de biomassa em períodos de 5 a 6 horas. Também, são discutidos aspectos relacionados com o controle operacional e o dimensionamento do forno.

3.1 Forno para torrefação de madeira e briquetes de biomassa

Considerando que os segmentos do comércio de lenha, carvão vegetal e briquetes, no Estado de São Paulo, está constituído, em sua maioria, por pequenos produtores, qualquer proposta deve necessariamente ser compatível com a capacidade de investimento destes setores. Portanto, a tecnologia mais conveniente para introduzir a torrefação deve ser de pequena escala e de baixo custo de capital.

Conforme esta análise o forno deve atender às seguintes premissas:

1. Baixos custos de construção, operação e manutenção;
2. Adequado controle operacional e fácil operação.

Um sistema que se adapta a estas exigências é o chamado sistema intermitente ou por bateladas. Neste caso, o sistema deve estar formado por um forno construído de materiais de baixo custo e que opere com o mínimo possível de acessórios elétricos e mecânicos. Com base nestas considerações, foi desenvolvido um forno para a torrefação de pedaços de madeira ou briquetes de biomassa, o qual opera de forma descontínua e possui um corpo vertical de seção retangular, construído de tijolos. Conforme mostra a figura 3.1,

o corpo principal (1) está dividido em duas câmaras. Na câmara inferior (2), ocorre a combustão, gerando-se assim o calor necessário para o processo; esta câmara foi construída de tijolos refratários. Na câmara superior (3), ocorre a torrefação.

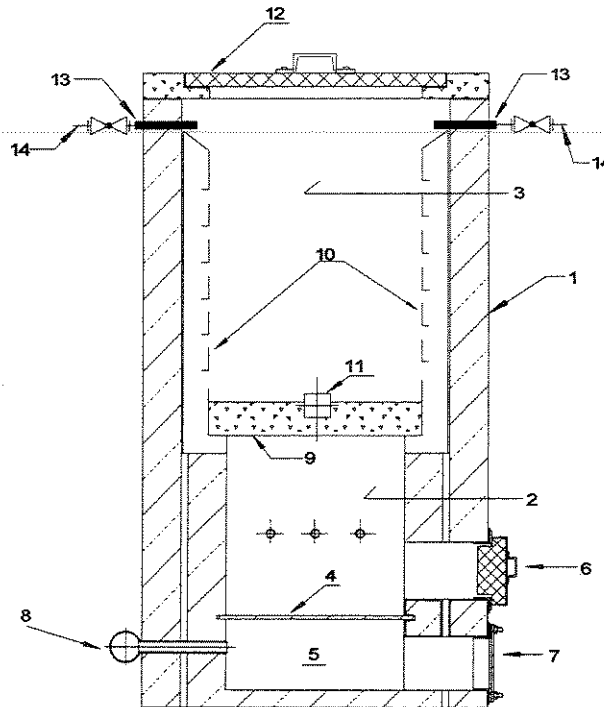


Figura 3.1 Vista em corte lateral do forno de torrefação

Na câmara de combustão (2), encontra-se uma grelha (4), onde é depositado o combustível para queimar e as cinzas são recolhidas no recinto (5). O combustível é carregado através de uma porta metálica (6), e as cinzas são retiradas através de uma tampa (7), localizada na parte inferior do forno. O ar para a combustão é introduzido através de uma série de dutos (8) situados nas paredes da câmara de combustão. E recomendável que estes dutos possuam válvulas de regulação de fluxo. Ressalta-se que neste forno também podem ser queimados combustíveis líquidos e gasosos, sempre que se coloquem os dispositivos adequados para tais propósitos. A divisão entre a câmara de combustão e a câmara de torrefação está constituída por placas refratárias (9), as quais servem também como suporte da carga de madeira ou biomassa a torrefazer dentro da câmara de torrefação (3).

Os canais (10) estão conectados à câmara de combustão (2), permitindo que os gases da combustão entrem na câmara de torrefação (3), fazendo um percurso ascendente pelo interior dos canais e logo se distribuindo através da biomassa. Os gases e vapores do processo são evacuados por meio de um duto (11) que está situado no fundo da câmara de torrefação e atravessa uma das paredes laterais do forno. A madeira ou biomassa é colocada dentro da câmara de torrefação pela parte superior do forno, onde há uma tampa metálica (12), a qual fecha hermeticamente quando o sistema está em operação. Os injetores de água (13) permitem controlar e inibir as reações exotérmicas do processo. Estes injetores estão distribuídos estrategicamente na câmara de torrefação, e aproveitam a água de resfriamento do condensador (23) (figura 3.2.)

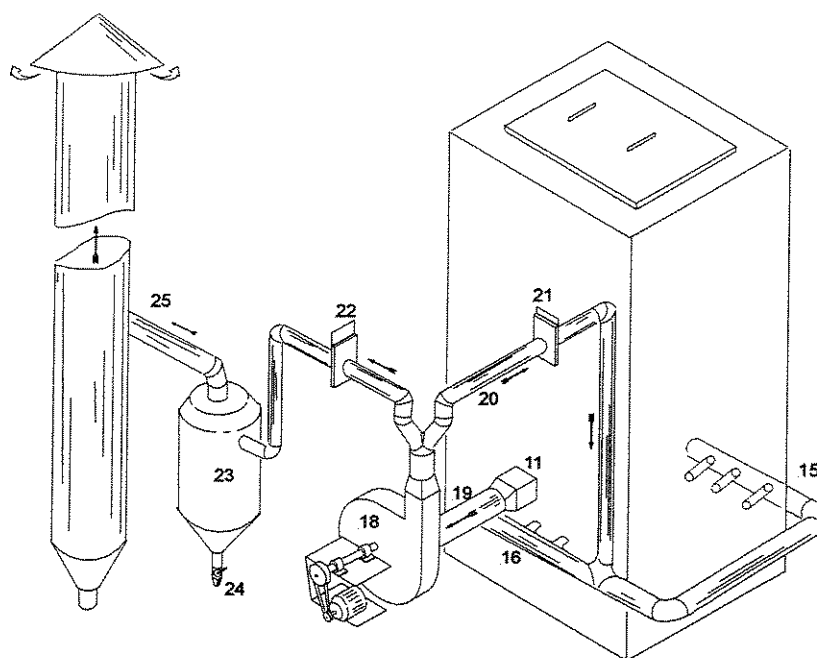


Figura 3.2 Vista em perspectiva do sistema de exaustão e refluxo de gás

Na figura 3.2, pode-se observar que existem entradas laterais (15) e (16) para a reciclagem de gases no interior da câmara de combustão (ver também fig. 3.1). O duto de exaustão (11) (figura 3.1) está conectado a um exaustor (18), o qual maneja os gases do processo através do duto (19). Uma parte dos gases é derivada pelo duto (20) e reciclada na

câmara de combustão através das entradas (15) e (16). O fluxo nos dutos (19) e (20) é regulado pelas válvulas (21) e (22). A parte do fluxo de gás que não é reciclada segue para o condensador (23); a fração condensada é extraída pela válvula (24) e os gases são conduzidos a uma chaminé através do duto (25).

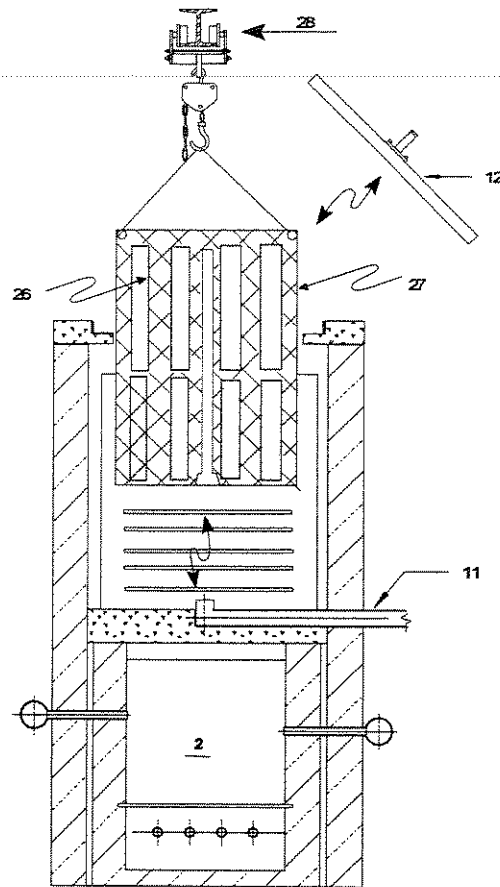
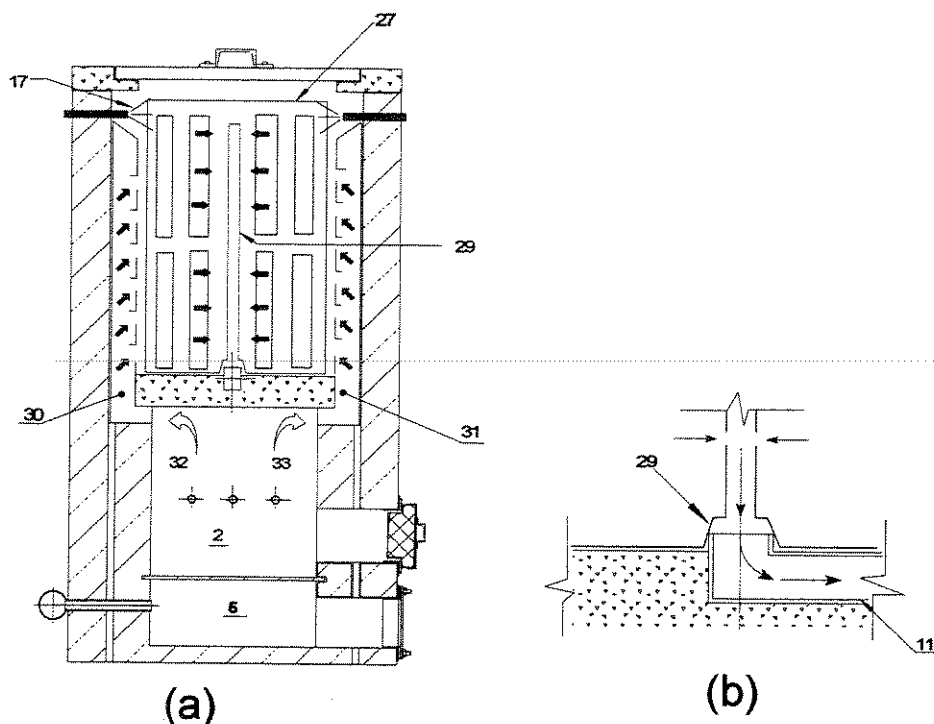


Figura 3.3 Exemplificação da carga ou descarga do forno de torrefação

A figura 3.3 mostra o sistema utilizado para facilitar a carga e descarga na câmara de torrefação. Neste sistema a biomassa (26) é colocada em uma cesta metálica (27) que é manipulada através de um sistema de talha (28). A cesta possui um duto central (29), conforme mostra a figura 3.4, o qual acopla com o duto (11) de exaustão.



*Figura 3.4 a) Forno carregado com biomassa e linhas de fluxo de gás
b) Detalhe do acoplamento da cesta*

Os gases gerados na câmara de combustão se dividem em dois fluxos (32) e (33), como mostra a figura 3.4 (a), e entram nos canais de distribuição pelas aberturas (31) e (30) situadas nas laterais do topo da câmara de combustão. Uma vez que os gases se encontram dentro dos canais, são distribuídos homogeneamente dentro da câmara de torrefação através de ranhuras horizontais. Neste processo, os gases intercambiam calor com a biomassa e depois são exauridos pelo duto central (29) da cesta de carga que está acoplada ao duto de exaustão (11), conforme a figura 3.4 (b).

A injeção de água dentro da câmara de torrefação é utilizada para controlar as eventuais reações exotérmicas e para acelerar o processo de resfriamento do material depois de torrefeito. A água utilizada neste processo provém do sistema de esfriamento do condensador, o qual trabalha em circuito fechado acionado por uma bomba (34) que extrai a água de um reservatório (35), e a circula pela camisa de resfriamento do condensador (23) conforme mostra a figura 3.5. Ao sair da camisa de resfriamento, a água, entra em uma tubulação que tem duas derivações (36) e (37), sendo que a derivação (36) retorna ao

reservatório (35) e a derivação (37) conduz água ao sistema de injetores da câmara de torrefação. Os fluxos e as quantidades injetadas são controlados pelas válvulas (38) e (39). Os vapores quentes entram no condensador (23) pela entrada (40) e os gases frios saem pelo duto (41). A fração líquida condensada é recuperada pela válvula (24).

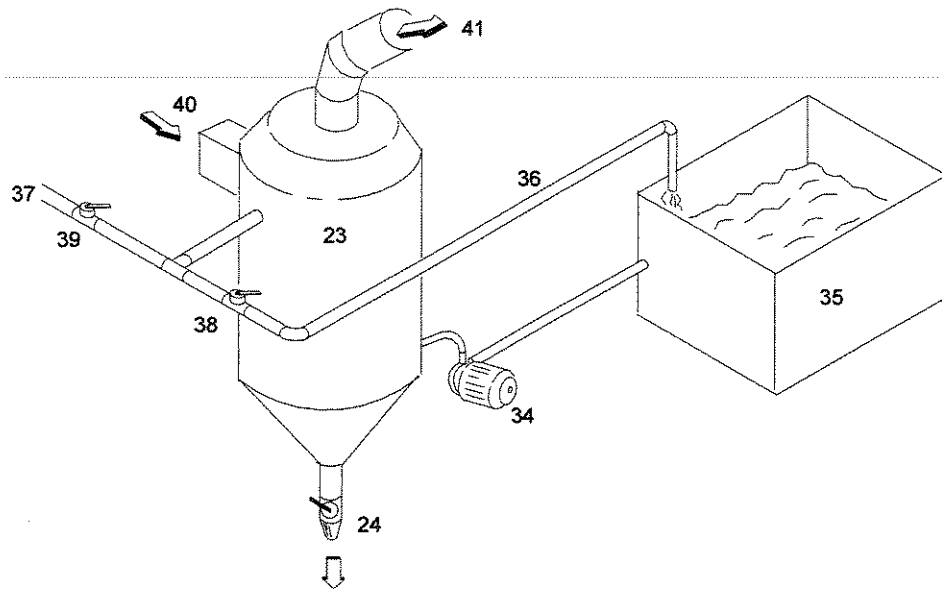


Figura 3.5 Sistema de condensação e injeção de água

Conforme mostra a figura 3.6, a água entra no condensador pela parte de baixo (43), preenchendo a camisa de esfriamento (42) e sai pela parte superior (44). O gás entra pelo duto (40) e faz um percurso descendente entrando em contato com as paredes da camisa de resfriamento e assim proporcionado a condensação da fração líquida, que é recuperada pela saída (24). O gás frio é exaurido pelo duto central (41) do condensador. Este condensador foi construído com chapas de aço revestidas de tinta anticorrosiva. O condensador em seu conjunto está formado por três partes desmontáveis que permitem a manutenção do equipamento.

Os sistemas de reciclagem de gás, resfriamento e controle de reações exotérmicas são elementos de grande importância para o funcionamento do forno. O sistema de reciclagem garante que parte do calor dos gases de escape seja recuperada, assim como cria

uma atmosfera redutiva dentro do forno. O sistema de injeção de água permite controlar e inibir reações exotérmicas e, conseqüentemente, controla a temperatura do processo dentro dos limites desejados.

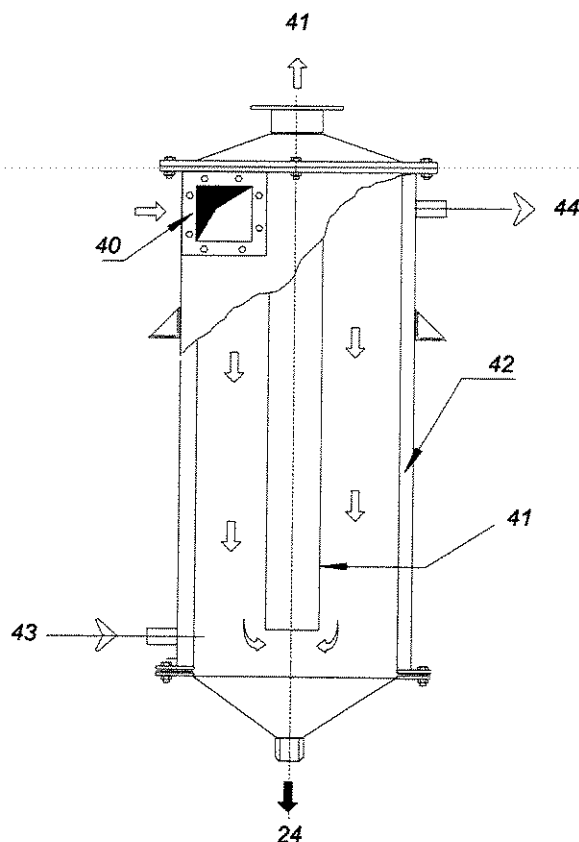


Figura 3.6 Vista em corte do condensador e linhas de fluxo de gás

É importante destacar que a configuração apresentada foi o fruto de um trabalho árduo que envolveu várias modificações no forno e nos sistema periféricos. A configuração que melhor se comportou do ponto de vista operacional foi a descrita aqui. No entanto, em trabalhos futuros podem ser introduzidas mais modificações. No anexo II, podem ser vistas as fotografias do forno e seus sistemas periféricos e acessórios.

3.2 Procedimento para dimensionar o forno de torrefação.

Os principais elementos a serem dimensionados são: a câmara de combustão, a câmara de torrefação, a sistema de recuperação dos vapores, e o sistema de exaustão.

3.2.1 Dimensionamento da câmara de combustão

A fornalha ou câmara de combustão é o elemento encarregado de produzir o calor necessário para o processo de torrefação. Considerando que as toras de madeira possuem em média 0,1 m de diâmetro, 0,5 m de comprimento e umidade de 15%, os resultados apresentados no subtítulo 2.3.5-a "Processos e particularidades da torrefação de uma tora de madeira" (Capítulo 2) podem ser utilizados como referência para o dimensionamento, sempre que se admita que a torrefação se desenvolve nas condições assumidas durante simulação numérica.

3.2.1-a Calor utilizado no processo de torrefação

Para dimensionar a câmara de combustão devem ser consideradas as condições médias de operação, pois não em todo momento o processo demanda a mesma quantidade de calor. A figura 3.7, obtida por simulação numérica, mostra o comportamento do consumo de calor em função do tempo. Considerando que hipoteticamente todas as toras dentro do forno se comportam de maneira similar, então a quantidade de calor a ser liberada na câmara de combustão deve-se comportar qualitativamente similar a curva mostrada na figura 3.7. Portanto, para iniciar o dimensionamento da câmara de combustão, deve-se determinar primeiramente a carga de biomassa a torrefazer e, conseqüentemente, a quantidade de calor utilizada no forno.

Assumindo que a câmara de torrefação tem capacidade para 90 kg, a taxa de utilização do calor pode ser estimada pela equação 3.1.

$$\dot{Q}_u = 1,17 m_b \dot{q}_u \quad (3.1)$$

Onde m_b é a quantidade de biomassa a torrefazer (90 kg), $\dot{q}_u$ é a taxa unitária de utilização do calor, a qual corresponde a $0,19 \text{ kWkg}^{-1}$, de acordo com a simulação numérica. O coeficiente 1,17 representa um fator de segurança. Através deste cálculo se estima que sejam necessários cerca de 20 kW de calor para torrefazer os 90 kg de madeira.

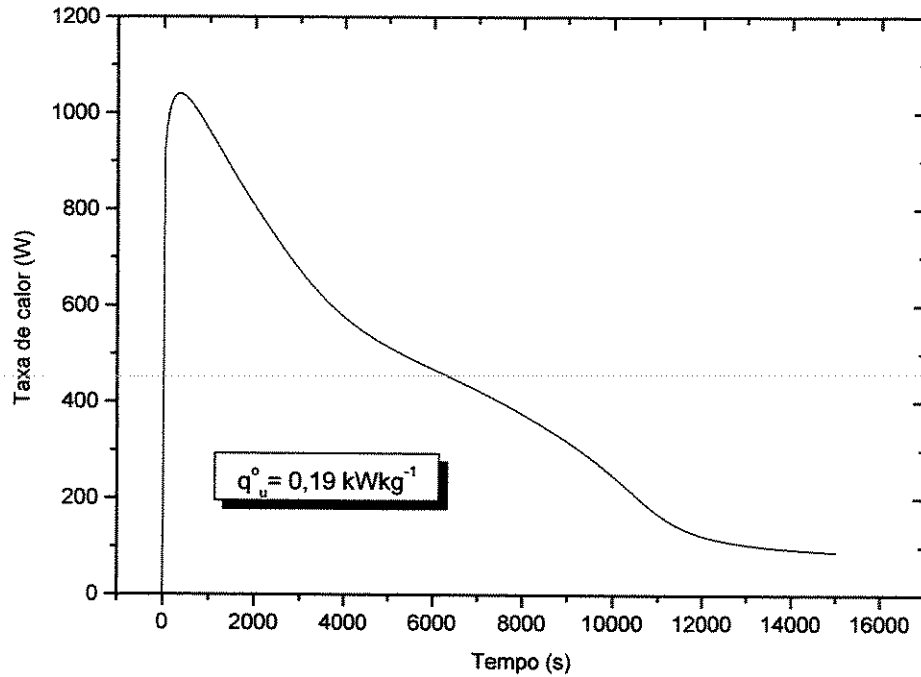


Figura 3.7 Taxa do calor utilizado em função do tempo, para uma tora de madeira com 15% de umidade.

3.2.1-b Calor liberado na câmara de combustão

O calor liberado na câmara de combustão deve ser suficiente para suprir o consumo de calor do processo, por esta razão devem ser consideradas as perdas durante os processos de intercâmbio de calor e combustão (Nussbaume, 1994). Portanto, o calor que deve ser liberado pode ser estimado pela equação 3.2.

$$\dot{Q}_d = \frac{\dot{Q}_u}{\eta_t} \quad (3.2)$$

Onde η_t representa a eficiência global do sistema, considerando que esta corresponde a 74%, o calor a ser liberado corresponde a 27 kW. Para liberar esta quantidade de calor é necessário queimar certa quantidade de madeira, a qual pode ser estimada através da equação 3.3.

$$\dot{m}_c = \frac{\dot{Q}_d}{PCI} \quad (3.3)$$

Onde PCI corresponde ao poder calorífico inferior do combustível queimado (ver tabela 3.1). Desta maneira, o consumo de lenha deve estar na ordem de 6,4 kg/h.

Tabela 3.1 Composição elementar e poder calorífico inferior (PCI) do eucalipto.

C (%)	H (%)	N(%)	O (%)	A (%)	X (%)	PCI (kJ/kg)
41,67	5,01	0,27	37,39	0,66	15	15.113,00

3.2.1-c Volume da câmara de combustão

As dimensões e configuração da câmara de combustão devem garantir que a queima do combustível ocorra adequadamente, para isto devem coexistir altas temperaturas e oxigênio suficiente no intervalo de tempo adequado (Nussbaume, 1994). Os fatores supramencionados são resumidos no termo conhecido como “carga térmica volumétrica” (q_v). Portanto, o volume do forno pode ser estimado através da equação 3.4.

$$V_f = \frac{\dot{Q}_d}{q_v} \quad (3.4)$$

Os valores de q_v são determinados experimentalmente, variando na faixa de 150 a 900 kWm^{-3} em função das características do combustível e do método de combustão. Os valores recomendados para a combustão de madeira sobre grelha com alimentação manual variam entre 170 e 300 kWm^{-3} (Cortez & Silva, 1997; Perry & Green, 1988). Assumido o valor de 230 kWm^{-3} , o volume do forno deve ser de 0,12 m^3 .

3.2.1-d superfície da grelha

A superfície da grelha pode ser estimada através da equação 3.5. Onde q_a é a carga térmica na superfície da grelha. Este parâmetro leva em consideração a quantidade de combustível que é alimentado no forno e a velocidade com que os gases da combustão fluem através da seção transversal do forno. Os valores de q_a são estabelecidos de forma prática em função do tipo de combustível, processo de alimentação, admissão de ar no forno, tamanho das partículas de combustível, e forma de combustão entre outros fatores. Seu valor varia na faixa de 150 a 1 700 kW/m^2 (Cortez & Silva, 1997). Para fornos de caldeiras de porte médio, que queimam madeira com alimentação manual, recomenda-se

uma carga térmica na faixa de 200 a 545 kWm⁻². Para fornos de pequeno porte o valor da carga térmica pode ser assumido de 100 a 200 kWm⁻².

$$A_f = \frac{\dot{Q}_d}{q_a} \quad (3.4)$$

Assumindo uma carga de 110 kWm⁻², a área da grelha deve ser de 0,25 m². Esta área deve garantir que a velocidade dos gases através da seção transversal do forno seja menor que a velocidade de propagação da chama dos gases combustíveis. Dessa forma, os gases, ao saírem da câmara de combustão, haverão completado a queima. Nas proporções usuais de combustão, os gases devem ter uma velocidade máxima de 0,1 m/s e mínima de 0,2 m/s (Perry & Green, 1988). A velocidade dos gases na câmara de combustão pode ser calculada pela equação 3.6. Onde T_g é a temperatura dos gases no forno (considera-se o valor de 1200 °C), V_g é o volume de gases produzido, o qual pode ser calculado pela equação 3.7.

$$U_g = \frac{V_g m_c}{A_f} \left(\frac{273 + T_g}{273} \right) \quad (3.6)$$

Onde:

$$V_g = V_{CO_2} + V_{H_2O}^o + V_{N_2}^o + (\lambda - 1)V_a^o \quad (3.7)$$

$$V_a^o = 0,0889(C) + 0,265(H) - 0,0333(O) \quad (3.8)$$

$$V_{CO_2} = 0,01866(C) \quad (3.9)$$

$$V_{H_2O}^o = 0,111(H) + 0,0124(x) + 0,0161(V_a^o) \quad (3.10)$$

$$V_{N_2}^o = 0,79(V_a^o) + 0,008(N) \quad (3.11)$$

Nas equações 3.7 - 3.11, x é o teor de umidade da madeira, C,H,N e O são as porcentagens elementares da madeira (ver tabela 3.1), e λ corresponde ao coeficiente de excesso de ar. No cálculo foi assumido o valor de 1,3. O volume de gás calculado corresponde a 5,68 Nm³/kg, portanto a velocidade dos gases na câmara de combustão é de 0,22 m/s. Este valor está dentro dos limites permissíveis (Perry & Green, 1988).

Durante a queima de combustíveis sólidos ocorre o desprendimento de pequenas partículas, conhecidas como fuligem. Estas partículas geralmente são arrastadas pelos gases que fluem fora da câmara de combustão. Uma partícula de fuligem de 0,1 mm necessita em torno de 1 segundo para completar a combustão (Perry & Green, 1988), portanto o tempo de residência dos gases deve ser superior a 1 segundo. O tempo de residência dos gases dentro da câmara de combustão pode ser calculado pela equação 3.12, neste caso foi considerando que as partículas de fuligem se deslocam com a mesma velocidade que os gases da combustão.

$$t_r = \frac{V_f}{m_c V_g \left(\frac{273 + T_g}{273} \right)} \quad (3.12)$$

O tempo achado foi de 2,19 segundos, ou seja, superior ao mínimo necessário para completar a combustão das partículas de fuligem inferiores a 0,1mm.

3.2.1-e Configuração da injeção de ar na câmara de combustão

De acordo com os cálculos efetuados as dimensões básicas da câmara de combustão (volume e seção transversal) garantem que a temperatura e o tempo de residência sejam adequados. Entretanto, apenas as dimensões geométricas não são condição suficiente para que exista uma adequada mistura ar/combustível. Para isto a câmara deve facilitar a injeção e o contato entre o ar e o combustível. Na figura 3.8 é mostrado o esquema de injeção de ar dentro do forno.

O fluxo de ar primário (8) é injetado embaixo da grelha (4) Desta maneira, o ar é obrigado a entrar em contato direto com o combustível durante mais tempo e conseqüentemente a mistura ar/combustível se efetua de melhor maneira. Para garantir uma boa mistura do ar primário com o leito de lenha, a superfície livre da grelha (espaço entre barras) deve ser suficientemente pequena para proporcionar uma corrente de ar bem difusa, fina e homogênea. Recomenda-se, para grelhas planas, que o espaço livre deve ser em torno de 20 a 50 % da superfície total da grelha (Cortez, & Silva, 1997).

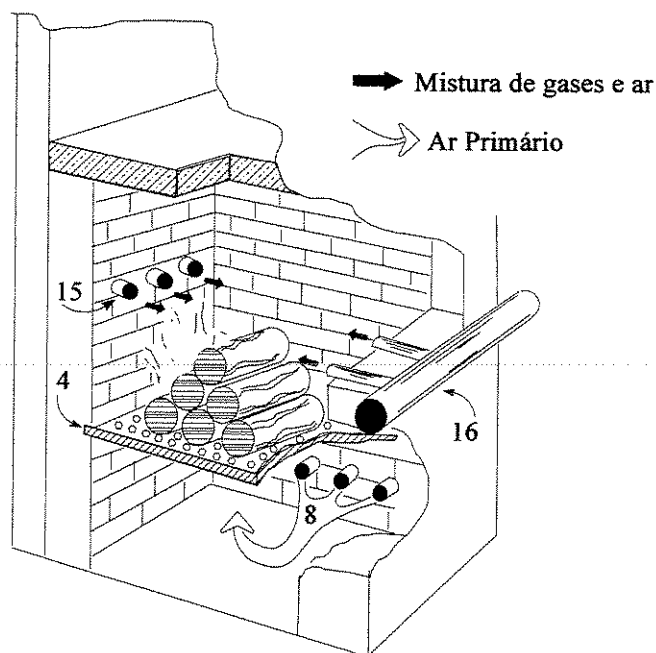


Figura 3.8 Esquema de injeção de ar na câmara de combustão

É necessário manter uma atmosfera sem muito excesso de oxigênio para evitar a oxidação do material em torrefação. Para manter atmosfera não-oxidante, parte dos gases de exaustão é reciclada para dentro da câmara de combustão (ver figura 3.3), pois desta forma o oxigênio livre é diluído na corrente de gás. Na figura 3.8 mostra-se como são realizadas a injeção do ar secundário e a reciclagem do gás de exaustão.

O fluxo de ar necessário a ser injetado no forno pode ser estimado pela equação 3.13.

$$V_a = \lambda V_a^o$$

O volume de ar a ser injetado, nas condições médias de operação, é 4,91 Nm³/kg.

3.2.2 Dimensionamento e configuração da câmara de torrefação

Considerando que o intercâmbio de calor na câmara de torrefação é realizado por contato direto, não há necessidade de determinar a área de transferência de calor, pois esta área corresponde à superfície da biomassa em torrefação. Trata-se, portanto, de determinar

a melhor configuração da câmara para que ocorra a melhor distribuição interna de calor. Para isto, foram testadas várias configurações para distribuir os gases no interior da câmara de torrefação. A configuração que apresentou melhor distribuição do calor foi descrita no subtítulo 3.1 (ver figura 3.4). Esta configuração mostrou uma maior dispersão dos gases e conseqüentemente maior homogeneidade na temperatura.

De acordo com a configuração proposta, a secção transversal do forno é constante, portanto, na câmara de torrefação a secção transversal deve ser aproximadamente igual à secção da câmara de torrefação, aproximadamente $0,25 \text{ m}^2$. Mas por razões construtivas a área efetiva foi fixada em $0,36 \text{ m}$. Isto ocorre porque a câmara de combustão foi projetada para ter dupla parede com isolamento térmico e tijolos refratários, enquanto que a câmara de torrefação possui uma parede simples.

Durante o cálculo da câmara de combustão foi pré-definida uma capacidade de torrefação de 90 kg por cada ciclo. Conforme isto, volume da câmara de torrefação deve ser suficiente para alojar esta quantidade de madeira ou briquetes. Considerando que um metro cúbico de madeira pesa aproximadamente 250 kg , então 90 kg devem ocupar em torno de $0,36 \text{ m}^3$, e a altura da câmara deve ser de 1 m . No entanto, a capacidade não chega a ser 90 kg , pois as toras ou os briquetes devem ser posicionados de maneira que permitam o fluxo livre dos gases. Considerando todos estes fatores, e assumindo que o “volume morto” seja de 30% do volume total, a capacidade real da câmara de torrefação é de aproximadamente 60 kg . É importante destacar que entre cada peça de biomassa deve haver no mínimo 1 cm de separação, pois do contrário, a transferência de calor seria prejudicada.

3.2.3 Sistemas periféricos e parâmetros operacionais do forno de torrefação

Como foi descrito no subtítulo 3.1, o forno consta de um sistema de exaustão e reciclagem de gás, e um sistema de condensação de vapores. Para dimensionar estes sistemas foram utilizados procedimentos padronizados descritos na literatura (Stephan, 1982; Hewitt et alli, 1994; Mueller, 1983), os quais não serão mostrados por serem amplamente conhecidos. Na tabela 3.2 são apresentadas as principais características dos sistemas periféricos e forno de torrefação, com bases nos cálculos de projeto.

Tabela 3.2 Principais características do forno de torrefação e sistemas periféricos

Seção	Parâmetros	Valores
Forno de torrefação	Volume da câmara de combustão (m ³)	0,12
	Superfície da Grelha (m ²)	0,25
	Carga térmica na superfície da grelha (kWm ⁻²)	110,00
	Carga térmica no volume da câmara de combustão (kWm ⁻³)	230,00
	Capacidade térmica da câmara de combustão ((kW)	27,00
	Taxa de combustão (kg/h)	6,40
	Volume da câmara de torrefação (m ³)	0,40
	Seção transversal da câmara de torrefação (m ²)	0,50
	Temperatura de trabalho da câmara de torrefação (°C)	220-300
	Capacidade máxima da câmara de torrefação ^a (kg/ciclo)	60,00
	Capacidade mensal ^a (kg)	1680,00
Sistema de condensação	Superfície de transferência de calor (m ²)	0,80
	Temperatura de entrada dos gases e vapores (°C)	230,00
	Temperatura de saída dos gases (°C)	95,00
	Temperatura de entrada d'água de refrigeração (°C)	25,00
	Temperatura de saída d'água de refrigeração (°C)	29,00
	Fluxo nominal da bomba d'água de refrigeração (l/min)	40,00
Sistema de exaustão	Capacidade nominal do reservatório de água (l)	500,00
	Potência do motor (HP)	1,00
	Rotação (rpm)	3450,00
	Vazão (m ³ /h)	100
	Pressão de sucção (mmca)	120
	Temperatura máxima de trabalho (°C)	300,00

a- Capacidade estimada para processar madeira de eucalipto

Capítulo 4

Ensaio no forno de torrefação

Neste capítulo é descrito o funcionamento do forno de torrefação, e são realizadas análises dos perfis térmicos na câmara de torrefação e do perfil operacional da câmara de combustão através de balanços de massa e energia. Durante os ensaios de torrefação usou-se como matéria prima madeira de eucalipto e briquetes compactados em alta densidade. São apresentados e discutidos os resultados da caracterização laboratorial da madeira e dos briquetes torreficados. Também é apresentado um estudo do perfil de combustão e da emissão de poluentes da biomassa torrefeita.

4.1 Perfil de funcionamento do forno de torrefação.

4.1.1 Método de torrefação e operação correta do forno

Durante as experiências de torrefação, foram ensaiados vários métodos e configurações de operação com intuito de determinar a melhor maneira de operar o forno. Através destas experiências foi possível constatar que no estágio inicial do processo a biomassa possui um alto teor de umidade, portanto a troca de calor entre os gases da combustão e a biomassa se caracteriza por um forte caráter endotérmico e uma atmosfera carregada de vapor d'água, liberada da própria matéria-prima. Por esta razão a temperatura da matéria-prima aumenta de forma controlada e o excesso de ar é dissolvido no vapor d'água. Este estágio de secagem (A) se desenvolve até aproximadamente 200°C, e se caracteriza por um alto consumo de combustível (ver figura 4.1).

Uma vez ultrapassado o estágio de secagem do material começam as reações endotérmicas de termocondensação, podendo ser ligeiramente exotérmicas na medida que a temperatura da biomassa se aproxima do limite de 250°C (B). Este estágio se caracteriza pelo aumento da temperatura até o valor de torrefação desejado (por exemplo 280°C).

Ainda nesta fase o calor é fornecido através da combustão de biomassa. Porém, a taxa de combustão deve ser reduzida gradualmente para controlar o aumento exagerado da temperatura no forno. Como a biomassa se encontra em estado anidro e a atmosfera é pobre em vapor d'água, pode existir uma alta concentração de oxigênio nos gases da combustão, tornando a atmosfera oxidante. Portanto, nesta fase é recomendável reciclar 1/3 dos gases de escape para a câmara de combustão. Como os gases reciclados entram acima da biomassa em combustão, isto provocará uma redução do oxigênio livre que eventualmente possa fluir da corrente de gases para a câmara de torrefação. A regulação do refluxo de gás é realizada conforme foi explicado no Capítulo 3.

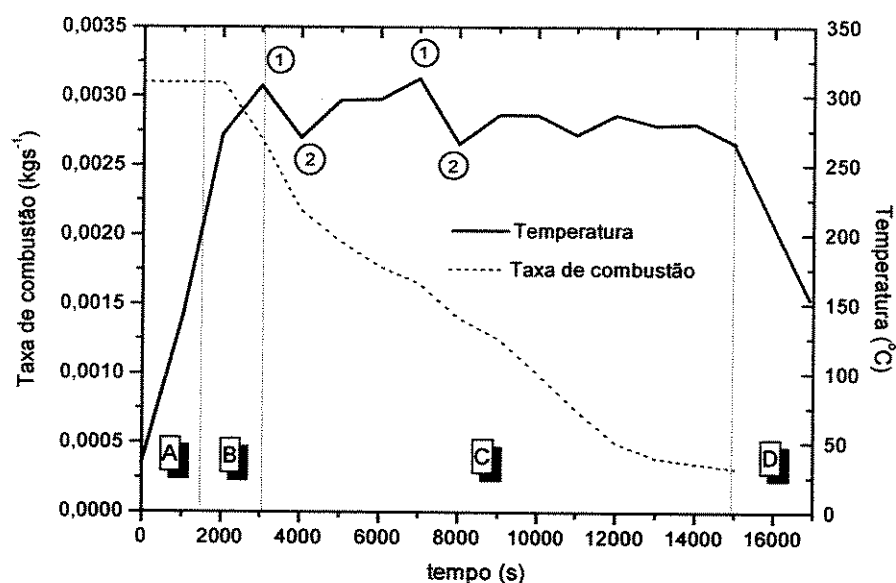


Figura 4.1 Perfil médio de temperatura, taxa de combustão e fases da torrefação. A-secagem, B-Início da termocondensação, C-permanência, D-Resfriamento. 1- Pico exotérmico, 2- controle da reação por injeção de água. Experiência com

Uma vez alcançada a temperatura desejada para a torrefação, começa a fase de manutenção de temperatura (C), até que o material se torrifique totalmente. Este estágio se caracteriza por pouca demanda de calor e portanto a combustão deve ser mantida apenas para a manutenção da temperatura na câmara de torrefação.

Em determinado momento não se faz mais necessário continuar a queimar na câmara de combustão. Então para manter a temperatura no patamar desejado, é necessário continuar a reciclar 2/3 dos gases. Todas as entradas de ar devem ser totalmente fechadas. Nesta operação, os gases reciclados levarão o calor acumulado na câmara de combustão para a zona de torrefação. Neste estágio podem ocorrer reações parasitas de carbonização (ver figura 4.1), provocando o aumento descontrolado da temperatura do material (1). Para controlar estas reações exotérmicas, recomenda-se a injeção controlada de pequenas quantidades de água que ao entrar em contato com o material quente se evapora e absorve parte do calor desprendido nas reações exotérmicas (2). Uma vez controlada a reação exotérmica, interrompe-se a injeção de água. A injeção de água é realizada conforme explicado no Capítulo 3.

O estágio final do processo (D) caracteriza-se pelo resfriamento do material até uma temperatura abaixo de 160°C. Neste caso, também pode ser utilizado o sistema de injeção de água para ajudar no resfriamento. Uma vez resfriado adequadamente, passa-se a descarregar o material.

4.1.2 Perfil de operação na câmara de torrefação

Os ensaios de torrefação foram realizados utilizando madeira de eucalipto (ME) e briquetes de alta densidade (BAD), fabricados por extrusão termoplástica. As temperaturas testadas durante a torrefação foram 230, 250 e 270°C. Para cada temperatura foram realizados vários ensaios (ao menos três) até caracterizar completamente o perfil térmico do forno. Para controlar melhor as reações exotérmicas, durante os experimento, evitou-se trabalhar com temperaturas muito próximas a 300°C. O diâmetro médio das peças de madeira foi de 10 cm, e o comprimento variou entre 10 e 40 cm. O comprimento dos BAD foi de 30 cm, e formato quadrado de 8x8 cm. A seguir são mostrados, a título de exemplo, alguns perfis de temperatura⁵ obtidos durante os ensaios.

⁵ Perfis de temperatura: As temperaturas foram mesuradas com ajuda de um indicador de temperatura de 5 canais, os termopares foram colocados no centro e nas laterais da câmara de torrefação através das paredes do forno. A temperatura de cada ponto do forno é a média no plano horizontal da câmara de torrefação.

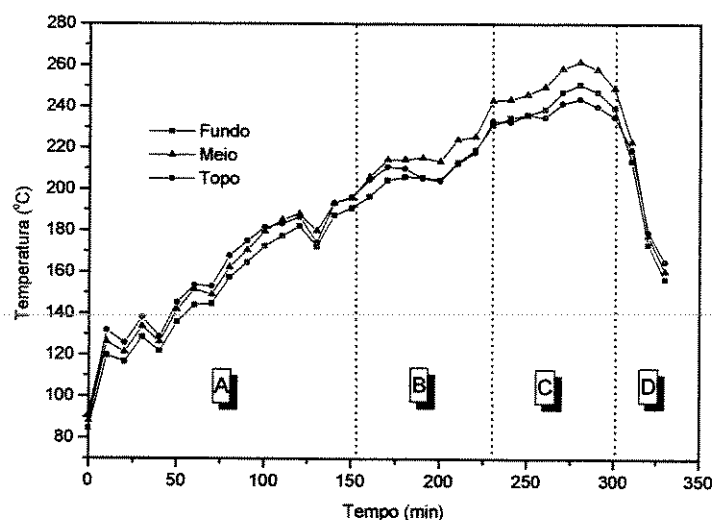


Figura 4.2 Perfil de temperatura durante a torrefação de madeira com 40 cm de comprimento. Taxa de aquecimento 1°C/min. A-Secagem, B-Início da termocondensação, C-Permanência, D-Resfriamento.

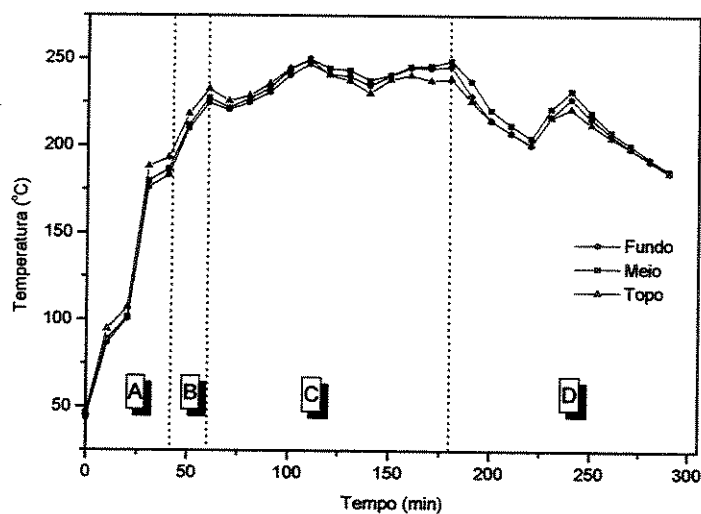


Figura 4.3 Perfil de temperatura durante a torrefação de madeira com 40 cm de comprimento. Taxa de aquecimento 3°C/min. A-Secagem, B-Início da termocondensação, C-Permanência, D-Resfriamento.

Durante os ensaios com ME a 250°C, foram usadas duas condições de aquecimento: 1°C/min e 3°C/min. Na figura 4.2 pode-se observar o perfil de temperatura com aquecimento a 1°C/min e tempo de residência de 1h e 20 min. Nestas condições, a diferença média da temperatura entre os pontos da câmara de torrefação foi na média de 5°C. A diferença maior entre os dois pontos extremos da câmara foi de 12°C. Durante o período de residência (C), a oscilação da temperatura em torno de 250°C foi de $\pm 10^\circ\text{C}$. A figura 4.3 também mostra um perfil com temperatura final de torrefação a 250°C. Entretanto, a taxa média de aquecimento foi aproximadamente 3°C/min e o tempo de permanência de 2 h. Neste caso, o padrão mostrado na figura 4.2 se repete. A diferença média entre os pontos da câmara oscilou em torno de 3°C, e a diferença máxima entre os pontos extremos da câmara de torrefação foi 12°C. Também, a temperatura apresentou uma oscilação de $\pm 10^\circ\text{C}$ em torno de 250°C.

O comportamento dos perfis de temperatura tem uma influência direta na homogeneidade do material produzido. No ensaio cujo perfil foi apresentado na figura 4.2 foram tomadas amostras nas três zonas principais do forno (topo, meio e fundo) e caracterizadas através de análise imediata. Os resultados desta caracterização são apresentados na tabela 4.1, e mostram que a composição química das amostras apresenta um adequado nível de homogeneidade.

Tabela 4.1 Caracterização imediata em função da posição, teste a 250°C e 3°C/min.

Posição	Umidade (%)	Voláteis (%)	Carbono fixo (%)	Cinzas (%)
Topo	6,3 $\pm$ 0,14	72,3 $\pm$ 0,14	27,1 $\pm$ 0,14	0,6 $\pm$ 0
Meio	4,6 $\pm$ 0,07	70,3 $\pm$ 0,28	28,8 $\pm$ 0,11	0,9 $\pm$ 0
Fundo	5,2 $\pm$ 0	74,5 $\pm$ 0,56	24,6 $\pm$ 0,21	1,0 $\pm$ 0,07

Durante os testes com ME de 10 cm de comprimento, os perfis de temperaturas obtidos foram menos homogêneos se comparados com os ensaios realizados com ME de 40 cm. A causa disto pode ser a distribuição heterogênea que a madeira adota dentro da câmara em função das dimensões menores. Na figura 4.4 pode-se observar um perfil durante os ensaios com ME de 10 cm a temperatura de torrefação final de 270°C, com taxa

de aquecimento de $3,5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ e tempo de permanência de 40 min. Para este teste a diferença média da temperatura entre os pontos do forno foi de $8,5^{\circ}\text{C}$, com uma diferença máxima entre pontos extremos de 12°C .

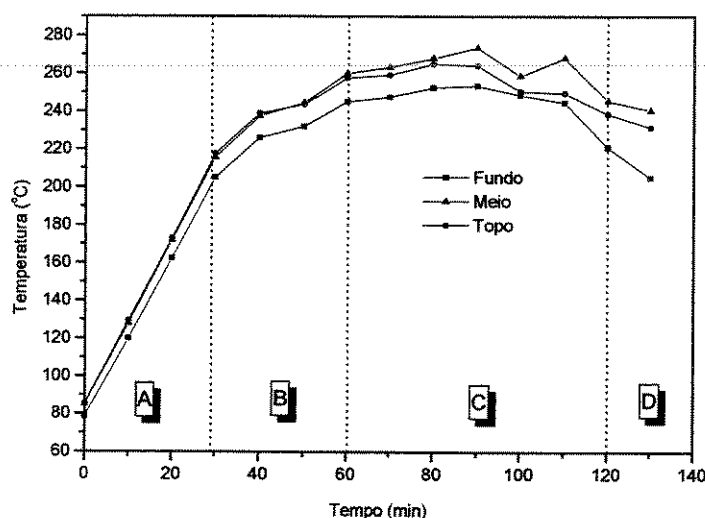


Figura 4.4 Perfil de temperatura durante a torrefação de madeira com 10 cm de comprimento. Taxa de aquecimento $3,5^{\circ}\text{C}/\text{min}$. A-Secagem, B-Inic. Termocondensação, C-Permanência, D-Resfriamento.

A figura 4.5 mostra o perfil térmico de um ensaio com ME de 10 cm de comprimento à temperatura final de 250°C . De forma similar ao ensaio realizado a 270°C os gradientes de temperatura foram menos homogêneos em comparação com os perfis obtidos com ME de 40 cm. Neste caso a oscilação máxima da temperatura foi de $\pm 18^{\circ}\text{C}$ em torno de 250°C . Em ambas as figuras (fig. 4.4 e fig. 4.5), pode-se observar a presença de picos exotérmicos produzidos pelas reações parasitas. Talvez estas reações sejam aceleradas porque a madeira, na dimensão de 10 cm, apresenta maior área de contato com o gás, e a possibilidade de oxidação é maior. Outra razão pode ser que, devido ao aumento da área de contato o fluxo térmico aumenta e, como foi explicado no Capítulo 2, isto acelera as reações exotérmicas.

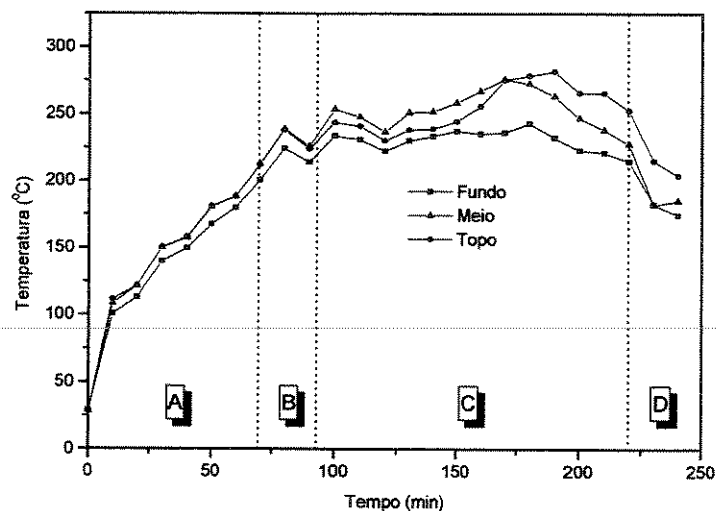


Figura 4.5 Perfil de temperatura durante a torrefação de madeira com 10 cm de comprimento. Taxa de aquecimento $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$. A-Secagem, B-Início da termocondensação, C-Permanência, D-Resfriamento.

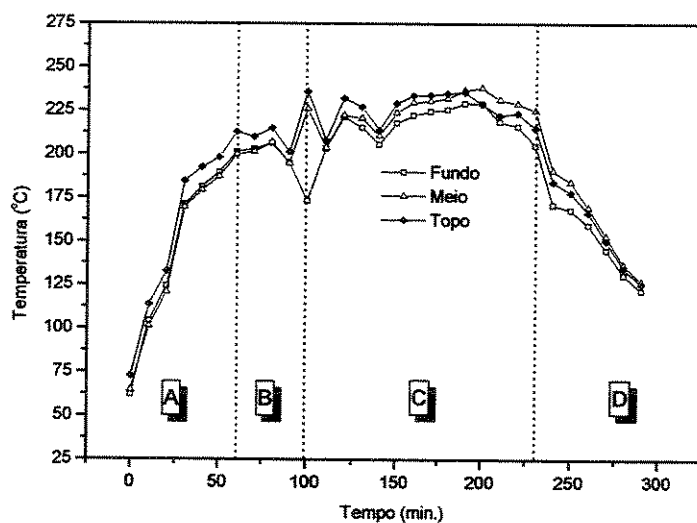


Figura 4.6 Perfil de temperatura durante a torrefação de BAD. Taxa de aquecimento $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$. A-Secagem, B-Início da termocondensação, C-Permanência, D-Resfriamento.

Ao comparar os resultados entre a torrefação de ME com 40 cm e 10 cm, pode-se concluir que o tempo de permanência do material no forno varia de forma proporcional ao tamanho do material. Porém, as reações são mais difíceis de controlar à medida que o tamanho diminui, assim como a capacidade do forno também diminui.

Os perfis obtidos durante a torrefação de BAD apresentaram um nível alto de homogeneidade. Por exemplo, no teste de torrefação a 220°C, mostrado na figura 4.6, a temperatura apresentou uma diferença média entre pontos de 3°C. A diferença máxima entre pontos extremos foi de 12°C e a oscilação da temperatura em torno de 220°C foi de $\pm 15^\circ\text{C}$.

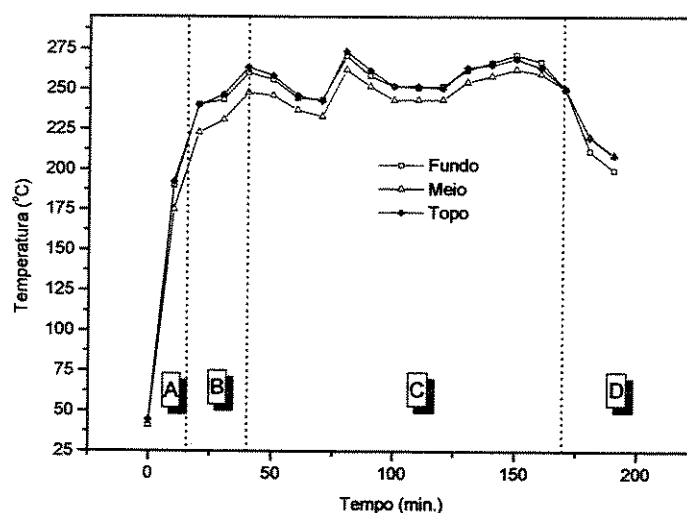


Figura 4.7 Perfil de temperatura durante a torrefação de BAD. Taxa de aquecimento 5°C/min. A-Secagem, B-Início da Termocondensação, C-Permanência, D-Resfriamento.

A figura 4.7 mostra o perfil de temperatura durante um teste realizado com BAD a temperatura final de 270°C. Neste experimento, a taxa de aquecimento foi de 5°C/min, sendo a maior taxa obtida no forno durante o aquecimento. É importante ressaltar que o controle dos parâmetros de operação, como o tempo e a temperatura, são de fácil manejo, mas a taxa de aquecimento depende de fatores de difícil determinação, como o tamanho da matéria-prima e a umidade inicial. Em alguns casos a matéria-prima estava mais úmida que em outros e, portanto foram obtidas diferentes taxas de aquecimento para as mesmas

condições de queima no forno. Outro aspecto que limitava a taxa de aquecimento era a presença das reações exotérmicas, pois foi constatado que na medida que a taxa de aquecimento era elevada, a frequência de tais reações aumentava proporcionalmente.

Considerando os resultados antes descritos, pode-se concluir que o perfil térmico da câmara de torrefação é bastante adequado em termos de homogeneidade e de controle paramétrico. No entanto, ainda podem ser obtidos ganhos em controle operacional, especialmente quando se opera com temperatura próxima de 300°C . Algumas modificações poderiam ajudar nesta tarefa.

4.1.3 Perfil de operação na câmara de combustão

Por se tratar da fonte de calor e o instrumento de controle de temperatura, é evidente que o perfil de operação na câmara de combustão é de extrema importância. A forma como a biomassa é queimada e a eficiência deste processo influencia definitivamente o resultado final da torrefação. Por esta razão decidiu-se realizar uma avaliação individual da câmara de combustão. O objetivo desta avaliação foi determinar o desempenho da câmara de combustão submetida a diferentes taxas de combustão, simulando, assim, o seu funcionamento durante o processo de torrefação.

As principais perdas que ocorrem durante a combustão são causa da combustão incompleta dos gases (q_3) e das partículas de combustível (q_4). As perdas q_3 ocorrem devido à presença de CO , H_2 , CH_4 e outros elementos que ainda têm certo poder calorífico que não foi aproveitado por defeito na relação ar-combustível, ou por baixa temperatura na câmara (Nussbaume, 1994). As perdas q_4 ocorrem porque o combustível não permanece o tempo suficiente na zona quente do forno para queimar-se completamente, e é arrastado com as cinzas ou a fuligem (Beaton & Silva, 1990).

4.1.3-a Metodologia de cálculo

A seguir é mostrada a metodologia de cálculo usada para a avaliação da eficiência da combustão (Flyktman & Oravainen, 1990; Beaton & Silva, 1990). Para utilizar esta metodologia a câmara de combustão foi operada em regime estável de combustão, e para cada condição foi realizado um cálculo independente.

A eficiência da combustão pode ser estimada como:

$$\eta_c = 100 - (q_3 + q_4) \quad (\%) \quad (4.1)$$

As perdas q_4 são expressas por:

$$q_4 = \left(\frac{c_{arr}}{100 - c_{arr}} \right) \frac{327,8A}{PCI} \times 100 \quad (\%) \quad (4.2)$$

Onde c_{arr} é o teor (%) de carbono fixo nos resíduos embaixo da grelha. Para o cálculo, considera-se que somente ocorre arrasto de partículas embaixo da grelha, pois o arrasto de partículas que fluem fora do forno é desprezível. A e PCI são o teor de cinzas (%) e o poder calorífico baixo do combustível (kJkg^{-1}), respectivamente.

As perdas q_3 são calculadas por:

$$q_3 = 126,4CO \frac{V_{gs}}{PCI} \times 100 \quad (\%) \quad (4.3)$$

Onde CO é a concentração volumétrica do monóxido de carbono (%) nos gases da combustão, e V_{gs} é o volume de gases secos (m^3/kg), o qual é calculado pela seguinte equação:

$$V_{gs} = \frac{1,86C}{(CO_2 + CO)} \times \frac{(100 - q_4)}{100} \quad (\text{m}^3\text{kg}^{-1}) \quad (4.4)$$

Sendo C a percentagem de carbono elementar do combustível, CO_2 e CO são as percentagens volumétricas de dióxido de carbono e monóxido de carbono respectivamente.

As taxas de combustão estão diretamente relacionadas com a carga térmica aplicada na câmara de combustão (q_v), e este parâmetro é de grande importância durante o projeto. Portanto, a avaliação da câmara de combustão esteve direcionada também a comprovar a relação entre a carga térmica e o desempenho do forno.

Para determinar q_v , foi aplicada a seguinte equação:

$$q_v = \frac{\dot{m}_c PCI}{V_f} \quad (\text{kWm}^{-3}) \quad (4.5)$$

Onde $\dot{m}_c$ é a taxa de combustão em kgs^{-1} a qual pode ser estimada aproximadamente pela equação 4.6, PCI é o poder calorífico inferior do combustível em kJkg^{-1} e V_f é o volume da câmara de combustão ($0,12 \text{ m}^3$).

$$\dot{m}_c = \frac{Ap + As}{3600V_a} \quad (\text{kgs}^{-1}) \quad (4.6)$$

Na equação 4.6, Ap e As são os fluxos de ar primário e secundário (m^3/h) injetados na câmara, V_a é o fluxo de ar que teoricamente seria injetado no forno, expresso em m^3kg^{-1} de combustível e que pode ser calculada pela equação 4.7

$$V_a = V_a^0 \lambda \quad (\text{m}^3\text{kg}^{-1}) \quad (4.7)$$

Onde :

$$V_a^0 = 0,0889(C) + 0,265(H) - 0,0333(O) \quad (\text{Nm}^3\text{kg}^{-1}) \quad (4.8)$$

$$\lambda = \frac{N_2}{N_2 - 3,76(O_2 - 0,5CO)} \quad (4.9)$$

Nas equações 4.8 e 4.9 C, H e O são as porcentagens elementares de carbono, hidrogênio e oxigênio, e N_2 , O_2 , CO são as porcentagens volumétricas de nitrogênio, oxigênio e monóxido de carbono nos gases da combustão.

4.1.3-b Resultados e discussão

O combustível utilizado nos testes de combustão foi lenha de eucalipto cujas características são apresentadas na tabela 4.2

Tabela 4.2 Características da madeira de eucalipto usada nos testes de combustão.

C %	H%	N%	O%	A%	X%	PCI (kJkg^{-1})
41,03	5,11	0,19	41,17	0,48	12	14400, 75

Análise elementar em aparelho Perkin Elmer-Serie II 2400 - norma ASTM D. 1762-82

O primeiro experimento foi direcionado para determinar o comportamento da câmara de combustão com diferentes taxas de combustão. Para realizar este ensaio, o forno

foi operado sem biomassa na câmara de torrefação. Durante os testes foi utilizado um par de rotâmetros para medir o fluxo de ar injetado no forno e conseqüentemente, a taxa de combustão. As mudanças na injeção do fluxo de ar foram realizadas numa faixa próxima dos valores de projeto (ver subtítulo 3.2.1 do Capítulo 3).

Na tabela 4.3 são apresentados os resultados⁶ dos testes realizados com diferentes taxas de combustão. É necessário esclarecer que as perdas q_4 dependem da quantidade de carbono fixo residual nas cinzas (C_{arr}), e durante os testes foi detectado que esta quantidade não se alterou com a variação da taxa de combustão. O valor médio determinado foi de 15%, portanto as perdas q_4 foram praticamente constantes.

Tabela 4.3 Resultados dos testes de combustão em função da taxa de combustão.

Ap (m ³ /h)	As (m ³ /h)	$\dot{m}_c$ (kg/h)	O ₂ (%)	CO (%)	CO ₂ (%)	N ₂ (%)	λ	q_4 (%)	q_3 (%)	η_c (%)
50	10	10,07	7,80	0,20	13,14	78,86	1,58	0,19	1,00	98,80
40	7	8,33	7,00	0,04	13,93	79,03	1,50	0,19	0,19	99,61
30	5	6,47	6,40	0,04	14,53	79,03	1,44	0,19	0,18	99,62
20	0	2,03	13,00	0,05	7,96	78,99	2,62	0,19	0,40	99,40
10	0	1,00	13,20	0,20	7,76	78,84	2,67	0,19	1,68	98,13

Utilizando os resultados da tabela 4.3 e aplicando a equação 4.5 podem ser determinadas as cargas térmicas aplicadas no volume da câmara de combustão para cada condição testada. Ao apresentar os valores obtidos num gráfico, conforme a figura 4.8, pode-se observar que o melhor desempenho é obtido quando a carga térmica está próxima do valor de projeto (230 kWm⁻³).

⁶ As quantidades de ar primário e secundário foram medidas através de dois rotâmetros. A composição dos gases da combustão foi determinada por um analisador TESTO 300 MI.

Quando é aplicada uma taxa de combustão muito alta, como por exemplo 10 kg/h, ou seja, a carga térmica na câmara é 330 kW/m^3 (43 % maior que o projeto), as perdas por combustão incompleta aumentam, pois os gases permanecem muito pouco tempo na zona mais quente, impedindo desta forma que a reação de combustão seja efetuada adequadamente. Este fato pode ser corroborado, inclusive, através do teor de CO medido nos gases da combustão (ver tabela 4.3). Na medida que as taxas de combustão (e conseqüentemente a carga térmica) aproximam-se dos valores de projeto se observa uma diminuição sensível nos níveis de CO e, portanto, aumento na eficiência.

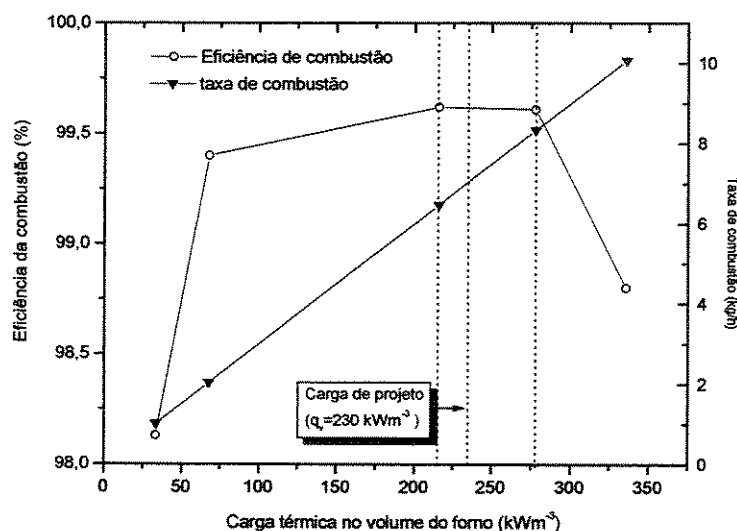


Figura 4.8 Eficiência e taxa de combustão em função da carga térmica no forno.

Durante o estudo do perfil de combustão, foi analisado o comportamento dos parâmetros operacionais da câmara de combustão durante a alimentação do combustível. A alimentação é manual, e portanto realizada em intervalos. Isto causa alterações cíclicas da combustão. Estas alterações se devem entre outras razões, à variação da concentração de gases dentro do forno, assim como à variação da relação ar-combustível durante o ciclo de alimentação. O objetivo da experiência, que a seguir será exposta, foi determinar qual o comportamento do forno durante o ciclo de alimentação.

Para o teste foi mantido um fluxo constante de $47 \text{ m}^3/\text{h}$ de ar. O ciclo de medições foi realizado da seguinte maneira: antes de alimentar a câmara de combustão com lenha foi determinada a temperatura e composição dos gases da combustão na saída da câmara, depois, esta foi alimentada com 0,5 kg de lenha. A próxima análise de gases foi realizada quando o indicador mostrou o nível máximo de temperatura. Depois, no momento em que a temperatura chegou aos valores próximos de antes da alimentação, realizou-se outra análise de gases, para fechar o ciclo. Este procedimento foi repetido durante 5 ciclos. Os resultados deste teste são apresentados na tabela 4.4.

Tabela 4.4 Resultados dos testes de combustão durante o ciclo de alimentação do forno.

Tempo (min)	O ₂ %	CO %	CO ₂ %	N ₂ %	λ %	T °C
0	10,00	0,05	10,95	79,00	1,90	630
5	5,50	0,04	15,43	79,03	1,35	644
10	11,00	0,05	9,95	79,00	2,09	623

A composição dos gases da combustão foi determinada por um analisador TESTO 300 MI. A composição dos gases representa o valor médio de 5 ciclos de alimentação.

Conforme a tabela 4.4, pode-se observar que no início da alimentação o excesso de ar é relativamente alto, pois no instante da alimentação a madeira que não teve tempo de entrar em combustão, e portanto, há excesso de oxigênio livre. Por outro lado, a madeira alimentada absorve calor para as reações de combustão provocando uma queda sensível da temperatura. Na medida que a reação de combustão se desenvolve, a temperatura aumenta até atingir seu valor máximo. Nesse instante existe a menor quantidade de oxigênio livre dentro do forno, pois existem as condições apropriadas de temperatura e tempo para que a combustão ocorra satisfatoriamente. Após atingir o ponto de maior desprendimento de calor, a temperatura começa a diminuir até atingir valores próximos aos do início da alimentação. Neste instante o excesso de ar é grande, devido ao desequilíbrio ar-combustível (o fluxo de ar não corresponde à quantidade de combustível). Este estudo

comprova que a alimentação de combustível deve ser realizada instantes depois que a temperatura na câmara de combustão começa a diminuir.

4.1.4 Balanço de calor no forno de torrefação

4.1.4 -a Metodologia de cálculo.

Com intuito de determinar a eficiência do aproveitamento do calor, foram realizados balanços de massa e de calor tomando como volume de controle os limites do forno de torrefação. Para determinar a eficiência térmica do forno de torrefação foi aplicado o método de balanço direto (Flyktman & Oravainen, 1990), expresso através da equação 4.10. Este método é o mais recomendado para sistemas que operam em regime transiente, como é o caso do forno de torrefação.

$$\eta_f = \frac{m_b q_u}{m_c PCI} 100 \% \quad (4.10)$$

Na equação 4.10 m_b representa a massa de matéria-prima (kg) a ser torrefeita, e o termo q_u é o calor utilizado durante a torrefação, o qual pode ser estimado pelo modelo matemático proposto no capítulo 2, e seu valor é aproximadamente 2782 kJkg^{-1} . O termo m_c representa a quantidade de combustível consumido (kg) e PCI é o poder calorífico inferior da lenha (kJkg^{-1}). A quantidade de lenha queimada foi determinada pela diferença de peso antes e depois do teste.

Para estimar as perdas de calor no forno, foi utilizada a expressão (4.11). Nesta equação as perdas (Σq) são estimadas indiretamente. As principais perdas que ocorrem durante o processo estão localizadas na entalpia dos efluentes gasosos que saem do forno de torrefação, nas perdas por combustão incompleta e nas perdas por radiação e convecção através das paredes do forno. No entanto, as maiores perdas localizam-se nos efluentes gasosos, devido à alta temperatura com que são exauridos.

$$\Sigma q = 100 - \eta_f \quad (4.11)$$

O uso da equação (4.11) se justifica porque a determinação das perdas nos gases de escape apresenta um alto grau de dificuldade e incertezas, pois a temperatura, a vazão e a

composição dos gases variam durante todo o processo. Por outro lado, as perdas por combustão incompleta também apresentam um alto grau de incerteza durante o cálculo, pois a taxa de combustão varia durante o processo, fazendo com que varie constantemente a composição dos gases da combustão. O calor despejado através das paredes do forno também não é constante pois o regime de aquecimento é de tipo transiente.

4.1.4 -b Resultados e discussão.

A título de exemplo será detalhado o balanço de calor realizado durante a torrefação de ME a temperatura média de 250°C e taxa de aquecimento de 1°C/min. Para realizar o balanço foram recolhidas amostras de madeira, cujas características físico-químicas são apresentadas na tabela 4.2. As cinzas depositadas depois do processo foram analisadas para determinar o teor de carbono fixo. Como resultado foi detectado que as cinzas tinham em torno de 15% de carbono fixo residual. Na tabela 4.5 são apresentados os dados adquiridos durante o ensaio, o tempo de operação do forno foi de 5 horas e 40 minutos.

Tabela 4.5 Dados adquiridos durante a torrefação de madeira a 250 °C.

Descrição	Valor
<u>Dados da matéria prima</u>	
Massa carregada no forno	52 kg
Umidade	16,6 %
Dimensões médias (cm)	10 / 40
<u>Dados do combustível</u>	
Massa queimada	14 kg
Características físico-químicas	Ver tabela 4.2
<u>Análise de gases da combustão^a</u>	
O ₂	9,48 %
CO	0,11 %
CO ₂	11,47 %
N ₂	78,95 %

^a Valores médios, determinados em 5 h e 40 min de operação.

A eficiência térmica do forno para as condições especificadas na tabela 4.5 foi de 72 %, ou seja, 28 % do calor fornecido não é utilizado durante o processo de torrefação. Parte destas perdas correspondem à combustão incompleta, e outra parte ao calor sensível despejado nos gases de exaustão do forno. Na tabela 4.6 são apresentados os resultados das estimativas realizadas. As maiores perdas de calor estão localizadas nos gases de exaustão. É claro que neste tipo de instalação não poderia ser de outra forma, pois não há aproveitamento do calor residual. Para poder melhorar este desempenho seria necessário, por exemplo, utilizar o calor residual na pré-secagem da biomassa antes de ser submetida à torrefação. De qualquer maneira, para uma instalação deste tipo o desempenho pode ser considerado razoável.

Tabela 4.6. Balanço de calor no forno durante a torrefação de madeira a 250°C

Parâmetro	Valor (kJ)	Fração (%)
Calor utilizado no processo ^b	144664,00	-
Calor fornecido ao processo	201610,50	-
Eficiência do forno de torrefação (η_f)	-	72
Perdas de calor (Σq)	-	28

^b Valor estimado por simulação numérica.

Durante o experimento também foram adquiridos os dados necessários para realizar o balanço de massa. O líquido recuperado no condensador foi recolhido e pesado em intervalos de 30 minutos. Para determinar o rendimento de conversão, a madeira foi pesada antes e depois do teste. Na tabela 4.7 são apresentados os resultados do balanço de massa.

Os líquidos recuperados são uma mistura de água proveniente da umidade, ácido pirolenhoso, e água de formação durante a combustão. Como a madeira possui uma umidade inicial de 16,6 %, pode-se afirmar que dos líquidos recuperados, cerca de 8,7 kg, provêm da umidade e apenas 2,53 kg correspondem ao licor pirolenhoso. Para determinar o rendimento de conversão da madeira torrefeita é necessário descontar a umidade da madeira sem processar. Desta maneira o rendimento de conversão é aproximadamente 80%. Este valor é característico para a temperatura de processamento aplicada.

Tabela 4.7. Balanço de massa no forno durante a torrefação de madeira a 250°C

Descrição	Valor (kg)	Fração (%)
Madeira inicial	52	100
Madeira torrefeita	35,25	67,78
Líquidos ^c	11,23	21,59
Gases ^d	5,52	10,63

^cLíquidos: água (proveniente da umidade da madeira) e ácidos pirolenhosos.

^dDeterminado por diferença.

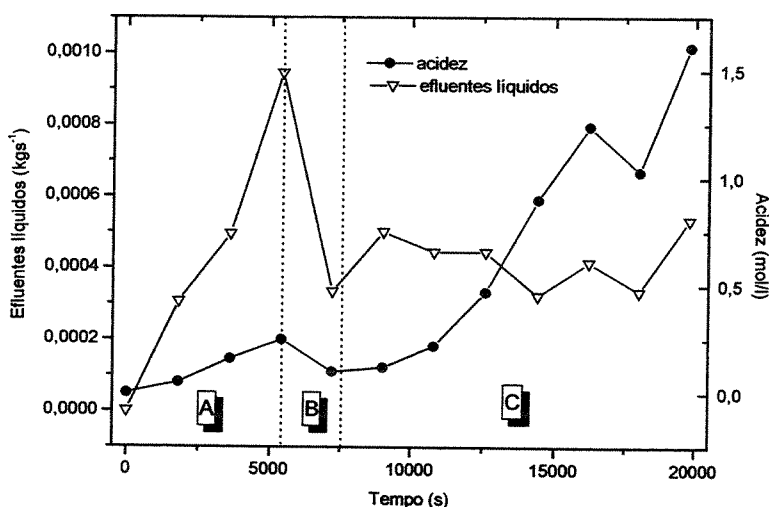


Figura 4.9 Fluxo e acidez dos efluentes líquidos do processo a 250°C em função do tempo. A- secagem, B-início da termocondensação, C-Permanência.

A figura 4.9 mostra o fluxo e a acidez total dos efluentes líquidos recuperados no condensador. Para determinar a acidez, as amostras de líquido foram analisadas pela técnica de potenciometria utilizando-se um aparelho Orion Modelo 710. Como se pode ver, até 1 hora de processo, registra-se o maior fluxo de líquidos efluentes, fato que corrobora ao menos qualitativamente, as hipóteses apresentadas no modelo matemático proposto no capítulo 2 (comparar de forma qualitativa as figuras 4.9 e 2.8). Este comportamento se deve, possivelmente, a que no início do processo a madeira é submetida a um choque térmico que propicia uma violenta remoção da água. Neste período (A), não

existe quase emissão de líquidos pirolenhosos, como se pode comprovar pela acidez determinadas nas amostras. Uma vez que a umidade é removida, a concentração de líquidos pirolenhosos aumenta gradualmente como mostra a figura 4.9, fases (B) e (C), e o fluxo de líquidos decresce até aproximadamente $4,5 \times 10^{-3} \text{ kgs}^{-1}$, valor que permanece praticamente constante até o final do processo.

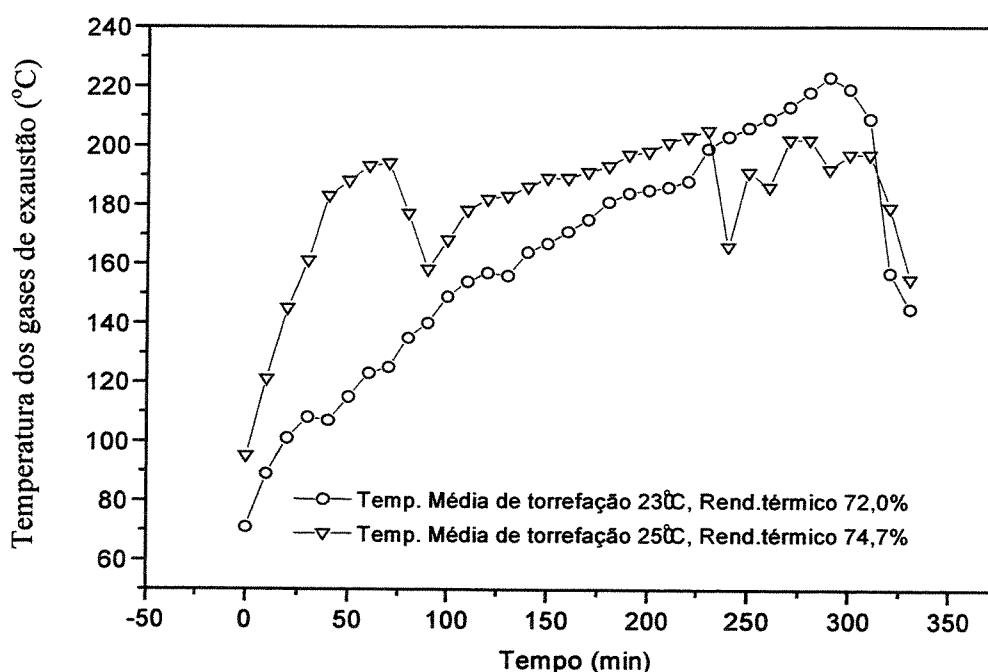


Figura 4.10 Temperatura dos gases de exaustão no forno em função do tempo.

Durante os balanços térmicos não foi observada nenhuma relação direta entre as perdas nos gases de escape e as condições de operação do forno (ver figura 4.10). Conseqüentemente, o rendimento térmico se comportou de forma heterogênea com relação à temperatura de operação. Por exemplo, na figura 4.10 pode observar-se que a temperatura dos gases de escape, ao longo do processo, comporta-se de forma independente em relação à temperatura da câmara de torrefação. Isto talvez seja conseqüência das reações exotérmicas e/ou endotérmicas que ocorrem, e às flutuações de temperaturas decorrentes da própria operação do forno. Portanto, não é possível afirmar que a variação de dos

parâmetros de operação podem afetar sensivelmente o rendimento do forno, ao menos nas condições testadas não foi possível detectar um padrão de comportamento do rendimento térmico. Durante os ensaios o rendimento obtido foi em média 70%.

4.2 Caracterização da biomassa torrefeita

A caracterização da biomassa torrefeita foi realizada com intuito de identificar as possíveis aplicações energéticas, e comparar seu desempenho com relação à lenha e o carvão vegetal. Neste sentido, é importante ressaltar que, de acordo com as fontes consultadas (ver Capítulo 2), este combustível pode ter uso industrial e doméstico. Portanto, este pode ser uma alternativa para a madeira e o carvão vegetal, que tradicionalmente são utilizados em alguns segmentos econômicos. Destaca-se que o objetivo básico desta pesquisa não é determinar a influência dos parâmetros de torrefação nas características da biomassa torrefeita. Vários trabalhos já abordam amplamente este tema, portanto, o intuito é identificar as possibilidades deste combustível no mercado consumidor em função das condições de torrefação.

Durante a pesquisa foram estudadas as características físico-químicas da biomassa torrefeita, os perfis de combustão e as emissões de elementos prejudiciais à saúde. Este último estudo foi direcionado a biomassa tratada entre 270 e 280°C, pois ao propor este material como combustível doméstico, deve haver especial cuidado com relação a substâncias nocivas à saúde humana. Discernir se a presença de tais substâncias se encontra dentro dos “limites aceitáveis” é de extrema importância, pois do contrário qualquer esforço por introduzir a biomassa torrefeita no mercado doméstico esbarra no aspecto ambiental. Como no Brasil não existe uma legislação específica que regule o potencial poluidor de combustíveis de uso doméstico, foram tomados como referência os limites de emissões do carvão vegetal. Portanto, a biomassa torrefeita não pode exceder estes “limites”. Do contrário, seu uso se torna inviável. As substâncias que representam maior potencial de perigo para a saúde são o monóxido de carbono (CO) e os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs) (Bruce et alli, 2000), portanto o estudo concentrou-se em determinar a presença destes elementos.

A matéria-prima utilizada durante os ensaios foi Eucalipto (ME) e briquetes de alta densidade (BAD), e as temperaturas de torrefação foram 230, 250 e 270°C. É importante destacar que dentro da câmara de torrefação a temperatura oscila em $\pm 10^\circ\text{C}$, portanto ao referir-se à torrefação a 230°C, na realidade o processo ocorre entre 220 e 240°C. De acordo com isto, a ME torrefeita é designada doravante como ME₂₃₀, ME₂₅₀ e ME₂₇₀ em função da faixa de temperatura na qual ocorre a torrefação. De igual modo os BAD torreficados são designados doravante BAD₂₃₀, BAD₂₅₀ e BAD₂₇₀. O tempo de permanência da biomassa dentro do forno, depois de atingir a temperatura de torrefação, foi aproximadamente 1 hora e 30 minutos.

4.2.1 Análise imediata

Esta análise proporciona uma idéia da composição do combustível, e portanto do comportamento durante a combustão ou conversão termoquímica, definindo assim as suas aplicações. Por exemplo, o efeito da variação da quantidade de carbono fixo num combustível é refletido na sua capacidade de comportar-se como redutor. O teor de carbono fixo tem influência direta no poder calorífico. As matérias voláteis têm uma influência direta na quantidade de chamas durante a queima. O teor de cinzas, proporciona uma idéia da quantidade de escórias que deve ser removida do forno, é portanto útil no projeto de fornos e caldeiras.

A caracterização imediata foi realizada seguindo a norma ASTM D1762-82. Para isto, foi utilizada uma estufa, um forno mufla e uma balança analítica. Na tabela 4.8 são apresentados os resultados da caracterização das biomassas torrefeitas a diferentes temperaturas e comparadas com a madeira e o carvão vegetal (CV) para uso doméstico. Dos resultados apresentados, pode-se observar que à medida que a temperatura de torrefação aumenta o teor de carbono fixo tende a aumentar. Na faixa de 250-280°C, observa-se que o aumento do carbono fixo é maior que na faixa de 230-250°C. A razão para este comportamento pode ser que, a partir de 250°C, o desencadeamento das reações de pirólise é mais intenso, começando a degradação de parte da lignina e da celulose, e portanto a emissão de voláteis é mais intensa.

Tabela 4.8 Análise imediata da biomassa em função da temperatura de torrefação

ID.	Umidade ^e (%)	Carbono Fixo ^{f,g} (%)	Voláteis ^f (%)	Cinzas ^f (%)
<i>MADEIRA DE EUCALIPTO</i>				
ME	11,0 ± 0,1	17,3 ± 0,5	82,2 ± 0,5	0,5 ± 0,1
ME ₂₃₀	4,9 ± 0,1	21,7 ± 0,5	77,4 ± 0,5	0,9 ± 0,1
ME ₂₅₀	4,7 ± 0,2	27,8 ± 0,5	71,6 ± 0,5	0,6 ± 0,1
ME ₂₇₀	3,0 ± 0,1	39,0 ± 0,7	60,0 ± 0,8	1,0 ± 0,0
<i>BRIQUETES DE ALTA DENSIDADE</i>				
BAD	11,0 ± 0,1	18,0 ± 0,5	80,8 ± 0,5	1,2 ± 0,0
BAD ₂₃₀	5,8 ± 0,1	20,7 ± 0,5	78,8 ± 0,5	0,5 ± 0,1
BAD ₂₅₀	5,1 ± 0,1	25,6 ± 0,5	73,5 ± 0,5	0,9 ± 0,1
BAD ₂₇₀	4,6 ± 0,1	31,3 ± 0,5	67,3 ± 0,5	1,4 ± 0,0
<i>CARVÃO VEGETAL</i>				
CV	5,3 ± 0,1	84,8 ± 0,7	14,4 ± 0,7	0,8 ± 0,0

e- base úmida

f- base seca

g- determinado por diferença

A madeira torrefeita apresenta algumas vantagens em comparação com a madeira *in natura*. Por exemplo, a madeira ME₂₃₀ possui uma composição próxima de ME, porém, o teor de umidade é 55% menor. Isto representa economia durante o transporte e maior poder calorífico. Portanto, a madeira torrefeita nestas condições pode ser capaz de substituir a lenha, inclusive sem perder as propriedades mecânicas como será mostrado posteriormente.

Já a madeira ME₂₅₀ apresenta um teor de umidade muito similar a ME₂₃₀. Entretanto, o teor de voláteis é 13 % menor em comparação a ME, e o carbono fixo aumenta em torno de 60%. Em termos energéticos, os ganhos através do tratamento térmico são consideráveis, proporcionando melhor combustão e economia no transporte. Este material pode substituir a lenha em atividade industriais que demandem de combustíveis de

melhores características energéticas do que a madeira, e que ainda possuam propriedades mecânicas e geométricas similares.

Conforme os resultados apresentados na tabela 4.8 na madeira ME₂₇₀ o teor de carbono fixo duplicou em relação à madeira *in natura*, e o teor de voláteis diminuiu 27%. Dos combustíveis analisados até agora a madeira ME₂₇₀ é o mais “próximo” do CV, porém, o teor de voláteis é 4 vezes maior. Isto significa que durante a combustão haverá presença de chama visível durante um período maior do que durante a combustão do CV. Considerando este dado, podem surgir dúvidas quanto à adequação dos perfis de combustão e a emissão de substâncias nocivas à saúde quando combustíveis como a ME₂₇₀ e BAD₂₇₀ forem usados em ambientes domésticos, como por exemplo, em churrascos. Posteriormente estas questões serão abordadas e discutidas em detalhes com bases em experiências realizadas. O aspecto visual da ME₂₇₀ e do BAD₂₇₀ pode ser observado no Anexo III.

Os comentários anteriores também podem ser atribuídos aos BAD torreficados. No entanto deve-se chamar a atenção para o fato de que a torrefação conserva grande parte das propriedades mecânicas dos BAD, e uma vez que a briquetagem tem como principal objetivo diminuir custos de transporte e manejo dos resíduos de biomassa, a torrefação pode ser um tratamento adicional que melhora efetivamente as propriedades energéticas e aumenta a qualidade do briquete. Os briquetes BAD₂₃₀ e BAD₂₅₀ podem ser utilizados como combustíveis para fornos comerciais e industriais, substituindo a lenha.

4.2.2 Análise elementar

A análise elementar mostra os elementos constituintes do material no caso da biomassa, carbono, hidrogênio, oxigênio e nitrogênio. Esta análise permite determinar a relação ar-combustível adequada para a combustão. Também, através do estudo dos componentes elementares da biomassa, pode-se classificar e determinar as possíveis aplicações energéticas. As análises foram realizadas em um aparelho Perkin Elmer Série II 2400, o qual segue a norma ASTM D 3178-84.

Tabela 4.9 Análise elementar da biomassa em função da temperatura de torrefação

ID.	C (%)	H (%)	N (%)	O ^h (%)	Cinzas (%)	H/C	O/C
<i>MADEIRA DE EUCALIPTO</i>							
ME	44,63 ± 0,3	5,81 ± 0,0	0,22 ± 0,0	48,84 ± 0,2	0,50 ± 0,1	1,56	0,82
ME ₂₃₀	50,32 ± 1,2	5,82 ± 0,1	0,56 ± 0,3	42,40 ± 0,4	0,90 ± 0,1	1,39	0,63
ME ₂₅₀	53,87 ± 0,2	5,47 ± 0,1	0,17 ± 0,1	39,89 ± 0,1	0,60 ± 0,1	1,22	0,55
ME ₂₇₀	61,96 ± 0,4	4,17 ± 0,2	0,7 ± 0,6	32,17 ± 0,4	1,00 ± 0,0	0,80	0,39
<i>BRIQUETES DE ALTA DENSIDADE</i>							
BAD	45,79 ± 0,3	5,96 ± 0,0	0,11 ± 0,1	46,95 ± 0,2	1,20 ± 0,0	1,56	0,77
BAD ₂₃₀	48,54 ± 0,1	5,98 ± 0,0	0,22 ± 0,1	44,78 ± 0,1	0,50 ± 0,1	1,48	0,69
BAD ₂₅₀	51,42 ± 0,0	5,66 ± 0,1	0,14 ± 0,1	41,88 ± 0,2	0,90 ± 0,1	1,32	0,61
BAD ₂₇₀	54,48 ± 0,1	5,46 ± 0,1	0,13 ± 0,2	38,54 ± 0,2	1,4 0 ± 0,0	1,20	0,53
<i>CARVÃO VEGETAL</i>							
CV	86,41 ± 0,1	2,99 ± 0,1	0,61 ± 0,1	9,19 ± 0,1	0,8 ± 0,0	0,41	0,08

h- por diferença

Na tabela 4.9 são apresentados os resultados da análise elementar, os quais mostram que o teor de carbono elementar aumenta a temperaturas elevadas, enquanto os teores de hidrogênio e oxigênio decrescem. Este efeito é mais pronunciado na faixa de 250-270°C. As perdas de hidrogênio e oxigênio no sólido se devem a que estes elementos passam a formar parte do vapor d'água e do dióxido de carbono liberado durante a torrefação.

A liberação de voláteis oxigenados e hidrogenados produz mudanças na composição química da biomassa torrefeita. Por exemplo, à medida que a temperatura aumenta as relações atômicas H/C e O/C decrescem. Do ponto de vista da combustão, a diminuição das relações atômicas é um fator positivo, uma vez que na reação química formam-se menos vapor d'água e fumaças deixando mais eficiente a combustão. Comparando as relações atômicas pode ser realizada uma classificação da biomassa torrefeita em comparação ao

carvão e a matéria-prima inicial, no caso ME e BAD. Conforme mostra a figura 4.11, à medida que as relações atômicas H/C e O/C diminuem, mais se aproxima a biomassa torrefeita das características do carvão vegetal. Entretanto, observa-se que em qualquer das condições experimentadas, tanto a madeira torrefeita como os briquetes torrefeitos apresentam características intermediárias entre a biomassa *in natura* e o carvão vegetal.

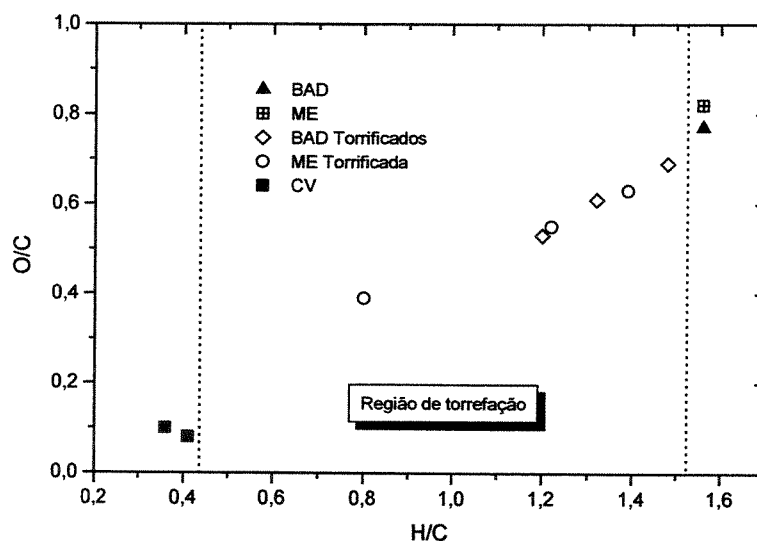


Figura 4.11 Gráfico das relações atômicas O/C vs H/C em função do combustível

4.2.3 Rendimento de conversão e índices energéticos

Quando um combustível sólido é submetido a um tratamento térmico, ocorrem reações de transformação que promovem o desprendimento de voláteis, e conseqüentemente a perda de massa no sólido. A relação entre a massa inicial e a massa final, após o tratamento térmico, representa o índice de conversão ou rendimento gravimétrico de conversão do processo. Obviamente que quando o objetivo do tratamento é melhorar as características energéticas do sólido, o ideal é obter altos rendimentos de conversão, ou seja, conservar a maior parte da massa sólida e ainda obter melhores qualidade energéticas. É claro que existe um limite, imposto pela própria natureza do fenômeno, para obter altos rendimentos. O rendimento de conversão tem influência direta na densidade energética do combustível produzido.

Densidade energética diz respeito a quantidade de energia potencialmente aproveitável contida num determinado volume de combustível. Esta característica é de grande importância nos custos de transporte e manejo de combustíveis. A densidade energética depende de propriedades como a densidade, poder calorífico e rendimento de conversão.

Tabela 4.10 Rendimento de conversão e índices energéticos

ID.	Rendimento gravimétrico (%)	Densidade ⁱ (kgm ⁻³)	PCS ^j (kJkg ⁻¹)	PCS/PCS ₀ ^k	Energia recuperada ^l (%)	Densidade Energética (10 ⁻⁶ kJm ⁻³)
<i>MADEIRA DE EUCALIPTO</i>						
ME	-	500,00	17439,00	1,00	-	8,72
ME ₂₃₀	87,50	437,50	19537,00	1,12	98,02	8,54
ME ₂₅₀	81,50	407,50	20617,00	1,18	96,35	8,40
ME ₂₇₀	67,00	335,00	22847,00	1,31	87,78	7,65
<i>BRIQUETES DE ALTA DENSIDADE</i>						
BAD	-	1100,00	17961,00	1,00	-	19,75
BAD ₂₃₀	90,00	990,00	18962,00	1,06	95,02	18,77
BAD ₂₅₀	80,20	882,20	19838,00	1,10	88,58	17,50
BAD ₂₇₀	70,50	775,50	20850,00	1,17	81,84	16,16
<i>CARVÃO VEGETAL</i>						
CV	27,00	250,00	31087,00	1,78	48,13	7,77

i-Densidade aparente

j- Calculado através de correlação numérica, $PCS = 343,08(\%C) + 548,89(\%H) - 21,73(\%O)$

k- Relação entre o poder calorífico do produto e a biomassa *in natura*

l- Energia recuperada é calculada por: $(PCS/PCS_0)(\%rendimento)/100$

A tabela 4.10 mostra a relação entre a temperatura de torrefação, rendimento gravimétrico, e diversos índices energéticos. Os resultados mostram que à medida que a aumenta a temperatura, o rendimento e a densidade energética diminuem. Ao comparar os resultados da torrefação com o CV observa-se que o rendimento de conversão na torrefação

é significativamente superior. O poder calorífico superior (PCS) aumenta com a temperatura, sendo mais evidente este efeito na faixa de 250-270°C, podendo chegar até 30% de aumento no PCS da madeira e 17% nos BAD. Os valores de PCS apresentados na tabela 4.10 foram estimados através de uma regressão numérica obtida com dados existentes sobre biomassas torrefeitas, os detalhes sobre este procedimento são apresentados no Anexo IV.

Na torrefação, conserva-se uma grande parte da massa inicial do combustível, recuperando-se entre 98 e 80% da energia inicial da matéria-prima. Entretanto, na carbonização é recuperada em torno de 50% desta energia (ver tabela 4.10). Isto significa que para cada 1 kg de madeira em torno de 50% da energia inicial vai para os gases e vapores da carbonização. Durante a torrefação apenas entre 2 e 20% de energia inicial se dispersa nos gases e vapores do processo. Por exemplo, considerando que se necessite produzir uma quantidade de combustível que contenha potencialmente 10.000,00 MJ, para isto seria necessário carbonizar cerca de 1,2 t de madeira, se o combustível processado fosse o VC da tabela 4.10. Entretanto, se o combustível fosse ME₂₇₀ seria necessário torreficar cerca de 650 kg de madeira, isto representa uma economia de 550 kg de matéria-prima. É claro que devem ser resguardadas as devidas diferenças entre ambos os combustíveis, pois cada um tem suas aplicações específicas. No entanto, estas considerações devem ser levadas em conta nos casos em que ambos os combustíveis possam ser utilizados indistintamente.

Como se pode observar na tabela 4.10, a densidade energética da madeira diminui após a torrefação. Ao comparar as densidades energéticas de ME₂₇₀ e CV, pode-se concluir que a energia contida num determinado volume de CV é praticamente equivalente ao mesmo volume de ME₂₇₀. A densidade energética dos BAD torreficados é praticamente 100% maior se comparada à madeira torrefeita ou ao carvão. Por exemplo, transportar 1 m³ de CV equivale a transportar 7.770,00 MJ, enquanto que transportar 1 m³ de BAD₂₇₀ equivale a 16.600,00 MJ, ou seja, o dobro. Isto mostra a magnífica economia em termos de volume, transporte e armazenagem que se pode ganhar com a produção de briquetes de alta densidade torreficados.

4.2.4 Propriedades mecânicas

O estudo das propriedades mecânicas tem o intuito de caracterizar o comportamento da biomassa torrefeita quando submetida a esforços mecânicos durante o uso energético, como por exemplo em reatores verticais de leito fixo, ou durante o transporte e a manipulação.

Tabela 4.11 Propriedades mecânicas da biomassa torrefeita

ID. Corpo de prova	Tensão de ruptura na compressão (kg cm ⁻²)	Índice de friabilidade “finos” (%)
<i>MADEIRA DE EUCALIPTO</i>		
ME	457,00 ± 20,0	-
ME ₂₃₀	425,00 ± 28,0	-
ME ₂₅₀	248,00 ± 34,0	-
ME ₂₇₀	170,00 ± 20,0	12,00 ± 0,5
<i>BRIQUETES DE ALTA DENSIDADE</i>		
BAD	245,00 ± 5,7	-
BAD ₂₃₀	206,00 ± 52,9	-
BAD ₂₅₀	148,70 ± 34,9	-
BAD ₂₇₀	50,00 ± 21,0	n.d.
<i>CARVÃO VEGETAL</i>		
CV	85,9 ± 20,0	23,00 ± 0,8

n.d. Não determinado

Os ensaios mecânicos realizados foram direcionados a determinar a resistência à compressão e a friabilidade do material. Para garantir a maior representatividade possível, os corpos de prova foram retirados de diferentes partes das amostras de biomassa torrefeitas. Todos os ensaios de compressão foram realizados em um equipamento servo-hidráulico, modelo 810 Test-Star II com capacidade para 10 toneladas. Os ensaios de compressão nas amostras CV, ME, ME₂₃₀, ME₂₅₀ e ME₂₇₀ foram realizados no sentido paralelo das fibras da madeira. No caso dos BAD não foi utilizada uma direção específica,

pois a distribuição das fibras no briquete é amorfa. Os corpos de prova foram preparados com formato aproximadamente cúbico com 20 mm de lado.

Conforme mostra a tabela 4.11, a resistência à compressão diminui na medida que a temperatura de tratamento aumenta. No caso da amostra ME₂₃₀ a variação da tensão de ruptura é pequena, apenas 7% com relação ao valor inicial da madeira. Para os casos de torrefação de madeira na faixa de 250-270°C o efeito da temperatura é mais notável, como por exemplo, no caso da amostra ME₂₇₀, a tensão de ruptura diminui até 63% do valor inicial da madeira. A variação abrupta da resistência mecânica na faixa de 250-270°C se deve a que a partir de 250°C a emissão de voláteis aumenta abruptamente, produzindo defeitos estruturais (poros e micro-gretas) na madeira e conseqüentemente diminuindo a resistência mecânica, como se pode observar nas micrografias mostradas no Anexo III. No entanto, deve observar-se que a resistência mecânica da madeira torrefeita é consideravelmente maior que a do CV.

No caso dos BAD torreficados, observa-se o mesmo efeito da temperatura sobre a tensão de ruptura. A partir de 250°C a resistência mecânica diminui aceleradamente (ver tabela 4.11). Do mesmo modo que na madeira, a perda de resistência deve-se à liberação de voláteis, os quais, ao sair do sólido, criam defeitos estruturais internos. É importante lembrar que durante o processo de briquetagem, parte das resinas que compõem a biomassa (principalmente a lignina) atua como uma espécie de ligante ou aglutinante entre as partículas que estão sendo compactadas. Como durante a torrefação os componentes da biomassa são degradados parcialmente, a coesão entre as partículas diminui e conseqüentemente a resistência do briquete também. No entanto, grande parte das propriedades físicas é conservada, o que permite que o briquete conserve o formato compactado. É importante destacar que os BAD conservam a resistência mecânica melhor do que os briquetes comuns. Isto, provavelmente, é possível porque os BAD são produzidos com altas pressões de extrusão, provocando que as resinas provenientes da lignina fluam em maior quantidade que nos briquetes de baixa densidade. Além disso, como a degradação da lignina começa a ser importante somente a partir de 300°C, a torrefação não afeta as resinas a ponto destas perderem o poder aglutinante.

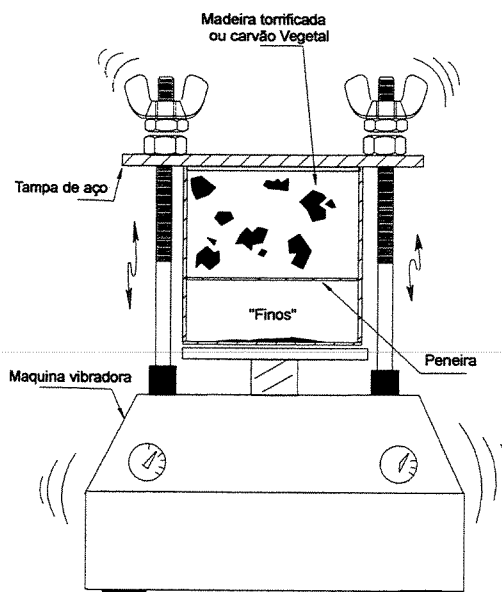


Figura 4.12 Montagem experimental para determinar a friabilidade

A percentagem de “finos” depende da friabilidade, e é um dos índices pelo qual se mede a qualidade do carvão vegetal. Os “finos” são indesejáveis para os consumidores por causa da sujeira que provocam, e para os produtores por causa das perdas durante o transporte e manipulação. Dentro das amostras de madeira torrefeita, a ME₂₇₀ é a mais friável, portanto foi realizado um teste para comparar a quantidade de “finos” nas amostras ME₂₇₀ e no CV (tabela 4.11). A figura 4.12 mostra um esquema da montagem experimental utilizada, a qual consta de uma máquina vibratória de peneiras. No lugar do jogo de peneiras foi colocado um cilindro metálico com uma peneira. Na parte de cima da peneira foi carregada a amostra e na parte inferior foram recolhidos os “finos” abaixo de 6mm. Quando se iniciavam as vibrações os pedaços de amostra se chocavam entre si, com as paredes e com a tampa do cilindro.

A mesma intensidade de vibração foi utilizada nos testes para ME₂₇₀ e CV; durante os testes foi variado o tempo de permanência, mas comprovou-se que depois de 15 min não ocorria mais desprendimento de “finos”. O resultado deste experimento demonstrou que a madeira torrefeita produz a metade de finos com relação ao carvão vegetal.

4.2.5 Perfil de combustão e emissão de CO das amostras ME₂₇₀ e BAD₂₇₀

Durante a caracterização físico-química, constatou-se que o teor de carbono fixo nas amostras ME₂₇₀ e BAD₂₇₀ é aproximadamente 60% menor do que os níveis preconizados para carvão de uso doméstico (ver tabela 4.8). No entanto, há pesquisadores que consideram a biomassa torrefeita um combustível adequado para atividades como churrasco e cocção doméstica (Bourgeois, 1985; Girard & N Shah, 1991; Schwob, 1985; Lipinsky et al., 2002). Em face desta aparente contradição, surge a necessidade de pesquisar se a biomassa torrefeita a 270-280°C pode representar algum perigo durante o uso doméstico. É importante lembrar que durante a combustão as substâncias que representam maior potencial de perigo para a saúde são os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs) e o monóxido de carbono (CO).

O alto índice de carbono fixo é usado como referência, porque se pressupõe que à medida que aumenta a quantidade de carbono fixo, a possibilidade de emissão de voláteis nocivos é menor. No entanto, seria prudente questionar se os voláteis nocivos são causados pelo baixo teor de carbono fixo ou pela combustão em condições inapropriadas e o alto teor de umidade contido no combustível.

Para estudar a liberação de CO, foi realizado um teste de combustão, para comparar os padrões de combustão e a emissão de CO entre o CV e as amostras ME₂₇₀ e BAD₂₇₀. Para isto foram usados uma churrasqueira, um analisador de gás (TESTO-300-MI) e uma escala para estimar a altura da chama. Na figura 4.13 é mostrado um esquema da montagem experimental, e no anexo III são apresentadas fotos do experimento.

Os testes foram realizados com 0,5 kg, 0,4 kg e com 0,3 kg em duplicata. Para garantir as mesmas condições de combustão para as amostras ME₂₇₀, BAD₂₇₀ e CV, o experimento foi realizado em recinto fechado com uma capela que mantinha um fluxo constante de aspiração de gás. Também para evitar qualquer interferência anormal estabeleceu-se como regra que as medições se iniciariam somente quando a combustão estaria totalmente desencadeada.

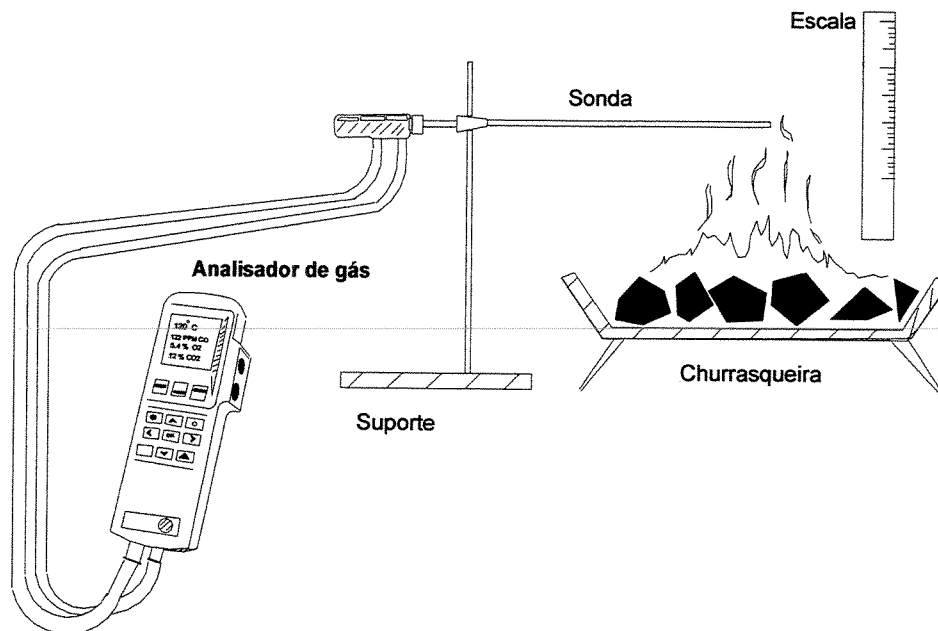


Figura 4.13 Esquema da montagem experimental para estudar o perfil de combustão e as emissões de CO

A sonda de gás foi situada aproximadamente a 15 cm acima do centro da churrasqueira, e o “nível zero” da escala coincidindo com a borda superior da churrasqueira. A figura 4.14 mostra os valores médios da emissão de monóxido de carbono durante a combustão de 500 gramas de ME₂₇₀ e 500 gramas de CV. No início do processo de combustão da amostra ME₂₇₀, a emissão de CO (1600 ppm) é maior que durante o início da queima do CV (950 ppm). No entanto, nas etapas posteriores não houve predominância entre as amostras, registrando-se picos de emissão de até 2400 ppm em ambos os casos. A média das emissões de CO para ambos os materiais foi em torno de 1100 ppm. Quando a experiência foi repetida com 300 gramas, foi observado o mesmo comportamento. No início do experimento houve um pico máximo de 2200 ppm para a amostra ME₂₇₀, e nas restantes etapas o nível de CO oscilou entre 600 e 400 ppm. Já o CV apresentou menos liberação de CO no começo da queima, entretanto nas demais etapas ocorreram três picos de CO de 764 ppm, 1558 ppm e 1227 ppm, respectivamente (figura 4.15).

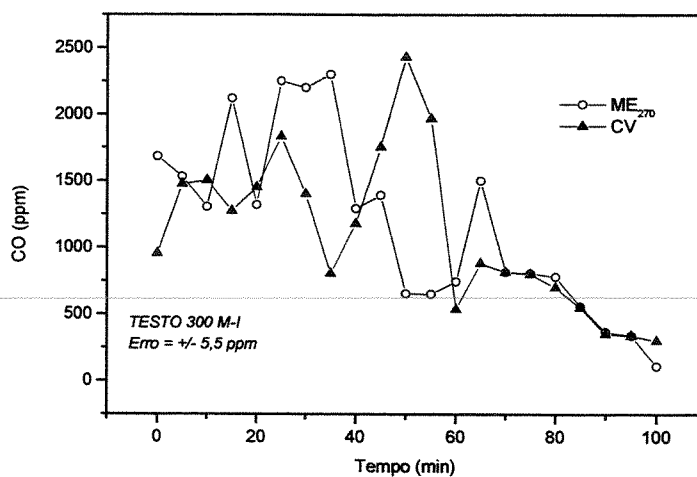


Figura 4.14 Emissão de CO durante a queima de 500 g de ME₂₇₀ e CV

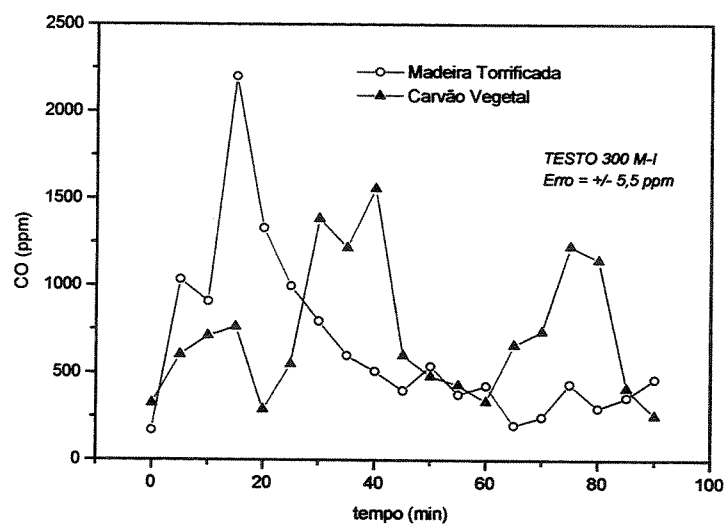


Figura 4.15 Emissão de CO durante a queima de 300 g de ME₂₇₀ e CV

Nos experimentos com BAD_{270} , observou-se que também no estágio inicial da combustão, as emissões de CO são maiores em comparação às emissões durante a queima de CV. Entretanto, após a etapa inicial a emissão de CO diminui significativamente. Na figura 4.16 é mostrado um experimento realizado com 400 gramas de BAD_{270} e CV.

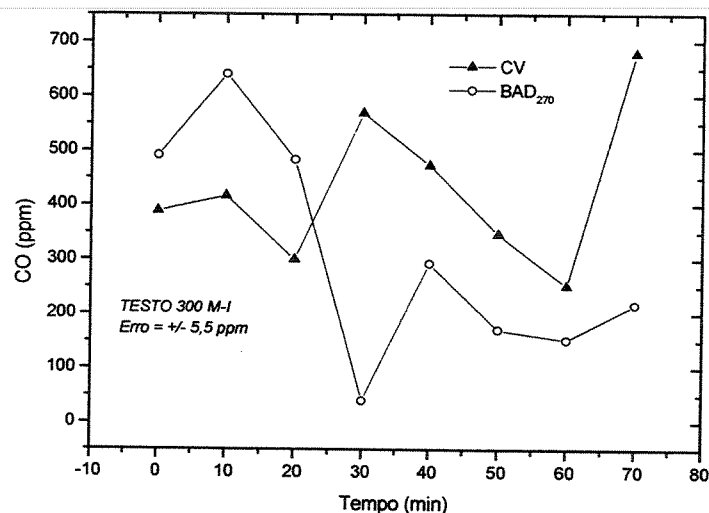


Figura 4.16 Emissão de CO durante a queima de 400 g de BAD_{270} e CV

As experiências acima descritas mostraram que durante a queima de BAD_{270} e ME_{270} os maiores níveis de CO ocorrem no estágio inicial da combustão, entretanto, durante a combustão de CV a maior concentração de CO ocorre nas etapas posteriores. Isto ocorre, provavelmente, porque o teor de voláteis nas amostras BAD_{270} e ME_{270} é maior que no CV, e portanto, no começo da combustão existe maior desprendimento de gases e vapores. No entanto, transcorrida a etapa inicial, as emissões de CO provenientes da biomassa torrefeita diminuem sensivelmente a ponto de serem menores ou iguais às emissões provenientes do CV, o qual no início apresenta um processo de boa combustão sem excesso de gases. Mas, à medida que a combustão avança a difusão do oxigênio se dificulta devido à presença de uma camada de cinzas na superfície, e conseqüentemente aumenta a emissão de CO.

Os resultados anteriores demonstram que ao menos nas condições testadas a madeira torrefeita apresenta níveis de emissões de CO muito similares aos níveis do carvão vegetal, embora o um padrão de evolução temporal seja totalmente diferente.

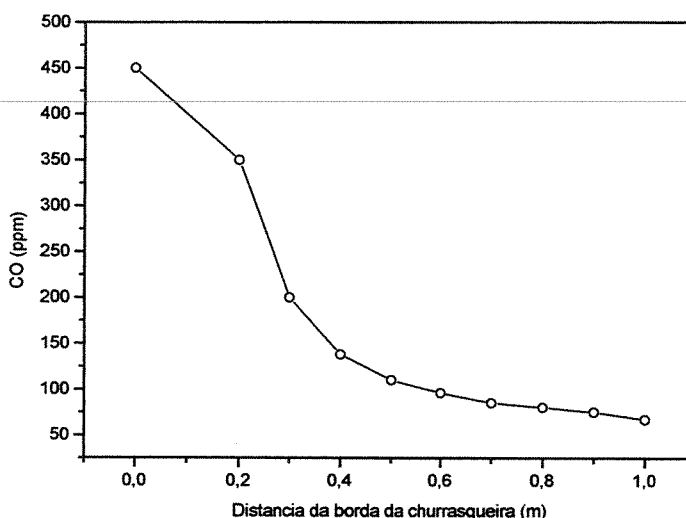


Figura 4.17 Concentração de CO ao redor de uma churrasqueira durante a queima de ME₂₇₀

É conhecido que o monóxido de carbono é altamente tóxico, pois este composto é incolor e inodoro, e os efeitos na saúde humana são consequência da sua capacidade de se combinar irreversivelmente com a hemoglobina, dando lugar à formação da carboxihemoglobina, composto que reduz a capacidade do sangue de transportar oxigênio, e que portanto pode provocar a morte por asfixia (Bruce N et alli, 2000). Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS), em ambiente fechado o nível máximo de CO deve ser de 10 ppm para uma exposição contínua de 8 horas, e a concentração de até 100 ppm é o limite para exposição em curtos períodos (15 min.) sem causar danos de intoxicação (WHO, 2000). Considerando estas recomendações foi realizado um experimento de combustão no qual foram determinados os níveis de CO em torno da churrasqueira, pois as concentrações detectadas nos testes anteriores foram determinadas muito próximas das amostras e não no meio ambiente onde se desenvolve a atividade.

O experimento consistiu em medir as concentrações de CO em um raio de 1 metro em torno da churrasqueira (figura 4.17). Os resultados indicam que as concentrações de CO obviamente se diluem à medida que a distância da fonte (churrasqueira) aumenta. Portanto, é possível considerar que em condições similares às testadas, não existem concentrações de CO superiores as recomendadas pela OMS. De todo modo, deve-se ter extremo cuidado quando se utilizam combustíveis, seja carvão ou outros, em recintos fechados.

Os experimentos acima descritos também permitiram caracterizar o perfil de combustão da biomassa torrefeita. A figura 4.18 mostra a temperatura e as fases da combustão de amostras BAD₂₇₀ e CV. Conforme pode ser observado, o período inicial da queima de BAD₂₇₀ se caracteriza pela presença de chamas e altas temperaturas, com o decorrer do tempo as chamas se extinguem dando lugar às brasas, e a temperatura se estabiliza em torno dos 56°C. O período de brasas corresponde a 70% do tempo total de queima. O CV não apresentou chamas durante a combustão, a temperatura se manteve estável em torno de 48°C durante o experimento.

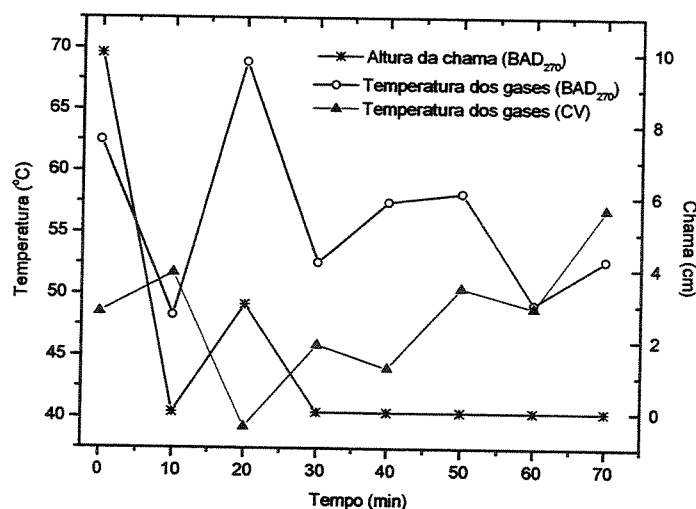


Figura 4.18 Perfil de combustão das amostras BAD₂₇₀ e CV

As experiências com ME₂₇₀ são mostradas na figura 4.19. Como pode ser observado, no período dos primeiros 20 minutos da combustão há presença de chamas que atingem até 20 cm de altura com temperatura de até 240°C. Isto ocorre porque as amostras ME₂₇₀ possuem alta porosidade e conseqüentemente alta reatividade, ao contrário dos BAD₂₇₀ (ver figura 4.18). É bom lembrar que as amostras BAD₂₇₀ possuem uma densidade duas vezes superior à das amostras ME₂₇₀. Com o decorrer do tempo as chamas se extinguem e a temperatura se estabiliza em torno de 65°C. O CV ao igual que no experimento anterior não apresentou chamas e manteve uma combustão estável com temperatura em torno de 86°C.

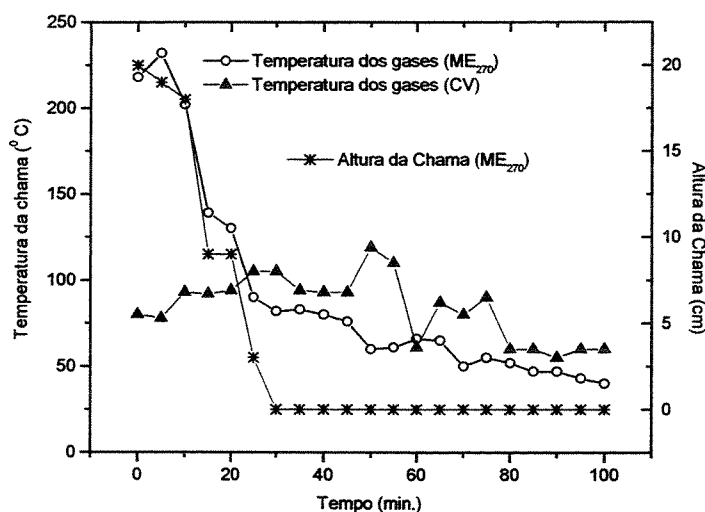


Figura 4.19 Perfil de combustão das amostras BAD₂₇₀ e CV

4.2.6 Estudo comparativo do teor de HPAs nas amostras ME₂₇₀, BAD₂₇₀ e CV

4.2.6-a Os HPAs e os efeitos na saúde.

Os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs) são compostos orgânicos que contêm dois ou mais anéis aromáticos contíguos (Netto et alli, 2000). A maior parte destes compostos entra na atmosfera através de processos de combustão e de pirólise. Devido à sua baixa solubilidade em água e sua grande afinidade por materiais particulados, os HPAs não são encontrados em concentrações expressivas em estado isolado. De maneira geral,

tanto os HPAs quanto seus derivados estão associados ao aumento da incidência de diversos tipos de câncer no homem (Netto et alli, 2000).

Nos alimentos já foram detectados HPAs, como resultado da deposição de tais substâncias suspensas no ar, e no caso de peixes, devido à água contaminada. Estas substâncias podem ser formadas, também, durante certas preparações de alimentos, como grelhar, assar e fritar. Para a população em geral, a maior exposição aos HPAs se dá por meio dos alimentos e do ar contaminado em ambientes fechados (Bruce et alli, 2000).

O HPA mais estudado é o Benzopireno (ou Benzo[a]pireno, BaP), o qual é considerado o mais perigoso por ser fisiologicamente ativo com as células humanas. Igualmente aos outros HPAs, o BaP provém da combustão ou da pirólise de materiais orgânicos, apresenta-se à temperatura ambiente sob a forma de cristais, e não emite cheiro. É pouco solúvel em água, mas dissolve-se em numerosos solventes orgânicos. Também como característica notável o BaP é muito estável, mesmo a temperaturas muito altas.

As vias de contato com o BaP são muito variadas, sendo as mais comuns a penetração por inalação, o contato com a pele e via oral. Quando o BaP é absorvido diretamente da fase gasosa pode ser rapidamente metabolizado e eliminado do organismo em cerca de uma hora. Entretanto, quando o BaP está associado com partículas respiráveis, a eliminação é bem mais demorada, podendo levar semanas (Netto et alli, 2000).

Segundo a OMS, o valor padrão permitido de BaP não deve ultrapassar de 7 µg/L, baseado em estudos de carcinogenicidade oral, em cobaias. Em curto prazo, um humano, quando exposto a níveis acima do máximo permitido de BaP, por períodos relativamente pequenos, pode potencialmente desenvolver os seguintes problemas de saúde: danificação das células vermelhas do sangue, anemia e supressão do sistema imunológico. Já para períodos mais prolongados de exposição, os efeitos se manifestam em longo prazo, podendo-se ter problemas no desenvolvimento, na reprodução, bem como o possível desenvolvimento de câncer (WHO, 1998).

Além do BaP existe uma grande variedade de HPAs e derivados que são considerados cancerígenos quando associados a partículas ou na forma de aerossóis. Na tabela 4.12 são apresentados dados relativos aos efeitos carcinogênicos, genotóxicos e mutagênicos de alguns PHAs.

Tabela 4.12 Dados relativos aos efeitos carcinogênicos, genotóxicos e mutagênicos de alguns HPAs.

HPA	Carcinogenicidade	Genotoxicidade	Mutagenicidade
Fluoreno	I	L	-
Fenantreno	I	L	+
Antraceno	N	N	-
Fluoranteno	N	L	+
Pirene	N	L	+
Benzofluorenos	I	I	?
BenzofluOTantenos	S	I	+
Ciclopeirta[cd]pireno	L	S	+
Benzo[a]antraceno	S	S	+
Criseno	L	L	+
Trifemieno	I	I	+
Benzo[e]pireno	I	L	+
Benzo[a]pireno	S	S	+
Perileno	I	I	+
Indeno[1,2,3-cd]pireno	S	I	+
Dibenz[ac] antraceno	L	S	+
Dibenz[a]antraceno	S	S	+
Dibenz[aj]antraceno	L	I	+
Benzo[ghi]perileno	I	I	+

Fonte: Netto et alli, 2000.

Dados disponíveis para a comprovação do efeito:

S = suficientes; I = insuficientes; L = limitados; N = não carcinogênico.

Genotoxicidade foi avaliada através dos testes de deterioração do DNA e aberração cromossômica.

Mutagenicidade (teste de Ames): + (positivo); -(negativo); ? (inconclusivo)

4.2.6-b Objetivos e método de análise de HPAs.

Considerando que os processos de carbonização e torrefação podem ser uma fonte de emissão de HPAs, suspeitou-se que muito provavelmente vários tipos de HPAs estivessem alojados no CV e nas amostras ME₂₇₀ e BAD₂₇₀. Portanto, considerou-se oportuno determinar a concentração de HPAs nas amostras torrefeitas e compará-la à concentração no CV. A presença de HPAs no CV e na biomassa torrefeita deve-se principalmente à deposição pela condensação dos vapores gerados no processo. O estudo

das concentrações de HPAs teve o intuito de determinar o potencial poluidor das amostras CV, ME₂₇₀ e BAD₂₇₀ quando manipuladas pelos consumidores domésticos e indiretamente avaliar a contaminação produzida pelos processos de carbonização e torrefação.

As análises para determinação de HPAs em amostras sólidas envolvem sempre, após o adequado preparo da amostra, o uso de um sistema acoplado de Cromatografia Gasosa/ Espectrometria de Massa (GC-MS). De acordo com a origem da amostra, ela é primeiramente absorvida em algum tipo de filtro apropriado, depois extraída por meio de um solvente apropriado (diclorometano [CH₂ Cl₂], por exemplo), e então passa por alguns processos de concentração de solução (como Soxhiet¹, Kudema-Danish), antes de passar pelo conjunto GC-MS, previamente calibrado com os padrões dos HPAs que se desejam determinar. Os métodos comumente utilizados para a determinação de HPAs seguem as normas ASTM D5412, ASTM D6209, ASTM E2143, e os métodos USEPA TO-13 A e USEPA 8270C.

O método utilizado para a determinação dos HPAs nas amostras estudadas foi executado de acordo com o procedimento de operação padrão SOP#1 e o protocolo USEPA 8270C da Agência Americana de Proteção ao Meio Ambiente (USEPA). As análises foram realizadas através do laboratório *Analytical Solution S.A.*, em São Paulo, capital.

4.2.6-c Resultados e discussão.

Os resultados da análise são apresentados na tabela 4.13. Durante o procedimento foram detectados 16 tipos de HPAs acima da concentração de 2,5 µg/kg. Segundo o relatório de análise, a recuperação dos padrões internos observados esteve na faixa de 53-106 %, sem interferência por parte dos brancos de análise.

O primeiro resultado que chama a atenção é a ausência do BaP nas amostras. Entende-se que se existir presença de BaP em alguma das amostras, as quantidades devem ser inferiores a 2,5 µg/kg (2,5 ppb), que é o valor limite de detecção. Portanto, não havendo a presença de BaP nas amostras estudadas, a biomassa torrefeita pode ser “comparada” ao carvão vegetal em termos de teor de BaP. No entanto, em relação aos outros compostos o CV possui teores de HPAs consideravelmente maiores. Por exemplo, o teor de Naftaleno se encontra em proporção 6 vezes maior no CV que nas amostras BAD₂₇₀ e

ME₂₇₀. O Naftaleno é um composto de baixa toxicidade, mas pode provocar alergia em algumas pessoas, irritando a pele e as mucosas das vias respiratórias.

Tabela 4.13 Concentração de HPAs nas amostras de biomassa torrefeita e no CV.

HPAs	ME ₂₇₀ (µg/kg)	BAD ₂₇₀ (µg/kg)	CV (µg/kg)
Naftaleno	329	182	2002
Acenaftileno	90	N.D.	24
Acenafteno	41	N.D.	38
Fluoreno	43	31	47
Fenantreno	113	N.D.	413
Antraceno	42	N.D.	676
Fluorantreno	37	N.D.	62
Pireno	23	N.D.	49
Benzo(a)antraceno	N.D.	N.D.	N.D.
Criseno	N.D.	N.D.	20
Benzo(b)fluoranteno	N.D.	N.D.	N.D.
Benzo(K)fluoranteno	N.D.	N.D.	N.D.
Benzo(a)pireno	N.D.	N.D.	N.D.
Indeno(123 -CD)pireno	N.D.	N.D.	N.D.
Dibenzo(a,h)antraceno	N.D.	N.D.	N.D.
Benzo(ghi)pireno	N.D.	N.D.	N.D.
Total PAH	717 µg/kg	213 µg/kg	3330 µg/kg

Limites de detecção: 2,5 µg/kg (2,5 ppb)

N.D.- não detectado acima do limite de detecção analítico

Dos HPAs detectados os potencialmente mais tóxicos são o Antraceno e o Criseno. É importante ressaltar que o Antraceno se encontra no CV em uma proporção de 676 µg/kg, enquanto nas amostras ME₂₇₀ os teores são de 42 µg/kg e nos BAD₂₇₀, não foi detectado, ou seja, no CV a proporção de Antraceno é de 16 para 1 com relação à madeira torrefeita. O Antraceno é levemente tóxico, e quando inalado em poeira ou aerossóis causa irritação ao trato respiratório. Já o composto Criseno não foi detectado em nenhuma das amostras de ME₂₇₀ ou BAD₂₇₀, entretanto, no CV foram detectadas 20 µg/kg. O Criseno é classificado

como "menos" cancerígeno e mutagênico quando estudado em animais, porém não existem dados sobre humanos, portanto não fica descartada a possibilidade de afetar as células do organismo.

Deve-se prestar atenção na pequena variedade de HPAs detectados nas amostras de BAD₂₇₀. Provavelmente, isto se deve a que quando os briquetes BAD foram torrefeitos, a temperatura não ultrapassou os 270 °C, e durante esta operação não foram registradas reações exotérmicas, nem reações parasitas de carbonização. Portanto, as condições de termo-condensação se desenvolveram de forma tal que se inibiram as reações "secundárias" de pirólise, as responsáveis pela aparição dos HPAs. Já nas amostras ME₂₇₀ as condições de torrefação não foram totalmente isotérmicas, pois houve momento em que foram detectadas algumas reações parasitas de carbonização. Portanto, acredita-se que estes fenômenos sejam a causa de haver mais variedade de HPAs nas amostras ME₂₇₀ do que nas amostras BAD₂₇₀. No CV foram detectados 5 vezes mais HPAs do que na biomassa torrefeita.

Os resultados deste estudo indicam que as amostras de biomassa torrefeita não apresentam nenhum risco potencial para a saúde, quando manipuladas ou pela eventual aspiração da poeira desprendida destas, pois não foi detectada a presença de BaP ou de outros HPAs potencialmente cancerígenos. Nas amostras de CV foi detectado o Criseno, o qual é classificado como mutagênico, mas as concentrações são muito pequenas. Portanto, a manipulação do CV também não representa nenhum risco à saúde do consumidor. Por outro lado, a maior quantidade e diversidade de HPAs nas amostras CV indicam que o processo de carbonização é potencialmente mais poluente do que a torrefação.

Capítulo 5

Estudo de mercado e viabilidade econômica da torrefação

Este capítulo aborda aspectos relacionados ao mercado e à viabilidade técnico-econômica do processo de torrefação. Através de um processo de recopilação de informações de marketing, foi caracterizada uma parte do mercado na qual eventualmente a biomassa torrefeita pode ser comercializada. Este estudo permitiu estimar a dimensão do mercado e o nível de adequação da biomassa torrefeita neste. Com bases nas estimativas mercadológicas, foi realizado um estudo preliminar da viabilidade técnico-econômica do processo de torrefação.

5.1 Pesquisa de mercado

A pesquisa de mercado é uma das etapas mais importante durante o estudo de viabilidade técnico-econômica-financeira de um projeto. O estudo de mercado é o ponto de partida para dimensionar, em última instância, o tamanho do empreendimento (Machado, 2002), além de estabelecer os critérios estratégicos para a comercialização de determinado bem material (Mattar, 2000; Boyd, 1973). Portanto, foi considerado oportuno realizar uma pesquisa de mercado focalizada no consumo de lenha e CV, com intuito de caracterizar tanto os mercados consumidores como os produtores destes combustíveis, e desta maneira poder estimar as possibilidades de comercialização da biomassa torrefeita em uma parte dos consumidores que atualmente utilizam lenha e CV.

Durante o estudo, primeiramente foi realizada uma pesquisa exploratória para diagnosticar os mercados e a produção de lenha e CV no país e no Estado de São Paulo. Posteriormente, com base nessas informações, foi realizada uma pesquisa específica de tipo descritiva, na qual foram investigados os costumes, hábitos de consumo e critérios de

alguns segmentos consumidores de CV e lenha que potencialmente podem consumir biomassa torrefeita.

5.1.1 Pesquisa exploratória

Para esta pesquisa, utilizou-se o método de “*levantamento por fontes secundárias*”. Este método se baseia na recopilação e processamento de dados e estatísticas publicadas na literatura especializada e em órgãos públicos. As principais fontes usadas foram o Balanço Energético Nacional (BEN), Serviço de Apoio às Micros e Pequenas Empresas (SEBRAE), Federação e Centro de Comércio do Estado de São Paulo (FCESP), Sindicato do Comércio Varejista de Carvão Vegetal e Lenha de São Paulo (SINCAL), Associação Nacional da Indústria Cerâmica (ANICER), Associação das Cerâmicas de Itu e Região (ACERVIR), e o Sindicato da Indústria Cerâmica e Olarias de Vargem Grande do Sul (SICOV).

A pesquisa foi conduzida em ordem de abrangência. Primeiro foram identificados os principais consumidores de madeira e CV, assim como a evolução da produção destes combustíveis em nível nacional. Depois de identificados os principais setores, a pesquisa exploratória foi direcionada ao Estado de São Paulo, procurando abranger a cadeia de produção e consumo de CV e lenha.

5.1.1-a Diagnóstico nacional

Segundo dados do BEN (BEN, 2001), no ano 2001 a lenha ocupou o segundo lugar entre as energias renováveis, contribuindo com 10,1% do total. No ano 2000 a lenha apresentou um crescimento de 2,7% no setor residencial e de 2% no setor industrial em relação ao ano anterior, mas, no setor comercial o consumo decresceu 2,6%. A figura 5.1 mostra a evolução do consumo de lenha por setores econômicos. Conforme os dados mostrados, o consumo de lenha apresentou uma tendência de queda em todos os setores no período de 1985 a 1996. A partir do ano 1996 o consumo de lenha começou a crescer nos setores residencial e industrial, mas no setor comercial o consumo ainda apresenta tendência de queda, o que provavelmente ocorre pela oferta de combustíveis derivados do petróleo e pela modernização deste setor que está formado por restaurantes, lanchonetes e pizzarias. Analisando a série histórica de consumo de lenha no período 1995-2000, pode-se determinar a taxa média geométrica de consumo para os diferentes setores econômicos

através da equação 5.1, e conseqüentemente podem ser realizadas estimativas da tendência de consumo de lenha para os próximos anos através da equação 5.2 (Machado, 2002).

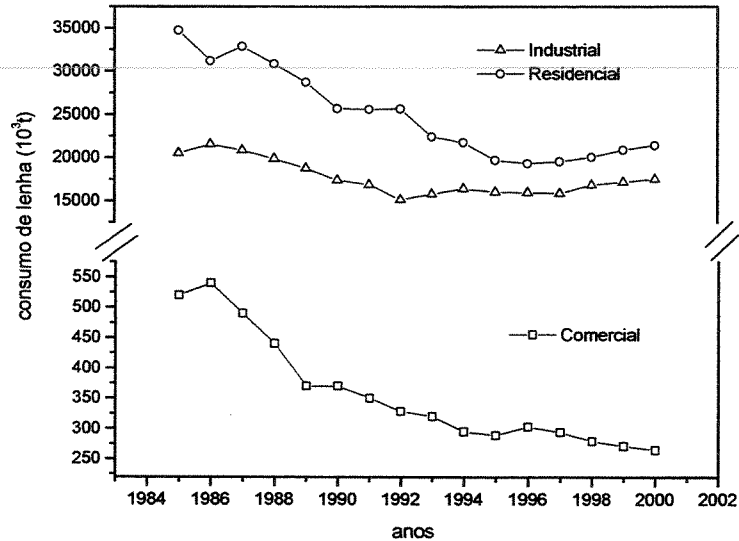


Figura 5.1 Série histórica de consumo de lenha por setores. Fonte: B.E.N. 2001

Taxa média geométrica:

$$i = \sqrt[n]{\frac{Vn}{Vo}} - 1 \quad (5.1)$$

Onde Vo corresponde ao consumo no início da série histórica analisada, Vn corresponde ao consumo no final, e n corresponde ao número de períodos existentes na série histórica.

Consumo projetado:

$$Con_{n+1} = Con_n (i + 1)^n \quad (5.2)$$

Onde Con_n é o consumo no final da série histórica observada.

Aplicando as equações supramencionadas pode-se projetar uma taxa média de 2,4% de crescimento no consumo industrial e 2,6% para o consumo residencial; entretanto, para

o comércio projeta-se uma queda de 3,3%. O consumo projetado para 2004 será de 232×10^3 t para o setor comercial, 19271×10^3 t para o setor industrial e 23735×10^3 t para o setor residencial. É importante ressaltar que a extrapolação destas tendências tem caráter meramente indicativo, ou seja, não assegura a ocorrência futura da previsão, mesmo porque existem inúmeros fatores capazes de alterar estas projeções, tais como inflação, medidas governamentais, recessão econômica e surgimento de combustíveis substitutos, entre outros fatores que nem nas mais sofisticadas técnicas projetivas podem ser levados em consideração.

As indústrias cerâmicas consomem cerca de 34% da lenha utilizada no setor industrial. O segmento das cerâmicas possui cerca de 12 000 empresas, em sua maioria micro ou de pequeno porte, com estrutura simples e familiar. Elas estão espalhadas pelo Brasil, no entanto, em algumas regiões ou cidades, em função da disponibilidade de matérias-primas, existem grandes concentrações desse tipo de indústria. As cerâmicas geram cerca de 650 mil empregos diretos e aproximadamente 2 milhões de empregos indiretos (ANICER, 2002). A produção brasileira de produtos de cerâmica vermelha⁷ encontra-se concentrada nos Estados de Minas Gerais, Paraná, Santa Catarina e São Paulo. Na região Sudeste concentram-se aproximadamente 3 565 empresas que empregam diretamente 82 000 trabalhadores (Tapia, 2000).

Embora nos últimos anos outros combustíveis estejam sendo utilizados nas cerâmicas, a lenha ainda é a principal fonte de energia para este segmento, haja vista que ao longo dos anos a lenha representou, em valores médios, aproximadamente 50 % da matriz energética destas indústrias. O consumo de lenha está diretamente ligado com a produção e a demanda dos produtos cerâmicos. Neste ponto, é importante ressaltar que este setor historicamente tem sido afetado pelas crises financeiras, pois está ligado ao setor da construção civil o qual por sua vez depende de financiamentos e créditos.

⁷ CERÂMICA VERMELHA - compreende aqueles materiais com coloração avermelhada empregados na construção civil (tijolos, blocos, telhas e tubos cerâmicos / manilhas) e também argila expandida (agregado leve), utensílios domésticos e adorno. As lajotas muitas vezes são enquadradas neste grupo e outras, em Cerâmicas ou Materiais de Revestimento.

No ano 2000 o consumo de CV teve um aumento de 1,6% em relação ao ano anterior. Nos últimos três anos, o consumo de carvão vegetal teve um aumento significativo no setor comercial; entretanto, nos setores residencial e industrial o consumo permaneceu praticamente estável, como pode ser visto na figura 5.2. Analisando a série histórica do consumo no período de 1995 a 2000, projeta-se uma taxa média geométrica de 1,3% de crescimento no setor comercial, o que equivale a um consumo projetado de 98×10^3 t para o ano 2004. Enquanto isso para o setor residencial a taxa projetada é praticamente nula, o que equivale a um consumo 591×10^3 t no ano 2004. Já para o setor industrial a taxa projetada é de uma queda de 2,8%, o que representa um consumo de 5490×10^3 t no ano 2004.

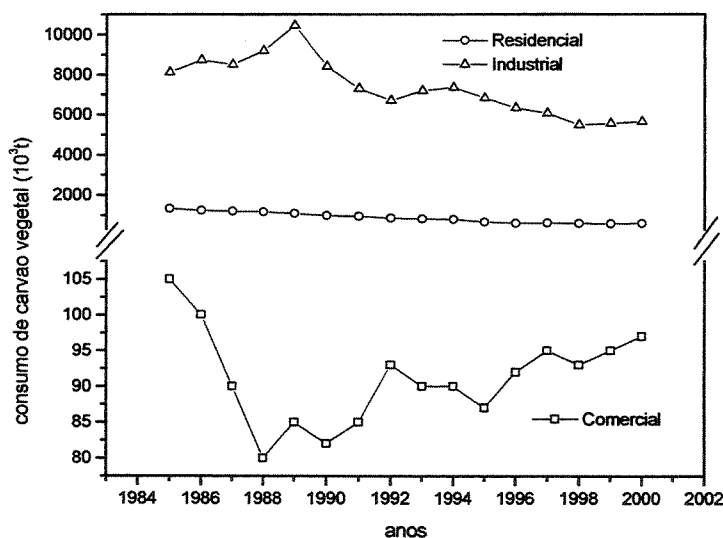


Figura 5.2 Série histórica de consumo de carvão vegetal por setores.
Fonte: B.E.N. 2001

Das séries históricas estudadas pode-se concluir que no ano 2000 foram consumidas 70 milhões de toneladas de lenha, das quais 25 milhões de toneladas foram consumidas em produção de energia elétrica e CV (BEN, 2001). Portanto 45 milhões de toneladas foram usadas como combustível nos setores econômicos da sociedade. Entre os setores, o que mais lenha consome é o residencial, seguido do setor industrial (cerâmicas), e por último o setor comercial, o qual se restringe apenas ao uso em restaurantes e pizzarias. Quanto ao

carvão vegetal, no ano 2000 foram consumidas 6,5 milhões de toneladas, sendo a indústria a maior consumidora (principalmente ferro-gusa), seguida do setor residencial e por último o setor comercial, representado principalmente por restaurante e churrascarias. Estes dados exploratórios indicam que em nível nacional, os setores onde podem existir mercados potenciais para a biomassa torrefeita, são o setor residencial em sua totalidade, os restaurantes e pizzarias no setor comercial e as cerâmicas no setor industrial.

5.1.1-b Diagnóstico no Estado de São Paulo

Os dados disponíveis a respeito do consumo e distribuição de lenha e carvão vegetal, no Estado de São Paulo, são bastante limitados. A fonte mais precisa e abrangente foi encontrada no levantamento realizado pelo SINICAL em coordenação com o SEBRAE e a FCESP no marco do programa Pró-Carvão para a Qualificação e Certificação da industrialização de carvão vegetal em São Paulo (SINICAL, 2000).

No Estado de São Paulo há um total de 222 empresas que comercializam lenha, com um volume de produção de 29 849 st/mês. Da totalidade destas empresas, apenas 16% têm endereço em zona urbana. Em torno de 75% das empresas entrevistadas não têm registro no IBAMA e 41% não possui cadastro de pessoa jurídica (CNPJ).

No comércio de lenha a maior parte da matéria-prima utilizada é oriunda de reflorestamento, da qual cerca de 80% pertence ao gênero *Eucaliptus*. Em torno de 75% da matéria-prima provêm de florestas próprias. No mercado de lenha, praticamente não há intermediários, isto é, as próprias empresas produtoras distribuem a lenha junto aos consumidores.

A figura 5.3 mostra os principais mercados consumidores de lenha no Estado de São Paulo. As cerâmicas constituem hoje o maior mercado consumidor: 21% da lenha comercializada é consumida nas 1400 indústrias cerâmicas do Estado de São Paulo. O consumo no resto dos mercados está distribuído uniformemente entre pizzarias, padarias, cooperativas, carvoarias, consumo residencial, indústrias e restaurantes.

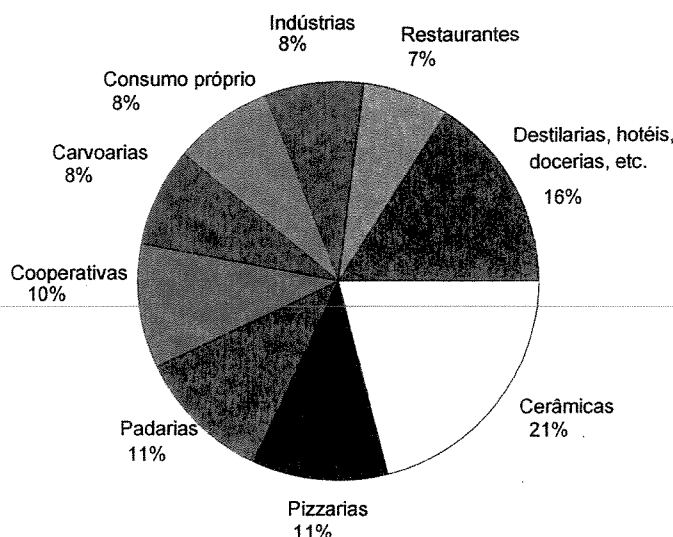


Figura 5.3 Distribuição do consumo de lenha nos principais mercados do Estado de São Paulo. Fonte: SINICAL, 2000.

As pizzarias são importantes centros de consumo de lenha, pois no Estado tradicionalmente a pizza é assada em forno à lenha. A título de exemplificação, pode-se mencionar que somente na cidade de São Paulo existem aproximadamente 5800 pizzarias, as quais comercializam em torno de um milhão de pizzas por dia.

No Estado de São Paulo atuam um total de 781 empresas na comercialização e distribuição do carvão vegetal, das quais 69% são produtoras e 31% distribuidoras. As empresas produtoras possuem 4 453 fornos instalados que possibilitam uma capacidade máxima de produção de 184 716 t/ano. No entanto, atualmente a produção não ultrapassa 108 360 t/ano, o que pressupõe uma capacidade ociosa de 76 356 toneladas anuais.

Cerca de 84% das empresas produtoras está assentada em zonas rurais, e mais da metade das empresas produtoras realizam a comercialização direta (57%) do carvão sem necessidade de intermediários ou empresas distribuidoras. Na produção de carvão vegetal 99% da matéria prima provém de florestas replantadas, predominando a lenha de eucalipto. Além da grande incidência do uso da madeira reflorestada, 59% da madeira é procedente do próprio produtor.

Embora sejam os pequenos produtores os que predominam, segundo os dados do SINCAL, 81% possuem água potável, 77% têm condições adequadas de eletricidade e 61% possuem galpão de apoio em condições adequadas, ou seja, a maioria dos produtores apresenta condições de infraestrutura para melhorar as tecnologias de produção de carvão.

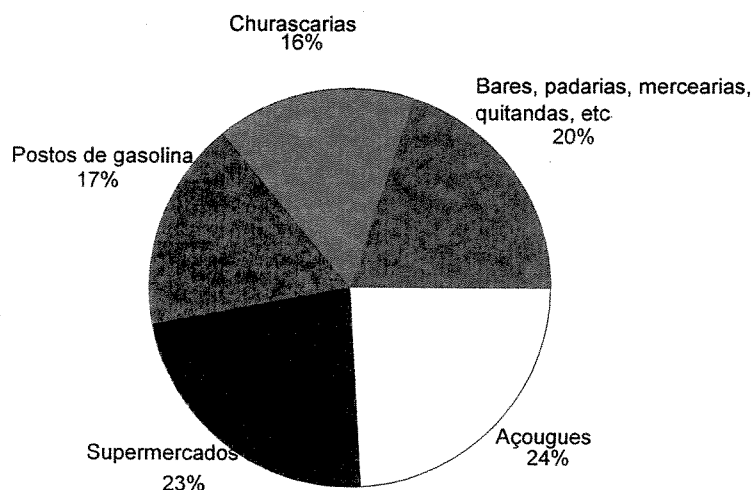


Figura 5.4 Destino do carvão vegetal no Estado de São Paulo. Fonte: SINCAL, 2000

Do carvão produzido, 56% é comercializado no Varejo, 37% no Atacado e 6% é usado para consumo próprio do produtor. Embora os produtores movimentem diretamente o maior volume de carvão comercializado, os distribuidores são responsáveis pela maioria dos clientes consumidores no varejo. A figura 5.4 mostra a distribuição dos mercados consumidores de carvão vegetal. Na realidade, açougues, supermercados, postos de gasolina e outros são apenas um destino intermediário, pois o consumidor final dará uso residencial ao produto (churrasco). Entretanto, as churrascarias podem ser classificadas como uso no comércio. Pode-se concluir que 64% do carvão comercializado tem como destino final o consumo doméstico, e 36% no setor comercial.

O estudo realizado pelo SINICAL determinou o índice de relevância dos parâmetros de qualidade que mais influência tem na qualidade do carvão vegetal, segundo a opinião dos produtores. O aspecto julgado menos importante foi a emissão de fumaça durante a queima do carvão, e o julgado mais importante foi a presença de “finos” na embalagem e a granulométrica do produto. Na figura 5.5 são apresentados os parâmetros de qualidade por índice de relevância na comercialização do carvão vegetal.

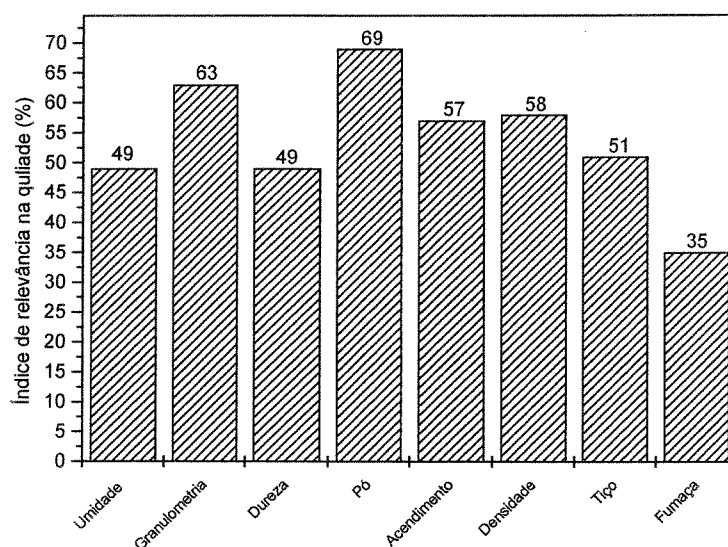


Figura 5.5 Índice de relevância dos parâmetros de qualidade do carvão vegetal, segundo os produtores. Fonte: SINICAL, 2000

5.1.2 Pesquisa descritiva

A pesquisa exploratória diagnosticou a cadeia produtiva de lenha e CV, permitindo detectar os principais mercados consumidores, e as particularidades do comércio e distribuição destes insumos no Estado de São Paulo. Foram identificados três segmentos de mercado importante: o consumidor doméstico de CV, no setor comercial as pizzarias e no setor industrial as cerâmicas. De modo geral, também, foram determinados os índices de qualidade da lenha e do CV, segundo a opinião dos produtores e comerciantes destes combustíveis. Portanto, para caracterizar de forma mais precisa os consumidores finais foi

realizada uma pesquisa de campo para identificar os hábitos de consumo, as opiniões, gostos, entre outros aspectos, e assim deste modo determinar o possível potencial de comercialização da biomassa torrefeita.

O tipo de pesquisa utilizada foi a “*pesquisa de campo descritiva*”, a qual utiliza a entrevista pessoal com questionário para coletar os dados necessários. É importante destacar que de acordo com os objetivos deste estudo e dos recursos e tempo disponíveis este tipo de pesquisa se apresenta como a mais adequada (Mattar, 2000; Ferber, 1974).

O tipo de questionário utilizado foi de tipo *Estruturado não disfarçado*. Este questionário é utilizado em pesquisas descritivas, principalmente em levantamentos amostrais e estudos de campo, o que se ajusta aos propósitos desta pesquisa. Neste instrumento, as perguntas são apresentadas exatamente com as mesmas palavras, sempre na mesma ordem, e com as mesmas opções de resposta para todos os entrevistados. O objetivo desta padronização é garantir que todos os entrevistados respondam a mesma pergunta (Mattar, 2000).

Na pesquisa, a fonte de dados foi o consumidor doméstico e as unidades comerciais e industriais selecionadas. Os dados coletados responderam às características do mercado estudado, e de forma geral visaram coletar as atitudes e opiniões, conscientização e conhecimento, motivações e comportamento dos consumidores de lenha e CV, os quais são potenciais consumidores de biomassa torrada.

5.1.2-a Mercado do consumidor doméstico de carvão vegetal.

O objetivo desta pesquisa de campo foi determinar o potencial da madeira torrefeita como combustível no mercado doméstico. Para isto foi necessário em primeira instância conhecer o estado comportamental dos consumidores, seu hábito de consumo, sua conformidade com os produtos já existentes (no caso o carvão vegetal), o nível cognitivo dos produtos existentes no mercado, entre outros aspectos.

Através de um questionário estruturado não disfarçado (ver anexo V) foi realizada a caracterização do consumidor doméstico de carvão vegetal, atendendo às seguintes questões:

1. Características socioeconômicas,

2. Opinião a respeito do carvão existente no mercado,
3. Nível de conhecimento de marcas e características dos carvões comercializados,
4. Motivação para o consumo de uma determinada marca,
5. Comportamento com relação a marcas ou produtos,
6. Intenção de compra.

A abrangência da pesquisa foi restringida à cidade de Campinas; a amostra utilizada foi de tipo “*Não Probabilístico por Quotas*”. Este tipo de amostra foi selecionado devido ao conhecimento dos dados socioeconômicos de Campinas, proporcionando obter desta maneira uma amostra similar em composição à população total de Campinas. Portanto, para a pesquisa foram selecionados 100 indivíduos segundo o tipo de renda familiar, em proporção similar a da Região Sudeste do País. A amostra estudada foi caracterizada segundo o “Critério Brasil” de estratificação social. Este critério é amplamente utilizado por Institutos de Pesquisas e se baseia na classificação através do poder de compras das famílias urbanas, ou seja, de classes econômicas (Mattar, 2000).

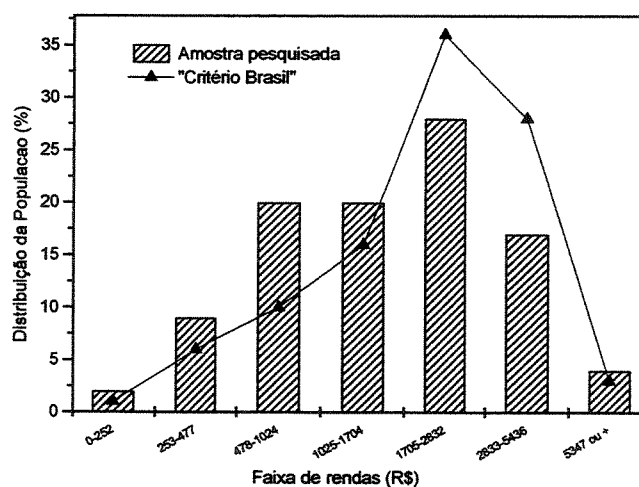


Figura 5.6 Distribuição das classes sócio-econômicas na amostra pesquisada

Na figura 5.6, são apresentadas a faixa de renda da amostra estudada e a distribuição de renda segundo o “Critério Brasil” para São Paulo. Como se pode observar, existe semelhança entre elas, o que indica que dentro da margem de erros, cumpriram-se as quotas na amostra estudada.

Para estudar os hábitos de consumo foram indagados aspectos referentes à finalidade do uso do CV, frequência de compra em um ano e preferência por marcas ou tipos de CV. Quanto à finalidade, 100% da amostra respondeu que já usou ao menos uma vez o carvão para fazer churrasco, e uma pequena porcentagem usou o carvão para outros fins. A figura 5.7 mostra o uso do CV em atividades domésticas.

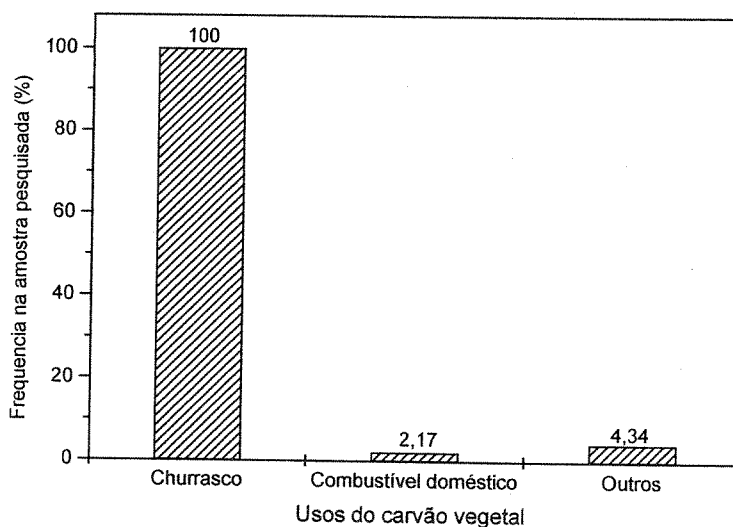


Figura 5.7 Frequência de uso do CV em atividades domésticas.

Com relação à frequência de compra, dos entrevistados 54% responderam que costumam comprar CV mais de 6 vezes ao ano. Levando-se em consideração que a principal finalidade do carvão é o uso em churrasco, pode-se concluir que uma frequência de mais de 6 vezes ao ano é relativamente alta. Portanto, uma parcela importante do mercado pode ser caracterizada como alta consumidora de

CV. Na figura 5.8 pode-se ver a tendência de compra dos consumidores entrevistados.

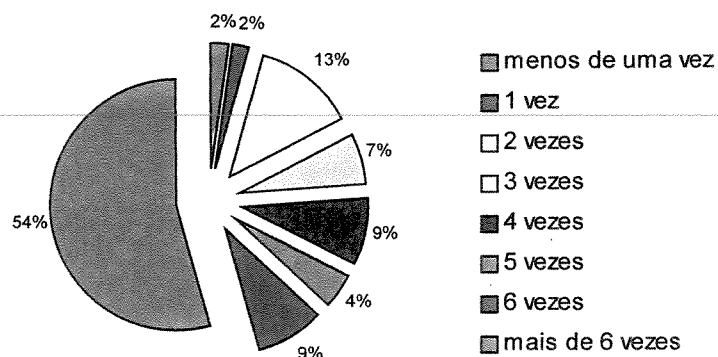


Figura 5.8 Frequência de compra de CV dos consumidores entrevistados

Na amostra pesquisada, 76% dos consumidores não tem preferência por marca ou tipo de carvão. Quando os entrevistados responderam positivamente com relação à preferência por marcas, em muitos casos não lembravam das marcas ou tinham dificuldades para mencionar a marca corretamente. Durante as entrevistas, foram mencionadas apenas 7 marcas de um universo de mais de 100 marcas.

Durante o estudo do comportamento dos consumidores foi tratado basicamente o aspecto da decisão de compra, ou seja, tratou-se de ponderar quais aspectos teriam maior peso na hora de decidir na compra de um determinado tipo ou marca de carvão vegetal.

Durante a pesquisa 50% dos entrevistados responderam que quando compram carvão, adquirem o produto por estar disponível na prateleira e não pela marca, procedência, qualidade ou preço. Já 17% responderam que o fator determinante é a qualidade do carvão que compram, 13% se preocupa mais pela procedência e 20 % toma o preço como fator decisivo nas compras. A figura 5.9 mostra as tendências na decisão de compra.

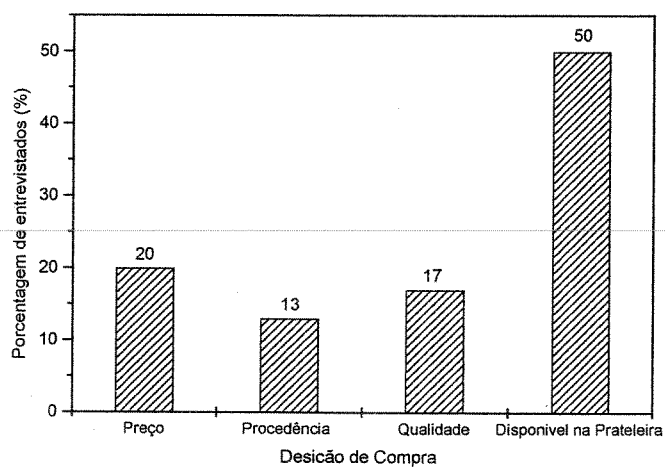


Figura 5.9 Fatores de influência na decisão de compra do CV

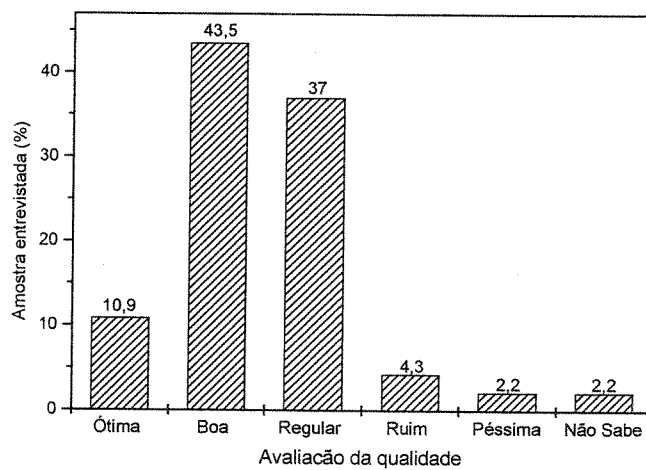


Figura 5.10 Avaliação dos consumidores domésticos da qualidade do CV

A opinião dos entrevistados foi avaliada através de questões relativas à qualidade do CV comercializado, conhecimento de substâncias emitidas pelo CV e as características ideais do CV para o consumidor doméstico.

A figura 5.10 apresenta a avaliação realizada pelo consumidor. Dos entrevistados, 80,5 % considera a qualidade entre regular e boa, o que mostra que o consumidor tem uma opinião aparentemente mais ou menos homogênea a respeito da qualidade. Quanto à conscientização de substâncias tóxicas emitidas pelo carvão, 78% não tinha ouvido falar do assunto ou não tinha conhecimento algum a respeito, e apenas 22% ouviu falar de substâncias emitidas durante a queima do CV.

Tabela 5.1 Pesquisa estimulada: critérios sobre a qualidade do carvão vegetal.

Opiniões	Respostas (%)
Acender rápido	80
Acender lentamente	9
Não sabe	11
Ter cheiro ao queimar	0
Não ter cheiro	100
Não sabe	0
Dar sabor à carne	37
Não dar sabor à carne	52
Não sabe	11
Sujar	24
Não sujar	67
Não sabe	9
Brasa de longa duração	100
Brasa de curta duração	0
Não sabe	0
Produzido de madeira reflorestada	67
Produzido de madeira nativa	13
Não sabe	20

A tabela 5.1 apresenta os resultados da pesquisa sobre as qualidades ideais para o carvão. Dentro da amostra entrevistada, 80% concorda que o carvão ideal deve acender rápido, 100% considera que a brasa deve ser de longa duração. Por outro lado, a maioria

considera que, o carvão, ao queimar não deve ter nenhum cheiro, e para 52% dos entrevistados, durante o churrasco o carvão não deve dar nenhum sabor à carne. Para 67% dos entrevistados, o carvão de boa qualidade não deve sujar as mãos durante o manuseio e que deve ser produzido de madeira reflorestada.

A pesquisa apurou que dos entrevistados, 63% não seria capaz de identificar um novo carvão colocado a disposição na prateleira dos supermercados. No entanto 85%, ao saber da existência de um novo produto, comprariam para testá-lo ou por curiosidade.

5.1.2-b Mercado de lenha no segmento de pizzarias.

O objetivo desta pesquisa de campo foi determinar o potencial da madeira torrefeita como combustível no mercado de lenha no segmento comercial de pizzarias. A abrangência da pesquisa foi restringida à cidade de Campinas. Em um universo de 108 pizzarias foi selecionada uma amostra 20 estabelecimentos. O instrumento usado para a coleta de dados foi um *questionário estruturado não disfarçado* (Ver Anexo V), através do qual foi realizada a caracterização atendendo às seguintes questões:

1. Tipo de combustível usado,
2. Consumo de lenha,
3. Preferências,
4. Hábitos de compra,
5. Opiniões e exigências sobre a lenha e possíveis substitutos.

Dentre os estabelecimentos pesquisados, 94% deles usam lenha para a cocção da pizza, e apenas 6% usa eletricidade ou gás. A maior parte das pizzarias que consomem lenha é de pequeno porte, ou seja, consomem até 10 m³/mês, o que totaliza 55% das pizzarias, seguidas pelas de médio porte (entre 11 e 20 m³/mês) que são 40%, e apenas 5% corresponde às pizzarias de grande porte, que consomem mais de 20 m³/mês de lenha. Na figura 5.11 é mostrada esta distribuição.

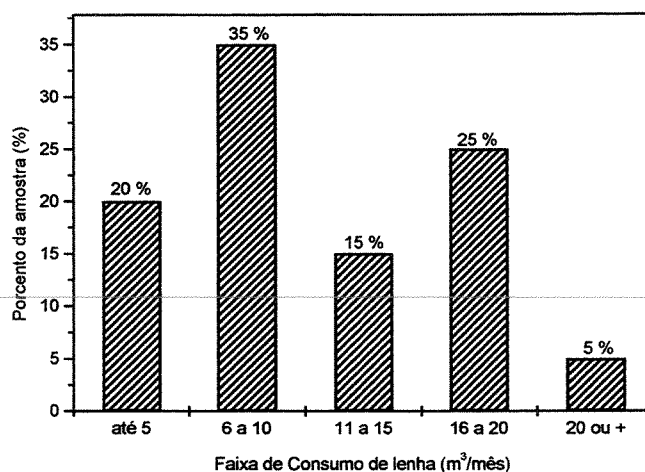


Figura 5.11 Distribuição do consumo de lenha nas pizzarias pesquisadas

À medida que o consumo de lenha é maior, o espaço útil designado para armazenar o produto, obviamente, é maior. Isto onera os custos da pizzeria. Portanto, a comercialização de um produto que ocupe menos espaço seria interessante economicamente para as pizzarias de grande porte. Já para as pizzarias de menor porte, este aspecto não é muito relevante; no entanto, foram detectados casos nos quais a lenha é armazenada à intempérie por falta de espaço no estabelecimento. Isto contribui para o aumento de umidade da madeira e, portanto, para a má combustão. Estes aspectos indicam que o uso de um combustível de maior poder calorífico ou maior densidade energética seria uma solução à falta de espaço.

Quanto aos hábitos de compra foram estudados dois aspectos, a preferência por algum fornecedor e os critérios de decisão na compra da lenha. Na amostra estudada, 90 % tem preferência por fornecedor. Isto pode ser causado pela inexistência de intermediários na venda e distribuição da lenha, criando uma tradição de compra diretamente do produtor, mantendo os fornecedores cativos.

Quanto à relevância na decisão de compra, os aspectos que maior peso tem na hora de decidir são a procedência e a qualidade respectivamente, ficando em segundo plano o preço (ver figura 3.12). Isto pode ter sua origem na tradição de comprar de um mesmo

provedor, e na preocupação de que a produção de pizza não se veja afetada pela má qualidade da lenha.

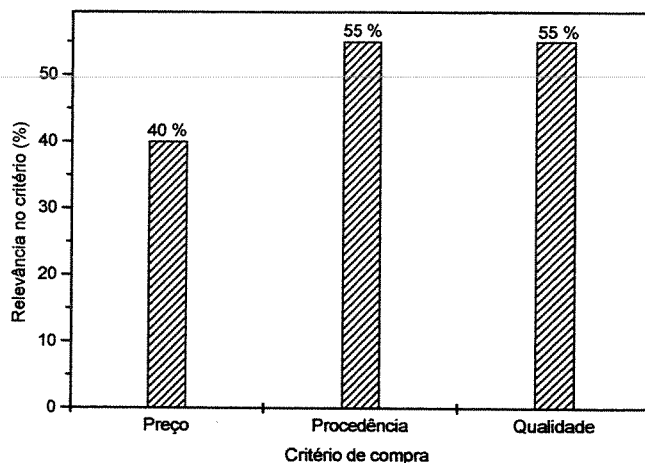


Figura 5.12 Índice de relevância no critério de compra da lenha

Na opinião dos estabelecimentos entrevistados a qualidade da lenha foi entre boa e ótima (ver figura 5.13). Esta aparente conformidade dos consumidores pode ser devido à falta de produtos concorrentes no mercado, pois uma vez que a lenha monopoliza este mercado, não há referências de qualidade de outros produtos.

Durante a pesquisa, também foram indagadas as características ideais para a lenha. A maioria opinou que a lenha deve estar seca; em segundo lugar, em relevância, destacou-se a padronização do tamanho da lenha; e em terceiro lugar o tipo de lenha (ver figura 5.14). Deve-se destacar que a característica de combustão mais importante foi a presença de pouca fumaça no período de ignição. Alguns comerciantes mencionaram a necessidade de que existam pedaços de menor tamanho na lenha para facilitar a ignição. No entanto, outros comerciantes opinam que esta prática tem o inconveniente de que os troncos muito finos se consomem com muita rapidez, influenciando na estabilidade da temperatura do forno.

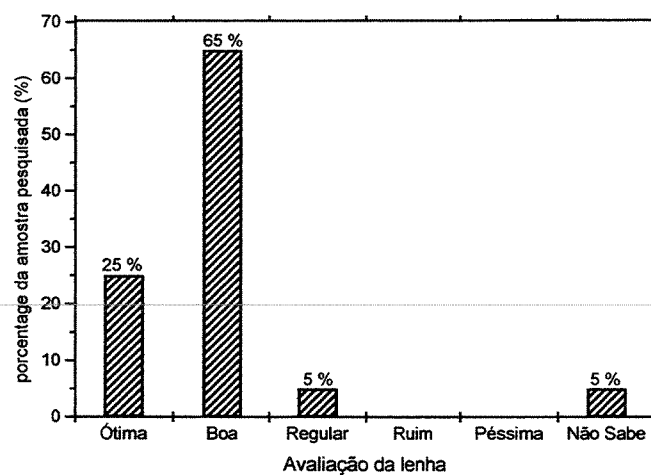


Figura 5.13 Avaliação da qualidade da lenha pelas pizzarias

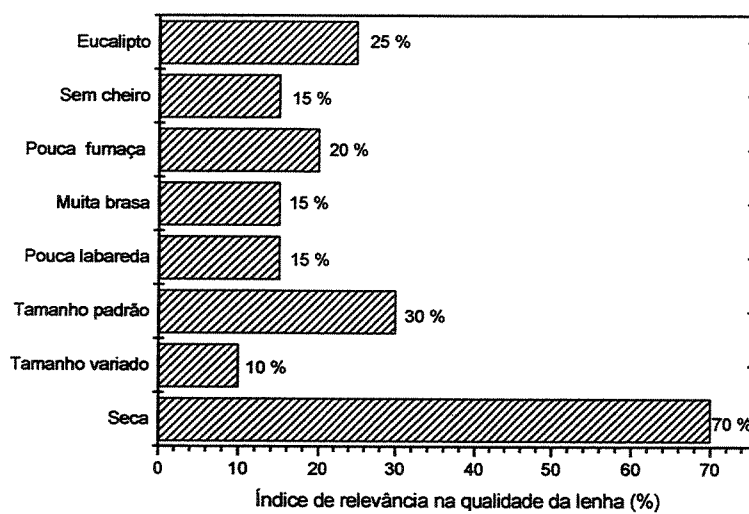


Figura 5.14 Índice de relevância na qualidade da lenha

5.1.2-c Mercado de lenha no segmento das indústrias cerâmicas.

O objetivo fundamental desta pesquisa de campo foi diagnosticar o segmento das cerâmicas atendendo às seguintes questões:

1. Tipo de combustível usado,
2. Consumo de lenha,
3. Hábitos de consumo,
4. Opiniões e exigências sobre a lenha e possíveis substitutos,
5. Questões técnicas e operacionais na queima da lenha nos fornos de cerâmica.

O meio principal para a coleta de dados foi a *comunicação* através de *entrevista pessoal* com *questionário*. O tipo de questionário utilizado foi de tipo *Estruturado não disfarçado* (ver anexo V). Este questionário é utilizado em pesquisas descritivas, principalmente em levantamentos amostrais e estudos de campo, ajustando-se aos propósitos desta pesquisa.

O Estado de São Paulo é um dos principais pólos de cerâmicas no país, cerca de 11% das cerâmicas do país estão localizadas no interior do Estado, ou seja aproximadamente 1400 indústrias. Portanto, a principal fonte de dados foi a visita a indústrias, embora alguns dados complementares tenham sido obtidos das associações sindicais. Para efetuar a pesquisa de campo, foram selecionados três conglomerados de indústrias no interior do Estado, localizadas na Região de Itu, Vargem Grande do Sul e Região Jaboticabal.

As localidades de Itu e Vargem Grande do Sul apresentam uma grande concentração de cerâmicas, as quais estão organizadas em Associações Sindicais. A representatividade destas regiões foi o critério fundamental para selecioná-las como fonte de dados. Já a região de Jaboticabal não possui uma grande concentração de cerâmicas, mas é um centro representativo de pequenas cerâmicas artesanais, nas quais se produzem utensílios domésticos e adornos. O critério usado para pesquisar esta região foi o interesse em determinar as condições das pequenas indústrias deste segmento.

Na região de Itu foi contatada a Associação das Cerâmicas Vermelhas de Itu e Região (ACERVIR), a qual é considerada um “Pólo de Modernização” dentro do segmento.

A ACERVIR conta atualmente com 80 Cerâmicas associadas que respondem por mais de 8 000 empregos diretos. Em contato com o Presidente da associação, o Sr. José Leis, foram selecionadas três cerâmicas para efetuar a pesquisa de campo. Em Vargem Grande do Sul, foi contatado o Sindicato da Indústria Cerâmica e Olaria de Vargem Grande do Sul (SICOV). O SICOV está integrado por 48 Cerâmicas que geram em torno de 3 000 empregos diretos. O atual presidente do SICOV é o Sr. João Admilson Garcia Coracini, o qual indicou cinco Cerâmicas para efetuar a Pesquisa de campo. Em Jaboticabal foram visitadas duas cerâmicas de pequeno porte. Nesta região existem 23 cerâmicas, a grande maioria produz utensílios domésticos, como vasos e filtros para água. As cerâmicas operam de forma independente e em sua grande maioria não são associadas a sindicatos ou associações de categoria. De 10 empresas contatadas, em 7 foi aplicada a pesquisa por entrevista.

Das Cerâmicas pesquisadas, a maioria consome lenha durante a queima das peças de cerâmicas, e apenas uma das cerâmicas queima coque de petróleo. É importante destacar que algumas destas cerâmicas já tinham queimado outro tipo de combustível além da lenha, a maioria usou o óleo combustível e o GLP. Mas os custos destes sistemas não foram viáveis e todas retornaram ao uso da lenha com suprimento principal. Em alguns casos, o coque é usado como complemento no final da queima do forno.

Durante a pesquisa de campo, constatou-se que a maioria das cerâmicas são empresas de pequeno ou de médio porte, muito raramente são encontradas cerâmicas de grande porte. Em geral existe uma grande homogeneidade no porte das empresas e no tipo de material produzido. Há, portanto, uma grande homogeneidade na faixa de consumo de lenha como mostra a figura 5.15. Embora a grande maioria das cerâmicas seja de médio e pequeno porte, o volume de madeira consumido é grande. Para efeitos de classificação pode-se dizer que uma cerâmica que consome menos de 100 m³/semana é de pequeno porte, entre 100 e 150 m³/semana de médio porte e mais de 160 m³/semana pode ser considerada de grande porte. Devido ao grande volume de madeira manejado, o espaço físico para armazenar este combustível torna-se um problema, de maneira que em todas as Cerâmicas visitadas a lenha é depositada na intempérie. Isto cria ainda outro problema: a umidade da

lenha varia em função do clima, provocando uma total falta de padrão no teor energético do combustível. Desta maneira o controle da eficiência da queima se vê prejudicado.

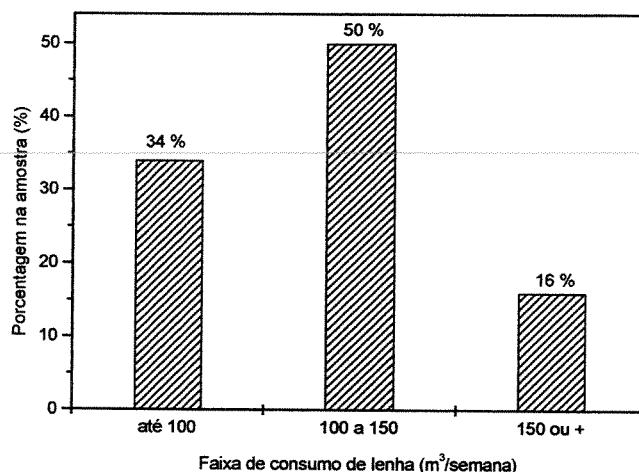


Figura 5.15 Faixa de consumo de lenha nas cerâmicas pesquisadas

Com o intuito de determinar qual a importância da lenha na qualidade do produto final, foi realizada uma pergunta comparativa entre o combustível e a matéria prima para determinar a importância de cada um na qualidade do produto final. Todas as cerâmicas entrevistadas coincidiram em atribuir a mesma importância para ambos.

Das indústrias pesquisadas, 67% considera que a lenha tem uma qualidade regular, e apenas 33% classifica a lenha como de boa qualidade. Isto talvez se deva ao fato da forma de estocar a lenha (muitas variações na umidade), e a forma como a lenha é despachada pelo fornecedor. Neste ponto é importante destacar que em muitos casos não há um padrão de medida (metro cúbico) estabelecido para a venda da lenha, o que provoca uma falta de controle nos estoques.

Com relação aos critérios usados na compra da lenha, os aspectos que mais peso têm na hora de decidir são a procedência e o preço (ver figura 5.16). O alto índice do fator “procedência” se deve a que geralmente os grandes consumidores de lenha compram de um único fornecedor. Também a questão ambiental influi na decisão, pois a fiscalização das agências ambientais somente permite a queima de madeira reflorestada.

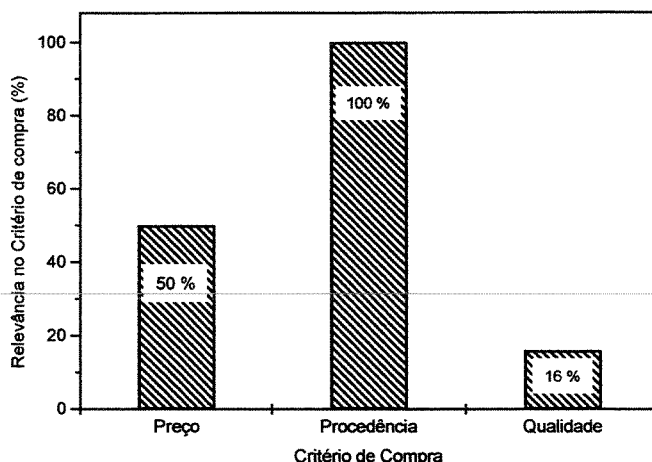


Figura 5.16 Índices de relevância nos critérios de compra da lenha nas cerâmicas

A pesquisa permitiu determinar o índice de relevância na qualidade da lenha segundo o critério das cerâmicas (ver figura 5.17). Para isto, foi recolhida a opinião dos gerentes de produção quanto às propriedades físico-químicas e o desempenho durante a combustão da lenha. Das cerâmicas pesquisadas, 100% considera que a característica mais importante para a qualidade é a umidade, ou seja, a lenha deve estar o mais seca possível. E para 70% o poder calorífico é o índice de maior relevância. Por outro lado, 100% considera que a lenha deve apresentar um longo tempo de queima, e 57 % concorda que deve haver presença de chamas e brasas para que o processo se desenvolva adequadamente.

Durante as entrevistas, os gerentes das cerâmicas mostraram grande interesse em obter a possibilidade de melhorar a qualidade da lenha, pois muitos acreditam que no momento a lenha é o combustível mais viável. A maioria das experiências realizadas com outros combustíveis não foi satisfatória, seja por aspectos econômicos ou técnicos. Por exemplo, o óleo poderia ser um combustível substituto da lenha, mas flutuações no preço de mercado inviabilizam seu uso. Outras alternativas como coque e gás esbarram nas questões técnicas e de suprimento.

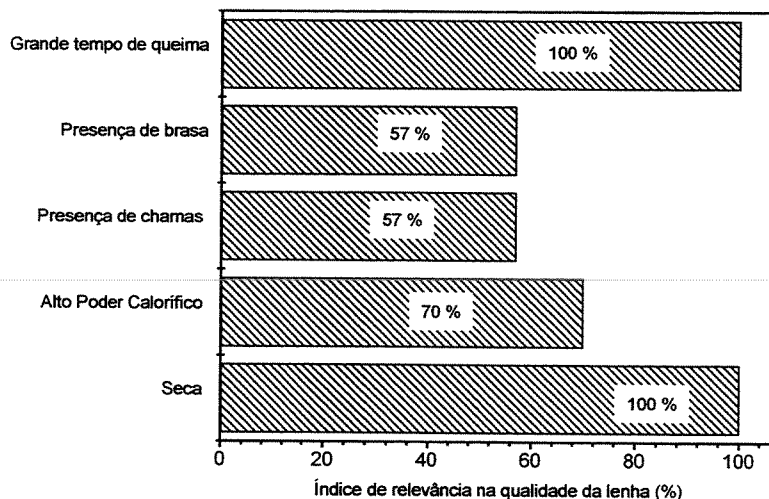


Figura 5.17 Índice de relevância na qualidade da lenha nas cerâmicas

5.1.2-d Consolidação das informações de mercado.

Para consolidar as informações obtidas no estudo de mercado, pode-se concluir que a lenha e o CV são consumidos por um amplo espectro da sociedade, seja por lazer ou por atividades comerciais ou industriais. Uma característica comum entre a lenha e o CV é a descentralização da produção e do comércio. Geralmente a produção é realizada em pequena escala e em negócios com estrutura familiar ou de pequena empresa. A pesquisa exploratória permitiu “radiografar” a estrutura interna da cadeia de produção e comércio da lenha e do CV no Estado de São Paulo, indicando que existem três mercados potencialmente promissores para a biomassa torrefeita: o consumidor doméstico, as pizzarias e as indústrias de cerâmicas. Embora seja muito impreciso realizar projeções sobre o comportamento do consumo de lenha e CV, o histórico de consumo destes combustíveis indica que, em curto prazo, projeta-se um modesto crescimento ou ao menos estabilidade no consumo. Portanto, apesar de não se debelar a dimensão exata do mercado futuro, pode-se afirmar que pelo menos empreendimentos de pequeno e médio porte podem ser bem sucedidos neste mercado.

Na tentativa de introduzir a torrefação nos mercados supramencionados, é importante prestar atenção nas particularidades de cada segmento de mercado, tanto na estrutura de comércio como nas exigências técnicas. Por exemplo, nas pizzarias o consumo de lenha é realizado de forma tradicional, de maneira que os próprios produtores distribuem e comercializam a lenha junto às pizzarias. No entanto, de acordo com a pesquisa realizada, este mercado está acessível a novos produtos, sempre que sejam atendidas as exigências técnicas apontadas. Neste sentido, as pizzarias exigem baixo grau de umidade na lenha, padronização no tamanho, pouca emissão de fumaça e brasa de longa duração. É necessário destacar que todas estas exigências são atendidas pelas amostras ME₂₅₀ e BAD₂₅₀ (ver subtítulo 4.2 do Capítulo 4). Portanto, a biomassa torrefeita pode ser um excelente concorrente neste mercado, haja vista que os BAD₂₅₀, devido a sua alta densidade energética, representam uma solução à falta de espaço na armazenagem e, conseqüentemente, contribuem a diminuir custos de armazenagem. Por outro lado, os Produtos ME₂₅₀ e BAD₂₅₀ são materiais mais higiênicos e adequados a restaurantes e pizzarias do que a lenha, pois os ácidos impregnados pelo próprio processo de torrefação evitam que insetos (baratas, formigas e outros) se alojem nos depósitos de combustível.

Ao estudar as informações recopiladas nas indústrias cerâmicas, percebe-se que a estrutura de compra-venda da lenha é similar ao esquema das pizzarias, porém em volume muito maior. Com relação às exigências técnicas, tudo indica que as características dos combustíveis ME₂₅₀ e BAD₂₅₀ são adequadas. As cerâmicas exigem lenha com baixo grau de umidade, e a biomassa torrefeita possui em torno de 5% de umidade e a lenha possui entre 15 e 20% na melhor das hipóteses. Outra exigência é o poder calorífico, e a biomassa torrefeita possui de 15 a 30% mais poder calorífico do que a lenha comum. Por último, o padrão de queima exigido pelos consumidores demanda a presença de chamas e brasas em proporções similares, e a biomassa torrefeita se comporta deste modo. No caso de tentar explorar este mercado deve considerar-se o volume de consumo nestas indústrias, pois esta demanda configura um alto investimento na produção de biomassa torrefeita. Portanto, a tecnologia de torrefação de pequena escala proposta neste estudo não é adequada, sendo mais conveniente adotar tecnologias de produção contínua e em grande escala.

Quanto ao mercado residencial, pode-se concluir que o uso do carvão vegetal na população urbana limita-se quase exclusivamente às atividades de lazer como o churrasco,

sendo muito pouco utilizado como combustível doméstico, o que é lógico levando em consideração a modernização dos centros urbanos. No conjunto da população urbana, independentemente da classe socioeconômica, existe um grande consumo de carvão vegetal para churrasco. No entanto, a maioria dos consumidores não tem preferência por marcas. Este comportamento não é contraditório, considerando a falta de marketing e propaganda neste mercado. Isto se confirma no fato de que, para a maioria dos consumidores, o fator determinante na hora da compra é a disponibilidade do produto na prateleira, deixando em segundo lugar o preço, a procedência ou a marca. Ressalta-se também que a maioria dos entrevistados não tinha informação a respeito da emissão de substâncias tóxicas durante a queima ou a produção do carvão vegetal. Isto é um reflexo da própria falta de informação ou talvez porque este assunto não tem sido tratado com a devida atenção na mídia.

De acordo com os resultados expostos até aqui, pode-se concluir que, embora exista uma grande quantidade de marcas de carvão, o mercado encontra-se totalmente descaracterizado, não há marcas predominantes ou de referência. Isto é um indicador que mostra a possibilidade de que o mercado pode aceitar novos produtos como mostrou a própria pesquisa. Embora seja necessário ainda estudar mais a adequação ambiental da biomassa ME₂₇₀ e BAD₂₇₀ no consumo doméstico, o mercado doméstico parece promissor.

5.2 Estudo de viabilidade econômica do processo de torrefação

Conforme os resultados da pesquisa de mercado, é possível, ao menos do ponto de vista mercadológico, que pequenos investimentos em torrefação possam disputar uma parte do mercado de lenha e CV. Para isto é necessário que o processo de torrefação seja competitivo do ponto de vista econômico. Contudo, ressalta-se que a viabilidade econômico-financeira é uma condição necessária, mas não suficiente para que um projeto desta natureza seja viável como um todo. Também devem ser considerados os aspectos ambientais e os benefícios sociais associados. O processo de briquetagem e posterior torrefação pode satisfazer estas premissas, pois proporciona um aproveitamento racional dos resíduos da biomassa, preserva as florestas, e diminui o impacto ambiental. Considerando isto, foi realizada uma análise da viabilidade econômica de um projeto de torrefação de briquetes de alta densidade.

5.2.1 Análise técnico-econômica-financeira do processo de briquetagem-torrefação de resíduos de biomassa.

Considerado que os briquetes são uma opção importante para aproveitar os resíduos de biomassa, é importante pensar na possibilidade de outros usos diferenciados, além do tradicional (queima em fornos comerciais ou industriais). Neste sentido, a torrefação pode ser uma via importante para lançar o BAD no mercado doméstico, ou mesmo torná-lo um produto de maior valor, com possibilidades de exportação. O estudo de mercado mostrou que existe espaço para comercializar os BAD₂₅₀. De fato, em São Paulo são comercializadas em torno de 240 000 toneladas anuais de briquetes tradicionais de baixa densidade (não BAD), sendo os principais consumidores as pizzarias e padarias. Por outro lado, também seria possível vender os BAD₂₇₀ no mercado doméstico, na hipótese de que o consumidor aprove este produto como uma alternativa ao carvão. Atualmente o preço de venda dos briquetes tradicionais oscila entre 180 e 250 R\$/t. Conforme este cenário de possibilidades comerciais, foi realizado uma análise técnico-econômica-financeira de um investimento em uma pequena planta de briquetagem-torrefação de resíduos de madeira.

A usina estudada, produziria 1248 t/ano de BAD e torrefazeria a produção completa, trabalhando 8 horas diárias com 4 paradas ao mês durante o ano todo. Para a produção seria necessário uma planta de briquetagem com capacidade de 500 kg/h, e 4 fornos de torrefação similares ao desenvolvidos neste trabalho (ver Cap. 3), porém, com capacidade 5 vezes maior. Como os BAD possuem uma densidade duas vezes maior do que a madeira, os fornos podem processar até 25 t/mês de BAD.

Na tabela 5.2 são mostrados os preços de mercado de uma usina como a proposta. É importante ressaltar que os valores apresentados na tabela foram obtidos de cotações realizadas junto aos fabricantes de equipamentos, entre eles a BIOMAX LTDA e a BIOENERGY do Brasil SA. O preço dos fornos foi estimado com bases no forno construído neste trabalho, considerando o fator de escala e os custos de montagem. Os preços da extrusora para fabricar os BAD oscilam entre 80 000 R\$ e 150 000 R\$, em função da capacidade de produção. No mundo existem vários fabricantes deste equipamento.

Tabela 5.2 Preços das máquinas e equipamentos de briquetagem-torrefação

Discriminação	Qtde.	Capacidade (kg/hr)	Potência (kW)	Custo (R\$)
Extrusora	1	500,00	45,00	80.000,00
Silo Seco	1		1,50	5.900,00
Secador	1	500,00	4,50	50.800,00
Ventilador/Exaustor	1		10,50	0,00
Transporte	1	500,00	1,50	0,00
Silo Úmido	1		2,63	4.700,00
Picador	1	500,00	37,50	23.100,00
Forno torrefação	4		2,00	40.000,00
Total	11	500,00	105,13	204.500,00

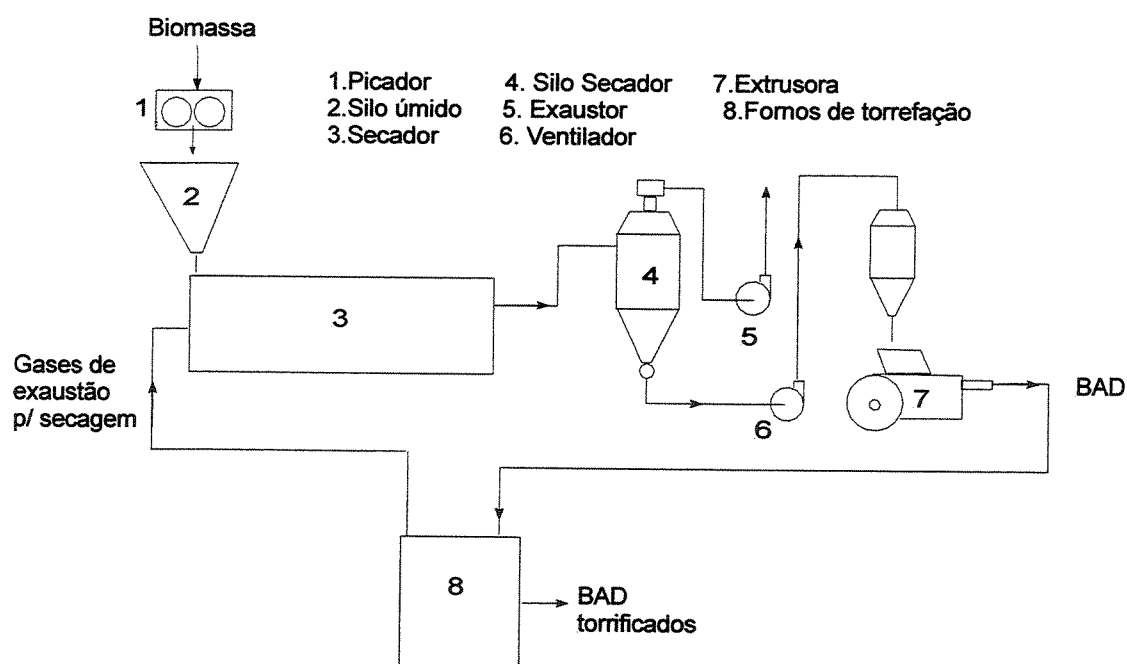


Figura 5.18 Planta de briquetagem-torrefação

Para implantar a usina mostrada na figura 5.18 é necessário realizar gastos em instalações industriais como eletricidade, água, telefone, estruturas de suporte de máquinas, entre outras necessidades. Estima-se que o custo destas instalações seja aproximadamente 10% das máquinas e equipamentos. Também é necessário adquirir ferramentas, móveis, e material de escritório. Estes gastos foram considerados como R\$ 5000,00 na vida útil do projeto. Considerando a opção de alugar um galpão industrial para implantar a usina, são necessários cerca de 700 m² para isto. O aluguel de uma área assim está em torno de 750 R\$/mês. A todos estas inversões devem somar-se os gastos de implantação, que representam gastos efetuados na fase de pré-investimento (estudos de viabilidade, assessoria técnica e jurídica, entre outros). Estes gastos entram na planilha de custos sob a rubrica “amortização do deferido”. Tais amortizações objetivam diminuir o impacto no resultado operacional do projeto que os referidos gastos ocasionariam, caso tivessem de ser considerados integralmente de uma só vez. Considerando um horizonte de vida útil do investimento de 10 anos, a amortização do deferido pode ser considerada como 10% do total (Machado, 2002). Neste caso foi considerado que o gasto total de implantação foi R\$ 5000,00.

Tabela 5.3 Investimento fixo em ativos tangíveis

Discriminação	Investimento (R\$)	Depreciação (%)	Depreciação anual (R\$/ano)
Extrusora	80.000,00	10,00	8.000,00
Silo Seco	5.900,00	10,00	590,00
Secador	50.800,00	10,00	5.080,00
Ventilador/Exaustor	0,00	10,00	0,00
Transporte	0,00	10,00	0,00
Silo Úmido	4.700,00	10,00	470,00
Picador	23.100,00	10,00	2.310,00
Forno torrefação	40.000,00	10,00	4.000,00
Sub-Total	204.500,00	10,00	20.450,00
Instalações industriais	20.450,00	10,00	2.045,00
Moveis e equipamentos diversos	5.000,00	10,00	500,00
Total	229.950,00	10,00	22.995,00

A tabela 5.3 mostra o valor total do investimento fixo em ativos tangíveis que deve ser feito para implantar o projeto. A depreciação dos ativos foi considerada como

10% do valor ao ano, em 10 anos de vida útil (Machado, 2002). A soma da depreciação anual de cada ativo entra na planilha de custos sub a rubrica “Depreciação industrial”, e representa a parte fixa do custo industrial.

O custo de mão-de-obra é talvez o mais importante nos custos industriais. É por isso que se deve prestar especial atenção na folha de pagamento e as contribuições que nesta incidem. Ao analisar a planta de briquetagem-torrefação, percebe-se claramente que esta pode ser classificada como empresa de pequeno porte (EPP), pois se a produção anual estimada é vendida ao preço atual de mercado o faturamento bruto não ultrapassa R\$ 1.200.000,00. Considerado isto, esta empresa pode aderir-se ao “Sistema Integrado de Pagamento de Impostos e Contribuições das Microempresas e Empresas de Pequeno Porte” (SIMPLES). O SIMPLES está em vigor desde 1997, e consiste no pagamento unificado dos seguintes impostos: IRPJ, PIS, COFINS, INSS patronal, IPI, e CSLL. O SIMPLES dispensa o pagamento das contribuições instituídas pela união, como as destinadas ao SESC, SESI, SENAI, SEBRAE, e seus congêneres, bem como as relativas à salário educação e à contribuição sindical patronal. Considerando tudo isto, os encargos sociais incidentes na folha de pagamento somam 23%. Na tabela 5.4 são discriminados os custos de mão-de-obra industrial.

Tabela 5.4 Mão-de-obra industrial

Discriminação	Operários	Encargo social (%)	Salário (R\$/mês)	Folha Pgto (R\$/ano)
Extrusora	1	23,00	400,00	5.904,00
Picador	1	23,00	400,00	5.904,00
Secador	1	23,00	400,00	5.904,00
Forno	1	23,00	400,00	5.904,00
Total	4	—	—	23.616,00

Durante a operação da usina são efetuadas despesas administrativas como, Pró-labore, Honorários contábeis entre outras. A amortização do deferido pode ser considerada uma despesa administrativa. Na tabela 5.5 são discriminadas a despesas administrativas e comerciais.

Tabela 5.5 Despesas administrativas e comerciais

Discriminação	Valor (R\$/ano)
Pró-labore	30.000,00
Honorários contábeis	2.000,00
Amortização do deferido	500,00
Outras despesas admin.	1.625,00
Despesas comerciais	5000,00

A amortização do deferido é 10% do gasto de implantação. As outras despesas administrativas correspondem a 5% do total de despesas (pró-labore, honorário contábil e amortização do deferido) (Machado, 2002). As despesas comerciais estão compostas por gastos em vendas e frete.

Outro gasto operacional muito importante é o incidente sobre a matéria-prima e combustível. Neste caso específico propõe-se a compactação de resíduos de madeira. Tais resíduos podem ser encontrados em atividades industriais como fabricação de lápis, móveis, madeira de construção, papel e celulose entre outros. Para efeitos de cálculo estimou-se que o custo do resíduo corresponde ao custo de transporte e manuseio da madeira em um raio de 5km. Este custo corresponde a 8R\$/t segundo Pinheiro et alli (2001). O combustível usado nos fornos é uma parte dos resíduos. Considerando que para uma tonelada de BAD torreficados seja necessário queimar 100 kg, então se deve adicionar 10% à quantidade de resíduos transportados. Quanto às embalagem, considerou-se que por cada tonelada de BAD torreficados se gasta cerca de R\$ 5. Considerando que no caso estudado são produzidos briquetes do tipo BAD₂₇₀, então o rendimento gravimétrico é aproximadamente 70%, constituindo uma produção total de 873,60 toneladas de BAD₂₇₀ ao ano. Na tabela 5.6 são discriminados os custos em matéria-prima, combustível e embalagem.

Tabela 5.6 Custos de matéria-prima, combustível e embalagem.

Discriminação	Qtd. Anual (ton/ano)	Custo (R\$/ano)
Resíduo de madeira	1248,00	9.984,00
Madeira p/ queima	124,80	998,40
Embalagem	873,60	4.368,00

Tabela 5.7 Estrutura de custos

Discriminação	Valor (R\$/ano)
Custos fixos	
Depreciação Industrial	22.995,00
Pró-labore	30.000,00
Honorários contábeis	2.000,00
Amortização do deferido	500,00
Outras despesas admin.	1.625,00
Aluguel de galpão indust.	9.000,00
Sub-total	66.120,00
Custos Variáveis	
Resíduo de madeira	9.984,00
Resíduos p/ combustível	998,40
Mão-de-obra Industrial	23.616,00
Energia elétrica	15.743,52
Embalagem	4.368,00
Despesas comerciais	5.000,00
Sub-total	59.709,92
Total	125.829,92
Custo unitário (R\$/t)	144,04

A tabela 5.7 mostra a estrutura dos custos durante a fabricação de BAD₂₇₀. Ressalta-se que a fábrica consome nominalmente 262,40 MWh/ ano. Considerando o custo médio da energia elétrica em 60 R\$/MWh, o custo anual corresponde a R\$ 15.743,52 por ano. Para

esta estrutura de custos, o custo unitário de produção corresponde a 144,04 R\$/t de BAD₂₇₀. Para formar o preço de venda à vista (PVV) é aplicado *mark-up* divisor, o qual está composto apenas pela parcela de lucro desejada, pois neste caso, os impostos faturados sobre a venda são debitados pelo SIMPLE. Desta maneira, para um lucro de 36% o PVV do BAD₂₇₀ é 225,06 R\$/t. Este valor está na faixa dos preços que atualmente são praticados na venda de briquetes sem torrefazer, portanto, os BAD₂₇₀ podem ser competitivos no mercado. A tabela 5.8 mostra o faturamento bruto anual pela venda à vista e o ponto de equilíbrio operacional da fábrica.

Tabela 5.8 Ponto de equilíbrio durante a produção de BAD₂₇₀

Preço Unitário (R\$/t)	Produção de BAD (t/ano)	Produção de BAD ₂₇₀ (t/ano)	Receita bruta (R\$/ano)	PE (%)	Produção de PE (t/ano)
225,06	1248,00	873,60	196.609,25	48,30	421,95

Para a estrutura de custos apresentada, o PE corresponde a 48,30 % da produção, entretanto este indicador pode variar em função do fator de utilização nominal da fábrica. Por exemplo, se a usina opera com 80% da capacidade o PE será maior. Para diminuir o PE pode-se recorrer à diminuição de custos fixos, alavancagem operacional ou aumento no lucro de venda. Para projetos novos é muito difícil diminuir custos fixos. Portanto, o PE será uma função exclusiva da margem de contribuição unitária, ou seja, da política de preços.

Os custos também podem ser classificados em custo industrial e despesas operacionais. O custo industrial é aquele que está ligado diretamente com a produção do bem, independentemente de ser fixo ou variável. Já as despesas operacionais estão relacionadas às atividades que gerenciam a operação da fábrica. A divisão dos custos deve ser realizada desta forma para determinar a capacidade de pagamento de um investimento. A capacidade de pagamento é uma informação valiosa tanto para o empresário quanto para o agente financeiro, pois é ela que reflete a capacidade de geração de caixa suficiente para garantir as futuras amortizações do empréstimo no prazo estabelecido no contrato. A tabela 5.9 mostra o custo industrial e as despesas operacionais.

Tabela 5.9 Custo industrial e despesas operacionais

Discriminação	Valor (R\$/ano)
Custo industrial	
Depreciação Industrial	22.995,00
Resíduo de madeira	9.984,00
Madeira p/Combustível	998,40
Mão-de-obra Industrial	23.616,00
Energia elétrica	15.743,52
Embalagem	4.368,00
Total	77.704,92
Despesas operacionais	
Pró-labore	30.000,00
Honorários contábeis	2.000,00
Amortização do deferido	500,00
Despesas administrativas	1.625,00
Despesas comerciais	5.000,00
Aluguel galpão	9.000,00
Total	48.125,00

Para determinar a capacidade de pagamento, e para dimensionar corretamente o investimento a ser realizado durante a implantação e operação de uma usina, é necessário conhecer o investimento necessário em capital de giro. O termo capital de giro denota os ativos que normalmente devem circular e ser substituídos, pelo menos em parte, durante o ciclo operacional (Machado, 2002). Para dimensionar o capital de giro, primeiro é necessário definir a política comercial da empresa. Para simplificar, estabeleceu-se que 100% das vendas seriam realizadas à vista, e que os estoques de briquetes torreficados sejam suficientes para 15 dias de vendas, assim como as matérias primas e o combustível sejam suficientes para outros 15 dias de atividades. O caixa mínimo, para a mobilidade e as necessidade imediatas da empresa, deve ser suficiente para cobrir as despesas de 5 dias de operação. Desta maneira a estrutura do capital de giro configura-se em necessidades e coberturas, estas últimas foram assumidas como capital próprio. De acordo com esta política comercial o capital de giro está estruturado como mostra a tabela 5.10.

Tabela 5.10 Capital de Giro

Discriminação	Valores (R\$/ano)
Necessidades	
Estoques:	
Madeira + combustível	528,00
Embalagem	210,00
Produtos acabados	2.630,28
Caixa mínimo	2.016,51
Sub Total	5.384,79
Coberturas	
Capital próprio	1.000,00
Duplicatas	0,00
Sub Total	1.000,00
Capital de Giro	4.384,79

O capital para manter estoques de matéria-prima e combustível se determina por:
 $(\text{Custo anual matéria-prima} / \text{n}^\circ \text{ dias de trabalho ao ano}) \times \text{n}^\circ \text{ de dias do estoque}$.

O capital para manter as embalagens em estoque foi determinado por:
 $(\text{Custo anual embalagem} / \text{n}^\circ \text{ dias de trabalho ao ano}) \times \text{n}^\circ \text{ de dias do estoque}$.

O capital para manter os produtos acabados em estoque foi determinado por:
 $[(\text{Custo industrial} - \text{depreciação industrial}) / \text{n}^\circ \text{ dias de trabalho ao ano}] \times \text{n}^\circ \text{ de dias do estoque}$.

O capital para formar o caixa mínimo foi determinado por:
 $[(\text{Custo industrial} + \text{Custo operacional}) / \text{n}^\circ \text{ dias de trabalho ao ano}] \times \text{n}^\circ \text{ de dias de cobertura}$.

O investimento total para implantar a usina corresponde à soma do investimento fixo em ativos tangíveis, os gastos de implantação e o capital de giro necessário, como mostra a tabela 5.11 .

Tabela 5.11 Investimento total

Discriminação	Valores (R\$)
Investimento fixo	229.950,00
Gasto de implantação	5.000,00
Capital de Giro	4.384,79
Total	239.334,79

Na hipótese de financiar o investimento, uma alternativa seria o financiamento junto ao BNDES através de planos de financiamentos apropriados para pequenas empresas. No BNDES existe o plano “BNDES Automático” que financia até R\$ 10 milhões para a realização de projetos de implantação e aquisição de equipamentos nacionais e o capital de giro associado.

As condições de financiamento por este programa incluem até 80% do capital, com prazo de até 6 anos para amortizar o empréstimo. A taxa de juros é determinada pela taxa de juros de longo prazo (TJLP) e os acréscimos de risco, ou seja:

$$\text{Taxa de juros} = \text{TJLP} + \text{Spread Básico} + \text{Spread de risco}$$

O Spread Básico é geralmente de 4% a.a; a TJLP varia trimestralmente, tendo oscilado no último ano em torno de 10% a.a. O Spread de risco não ultrapassa 4%. Assumindo que o Spread de risco seja de 2%, a taxa de juros, para um financiamento de 80% do capital com prazo de 6 anos, corresponde a 16% a.a. O custo financeiro para esta operação está discriminado na tabela 5.12.

Tabela 5.12 Despesas financeiras

Discriminação	Valor (R\$/ano)
Investimento total	239.334,79
Recursos de terceiros	191.467,83
Despesas financeiras	30.634,85

Com todas as informações sobre estrutura de custos, despesa financeira e capital de risco, pode-se realizar a Demonstração do Resultado de Exercício (DRE) e a capacidade de

pagamento do empreendimento. Apenas deve acrescentar-se que, pelo sistema SIMPLE, uma empresa que fatura até R\$ 240.000,00 contribui com 5,4 % no IRPJ. O caso estudado aqui se enquadra dentro desta classificação.

Tabela 5.13 DRE e capacidade de pagamento

Discriminação	Valores (R\$/ano)
Receita bruta	196.609,25
(-) Impostos faturados na venda (IPI, PIS, COFINS)	0,00
(=) Receita líquida	196.609,25
(-) Custo industrial	77.704,92
(=) Lucro bruto (LB)	118.904,33
(-) Despesas operacionais	48.125,00
(=) Lucro operacional (LO)	70.779,33
(-) Despesas financeiras	30.634,85
(=) Lucro antes do Imposto de Renda	40.144,48
(-) Imposto de renda de pessoa jurídica (IRPJ)	2.167,80
(=) Lucro de exercício (LE)	37.976,68
(+) Depreciação industrial	22.995,00
(+) Amortização do diferido	500,00
(=) Capacidade de pagamento	61.471,68
% da capacidade de pagamento/investimento total	25,68

Conforme mostra a tabela 5.13 o empreendimento possui uma capacidade de pagamento anual de 25,68% do investimento total, ou seja, um quarto do investimento, garantindo, desta maneira, o cumprimento dos contratos de pagamento e ainda criando o caixa suficiente para operar regularmente a usina. Outra forma de avaliar a viabilidade econômico-financeira de um projeto é a determinação da taxa interna de retorno (TIR) em um fluxo de caixa no horizonte de vida do projeto (Machado, 2002; Kaplan, 1983).

Tabela 5.14 Fluxo de caixa (valores em R\$)

ENTRADAS				SAIDAS					SALDO DE CAIXA
Ano	Lucro operacional	Depreciação + Amortização	Total	AMORTIZAÇÃO DO EMPRÉSTIMO				IRPJ	
				Principal	Juros	Parcela	Saldo		
0	--	--	--	--	--	--	191.467,83	--	-239.334,79
1	70.779,33	23.495,00	94.274,33	21.327,58	30.634,85	51.962,43	170.140,25	2.167,80	40.144,10
2	70.779,33	23.495,00	94.274,33	24.739,99	27.222,44	51.962,43	145.400,27	2.352,07	39.959,83
3	70.779,33	23.495,00	94.274,33	28.698,39	23.264,04	51.962,43	116.701,88	2.565,83	39.746,07
4	70.779,33	23.495,00	94.274,33	33.290,13	18.672,30	51.962,43	83.411,75	2.813,78	39.498,12
5	70.779,33	23.495,00	94.274,33	38.616,55	13.345,88	51.962,43	44.795,20	3.101,41	39.210,49
6	70.779,33	23.495,00	94.274,33	44.795,20	7.167,23	51.962,43	0,00	3.435,05	38.876,85
7	71.279,33	22.995,00	94.274,33	--	--	--	--	3.849,08	90.425,25
8	71.279,33	22.995,00	94.274,33	--	--	--	--	3.849,08	90.425,25
9	71.279,33	22.995,00	94.274,33	--	--	--	--	3.849,08	90.425,25
10	71.279,33	22.995,00	94.274,33	--	--	--	--	3.849,08	90.425,25

IRPJ = (Lucro operacional - Juros) x 0,054. SALDO DE CAIXA = Total - Parcela - IRPJ

TIR=17%

VPL= R\$ 56.115,38

Payback = 6 anos e 7 dias

Para o caso estudado a TIR corresponde a 17%, e o *Payback* a 6 anos e 7 dias (tabela 5.14). No caso de pretender uma taxa de atratividade superior à taxa de juros (16% a.a), o investimento é viável da forma que foi administrado o preço de venda. Em caso de querer obter maiores retornos sem modificar o preço de venda, o melhor modo de realizar isto é diminuindo o prazo de pagamento do empréstimo ou diminuindo a parcela de financiamento sobre investimento total. Por exemplo, financiar 60% do investimento em 6 anos resulta em uma TIR de 21% sem necessidade de alterar o preço de venda. Em relação a TIR cabe considerar que a taxa mínima de atratividade, dado seu acentuado grau de subjetividade, leva em conta não apenas o custo de capital, mas também o risco do investimento. É por isso que, sendo a TIR inferior ao mínimo desejado pela empresa, não significa necessariamente que o investimento não seja lucrativo. Portanto, antes de tomar a decisão, deve ser avaliada seriamente a forma de financiar e administrar a política de preços de um investimento. Na figura 5.19 é mostrado o comportamento da TIR em função da parcela de financiamento sobre o investimento total.

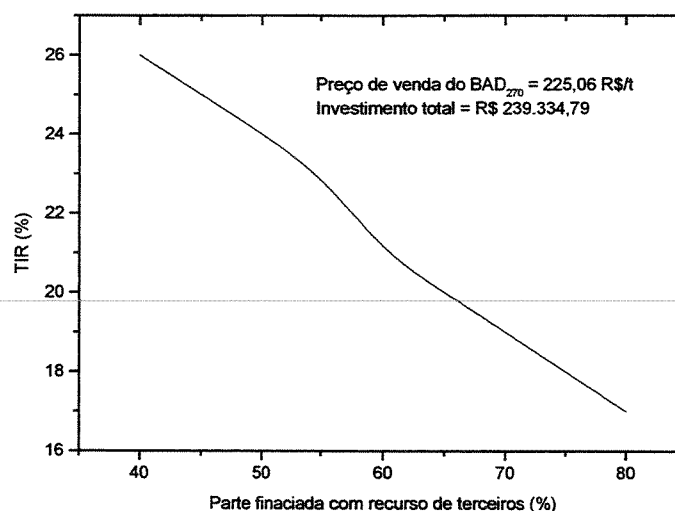


Figura 5.19 Comportamento da TIR em função da porcentagem de participação de recurso de terceiros

A análise realizada considerou a produção de BAD₂₇₀, mas a planta pode produzir BAD₂₃₀ e BAD₂₅₀, em função da demanda do mercado. Isto proporciona uma elasticidade maior no funcionamento em relação ao mercado. Um sistema como o proposto neste trabalho pode produzir 4 tipos de produtos diferentes: BAD, BAD₂₃₀, BAD₂₅₀ e BAD₂₇₀. Considerando isto, foi realizada uma análise econômico-financeira na hipótese de produzir os diferentes tipos de BAD mencionados, com o mesmo investimento e a mesma margem de lucro na venda à vista. Os resultados são consolidados na tabela 5.15.

Tabela 5.15 Resultados da análise econômico-financeira para diferentes produtos

Produto	Produção (t/ano)	Custo (R\$/t)	Preço (R\$/t)	PE (%)	TIR (%)
BAD	1248,00	102,33	159,88	47,93	17
BAD ₂₃₀	1123,20	113,14	176,78	48,05	17
BAD ₂₅₀	998,40	126,66	179,90	48,17	17
BAD ₂₇₀	873,60	144,04	225,06	48,30	17

Obs.: O estudo foi realizado para um financiamento com taxa de juros de 16% aa, 80% do capital financiado e 6 anos de prazo para amortizar o empréstimo. A margem de lucro para determinar o preço foi de 36%.

Os resultados mostram que o impacto sobre os custos de produção, ao introduzir os fornos de torrefação, não é muito alto. Haja vista, que o PE e a TIR permanecem praticamente inalteradas. Portanto, este tipo de investimento deve ser considerado seriamente na hora de implantar uma fábrica de briquetes de alta densidade, uma vez que os benefícios econômicos e a elasticidade de comércio são melhorados. Contudo, sempre se deve observar que, em última instância, é o mercado consumidor quem decide o sucesso destes empreendimentos.

Quanto aos custos dos fornos de torrefação, cabe ressaltar que estes foram estimados com bases no protótipo desenvolvido nesta pesquisa. Portanto, no caso de se implementar este sistema industrialmente, ainda deverá existir um ciclo de “aprendizado”, o qual contribuirá a diminuir os custos das futuras instalações. Por outro lado, deve-se destacar que a tecnologia aqui proposta, embora passe por futuras modificações representa uma oportunidade de modernizar os sistemas de conversão utilizados por pequenos produtores. Conseqüentemente, isto irá contribuir com melhores condições de trabalho e preservação do meio ambiente, pois no sistema está considerada a necessidade de recuperar os rejeitos do processo. Por outro lado, deve-se observar que o ciclo de produção deste processo é muito curto se comparado com os ciclos tradicionais de carbonização, portanto, é possível desenvolver tecnologias de alta produtividade e conseqüentemente os custos finais serão menores, podendo-se desta maneira competir com os baixos custos dos fornos de carbonização tradicionais.

Capítulo 6

Conclusões

Os resultados obtidos neste trabalho mostram que a torrefação é um tratamento térmico notavelmente diferenciado do processo de carbonização tradicional, especialmente pela facilidade de produzir combustíveis com características diferentes, a partir da mesma matéria-prima. Esta característica peculiar possibilita que a biomassa torrefeita tenha utilidade em diversos processos. Conforme estas peculiaridades, pode-se concluir que a torrefação é uma alternativa para diversificar a oferta de bio-combustíveis, uma vez que os mercados atuais não possuem grande diversidade de ofertas.

De acordo com as características locais de produção e venda de biomassa, conclui-se que a maneira mais adequada de introduzir o processo de torrefação é através do desenvolvimento de tecnologias de baixo custo e pequena escala de produção, similares ao forno proposto neste trabalho, o qual é capaz de torreficar madeira ou briquete em períodos de 5 a 6 horas. Com relação a este forno, cabe ressaltar que após as modificações introduzidas no circuito fluxo-dinâmico foi possível controlar as variáveis do processo. Neste sentido, destaca-se que o perfil de temperatura obtido na câmara de torrefação foi bastante homogêneo, sendo a diferença máxima entre pontos de 12°C. Isto possibilitou que os produtos apresentassem características bastante homogêneas. Cabe, também, destacar que o sistema desenvolvido para a injeção de água permitiu o controle das reações parasitas de carbonização, e, portanto o domínio constante dos fluxos de calor. Esta peculiaridade, aliada ao fato do torrefator possuir a câmara de combustão separada da câmara de torrefação, permitiu controlar a temperatura de trabalho no nível desejado. Em geral o desempenho do forno foi bastante eficiente, haja vista que a eficiência global oscilou em torno de 70%. No entanto, fica como recomendação continuar aprimorando este sistema.

Quanto às características das amostras obtidas, conclui-se que o melhoramento energético dos combustíveis ME e BAD através do processo de torrefação foi considerável, proporcionando uma diminuição de até 55% da umidade de equilíbrio, aumento de 60% no teor de carbono fixo, e aumento no PCS entre 15 e 30% em função da temperatura de torrefação. Neste sentido, cabe destacar que os combustíveis ME₂₃₀, ME₂₅₀, BAD₂₃₀ e BAD₂₅₀ podem ser utilizados em segmentos que utilizam a lenha como combustível direto, uma vez que as propriedades mecânicas são conservadas e as características energéticas melhoradas.

A torrefação conserva uma grande parte da massa inicial da matéria-prima, possibilitando que se recupere entre 98 e 80% da energia inicial. Portanto, tratando-se de um processo no qual o objetivo básico é obter um combustível sólido, isto significa um extraordinário ganho em termos de conversão energética.

Os ensaios de resistência à compressão demonstraram que a madeira torrefeita conserva grande parte das propriedades mecânicas, sendo esta característica vantajosa durante a manipulação e o transporte. Neste sentido, é importante destacar que os BAD conservam a resistência mecânica de forma extraordinária. Isto, provavelmente, é possível porque os BAD são produzidos com altas pressões de extrusão, provocando que as resinas provenientes da lignina fluam e se solidifiquem em grande quantidade. Aliado a isto, como a degradação da lignina começa a ser importante somente a partir de 300°C, a torrefação não afeta as resinas a ponto destas perderem o poder aglutinante. Outro aspecto que é importante destacar é com relação à densidade energética dos BAD torreficados, a qual é praticamente 100% maior do que a densidade energética do CV e da madeira ME₂₇₀. Por exemplo, 1 m³ de ME₂₇₀ ou de CV equivale aproximadamente a 7.700,00 MJ, enquanto que 1m³ de BAD₂₇₀ corresponde a 16.600,00 MJ. Portanto, conclui-se que a produção de BAD₂₇₀ pode representar uma magnífica economia em termos de volume, transporte e armazenagem.

Analisando os resultados mencionados acima, fica evidente que os combustíveis ME₂₅₀ e BAD₂₅₀ superam, ao menos em termos energéticos, a madeira e os briquetes BAD sem torrefazer. Entretanto, uma questão que pode suscitar polemica é a capacidade dos combustíveis ME₂₇₀ e BAD₂₇₀ de poder equiparar-se ao CV, no que diz respeito ao uso

como combustível doméstico. Neste sentido, é importante reconhecer que a biomassa torrefeita, em função de possuir maior teor de voláteis, apresenta um maior desprendimento de gases durante os estágios iniciais da combustão. No entanto, é importante frisar, que pelo menos nas condições em que foram testadas as amostras ME₂₇₀ e BAD₂₇₀ não houve indícios de que estes combustíveis emanassem maior concentração de CO durante a combustão em uma churrasqueira. Nas amostras torrefeitas, no período de ignição, foi observada a presença de chamas, porém, por um curto período e em nenhum momento os níveis de CO foram notadamente superiores os registrados durante a queima de CV nas mesmas condições.

Quanto ao teor de HPAs, tanto nas amostras ME₂₇₀ e BAD₂₇₀ como nas de CV não foi detectada a presença de BaP (considerado o HPAs mais nocivo) no estado condensado. Portanto, conclui-se que estes combustíveis não representam nenhum perigo de contaminação por inalação de aerossóis ou por contato direto com a pele do consumidor. Entretanto, chama-se a atenção para o fato de que não foi pesquisada a geração de HPAs em estado gasoso durante a combustão das amostras torrefeitas e o CV. Esta é uma questão que deve ser estudada em trabalhos futuros, e até tanto, fica como recomendação que na hipótese de usar biomassa torrefeita na preparação de churrascos, deve-se fazê-lo em ambientes devidamente ventilados, de preferência ao ar livre.

Cabe destacar que nas amostras de CV foi detectada uma quantidade 7 vezes maior de HPAs, depositados em forma de cristais, que nas amostras torrefeitas. Isto mostra que o processo de carbonização é potencialmente mais poluente do que a torrefação, e sem margem de erro, pode-se afirmar que do modo como a carbonização é realizada as pessoas que operam os fornos estão sujeitas aos efeitos prejudiciais dos HPAs. Este fato não pode ser negligenciado, e deve ser encarado como um motivo mais para modernizar este setor.

É importante frisar que o estudo de mercado é uma ferramenta útil e indispensável na análise de viabilidade de um projeto, pois a análise microeconômica por si própria não é capaz de considerar a influência de outros fatores que vão além do preço do produto. Ou seja, não se podem ignorar os canais de distribuição da futura mercadoria, julgando-se a priori que haverá uma troca constante e direta de produtos e pagamentos. Neste sentido, o estudo de mercado foi extremamente útil, haja vista que permitiu identificar a estrutura interna

da cadeia de produção e comércio da lenha e do CV, e os possíveis mercados em que a biomassa torrefeita poderia ser comercializada. Das informações recopiladas, conclui-se que os mercados mais promissores são as pizzarias, as cerâmicas e o consumidor residencial. Nos dois primeiros mercados a lenha é comercializada em uma estrutura vertical, ou seja diretamente do produtor ao consumidor final. No entanto, de acordo com a pesquisa realizada, estes consumidores poderiam vir a comprar novos produtos, desde que sejam atendidas as exigências técnicas apontadas. Cabe ressaltar que os combustíveis ME₂₅₀ e BAD₂₇₀ cumprem com todas as exigências apontadas pelos consumidores. No caso das cerâmicas, o volume de consumo é extremamente grande. Para atender este mercado seria necessário realizar a torrefação em grande escala. Considerando isto, conclui-se que neste caso específico a tecnologia proposta não é suficiente, necessitando-se recorrer a fornos contínuos.

Quanto ao mercado residencial, foi constatado que a maior parte da população urbana, independentemente da classe socioeconômica, utiliza o CV em atividades de lazer. No Estado de São Paulo, o consumo de CV é relativamente grande, sendo que mais de 75% é comprado pelo consumidor doméstico. A pesquisa mostrou que existe uma grande quantidade de marcas de CV, mas nenhuma delas é predominante no mercado, de modo que os consumidores não identificam marcas de referências, o que torna o mercado muito acessível do ponto de vista comercial. Isto mostra a possibilidade de que este mercado pode aceitar novos produtos, desde que mantenha um padrão de qualidade aceitável. Neste sentido, é importante destacar que os combustíveis ME₂₇₀ e BAD₂₇₀, apesar de apresentar chama no estágio inicial da combustão, cumprem com a maioria das demandas dos consumidores. De todo modo, o que decidirá em última instância o sucesso destes combustíveis será o julgamento do próprio mercado, e isto somente será determinado com a realização de um “teste de mercado”. Neste ponto, chama-se a atenção para o fato de que os combustíveis ME₂₇₀ e BAD₂₇₀ não podem ser considerados capazes de substituir o CV no mercado, isto seria praticamente impossível, mas sim devem ser considerados, sem excesso de otimismo, como combustíveis alternativos, que podem eventualmente diversificar este mercado que atualmente está monopolizado pelo CV.

Do estudo de viabilidade técnico-econômica-financeira, pode-se concluir que o processo de briquetagem-torrefação é viável, e talvez seja a porta de entrada da biomassa

torrefeita no mercado. A produção de BAD torreficados facilitaria o aproveitamento energético de resíduos de biomassa, provocando um duplo benefício ambiental: torna útil um resíduo e contribui a preservar as florestas. É importante lembrar que o Brasil é um país que produz grandes quantidades de resíduos agrícolas e florestais, que na maioria dos casos não são aproveitados. Do ponto de vista operacional, ao aliar a torrefação com a briquetagem pode-se obter ganhos consideráveis na elasticidade operacional da fábrica, haja vista que é possível obter 4 produtos diferentes e não apenas um como no caso da briquetagem tradicional. Também é importante observar que a produção de BAD₂₇₀ pode ser uma via para lançar o BAD no mercado doméstico, ou mesmo torná-lo um produto de maior valor, com possibilidades de exportação.

Do ponto de vista econômico, a introdução do processo de torrefação não provoca um grande impacto na estrutura de custos numa fábrica de BAD, haja vista que os custos de produção aumentam apenas 26%, o que pode ser compensado com uma correta política de preços. De acordo com o caso estudado, um investimento de pequeno porte em um sistema de briquetagem-torrefação pode ser viável. Para o investimento estudado a TIR foi 17%, considerando-se a taxa mínima de atratividade igual à taxa de juros praticada (16%), então o investimento pode ser considerado viável. Cabe ressaltar que, a taxa interna de retorno pode ser maior em função do plano de financiamento adotado, e da parcela do investimento total que é financiada. De todo modo, é necessário destacar que este investimento apresentou um retorno superior ao custo de capital no tempo de vida útil, com uma capacidade de pagamento anual de 25% sobre o investimento total e um ponto de equilíbrio de 48%.

Atualmente, em São Paulo capital, o preço da tonelada de briquetes oscila entre R\$180 e R\$250. De acordo com o estudo realizado, o preço de venda à vista dos BAD torreficados pode oscilar entre R\$176 e R\$225, isto sem considerar os custos indiretos na venda. Entretanto, estima-se que estes custos não alterem muito o preço, uma vez que este foi estabelecido com uma margem de lucro de 36%. Isto indica que é possível vender briquetes torreficados a preços competitivos. É importante destacar que este estudo foi realizado com bases em uma empresa de pequeno porte, de maneira que o mais provável é que empreendimentos de pequeno e médio porte sejam a melhor forma de promover este sistema.

Sugestões para futuros trabalho:

Recomenda-se o estudo de sistemas contínuos de torrefação e a realização de um projeto tipo FAPESP PIPE que contemple o “teste de mercado” definitivo nos segmentos apontados como potenciais nichos de mercado para a biomassa torrefeita, com intuito de determinar efetivamente a aceitação real deste combustível no mercado.

Referências Bibliográficas

- Alves S, Figueredo L. A model for pyrolysis of wet wood. *Chemical Engineering Science* 1989; 44 (12): 2861-2869.
- ANICER- Associação Nacional da Indústria Cerâmica. Informativo 2002, dados do setor. WWW.anicer.com.br.
- Antal M. J. Mathematical modelling of biomass pyrolysis phenomena. *Fuel* 1985; 64:1483-86.
- Antal, M.J. & Willian S.L. Mok. Review of methods for improving the yield of charcoal from biomass. *Energy&Fuel* 1990; 3 (4):221-226.
- Arcate J. Global markets and Technologies for Torrefied Wood in 2002. *Wood Energy* 2002. 5:26-28.
- Arcate J. New Process for torrefied wood manufacturing. *Bioenergy Update* 2000; 2(4):1-4.
- ASTM. Standard Test methods for Carbon and Hydrogen in the analysis of coal and coke (D3178-84), Philadelphia, 1984. 3p.
- ASTM. Standard Test methods for proximate analysis of wood charcoal (D1762-82), Philadelphia, 1984. 5p.
- B.E.N- 2001. Balanço Energético Nacional . Ministério de Minas e Energia. Brasil, 2001. 150 p.
- Barrier H. Perfectionnements apportés aux procédés de fabrication d'agglomérés combustibles, et aux appareils de moulage utilices. FR patent. 993131. 11/1951.
- Beaton P, Silva E. Pruebas de balance térmico en calderas para bagazo. Santiago de Cuba. Ed(s) ISPJAM, 1991. 94p.
- Bethenod J; Koehler M; Boutille J. Procédé d'agglomération de produits obtenus avec du bois torréfié et analogues. FR patent. 872164. 06/1942.
- Bhattacharya, S C. Carbonized and Uncarbonized briquettes from residues. In: Workshop on Biomass Thermal Processing, 1990. London: Proceeding...SHELL V1, p. 1-9
- Bilbao R., Mastral J. F., Ceamanos J., And Aldea M. A. Modelling of the pyrolysis of wet wood. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 1996; 36: 81-97.

- Bourgeois Jean-Paul Thermocondensed lignocelluloses material, and a method and an oven for obtaining it. US patent. 4954620. 03/1989.
- Bourgeois, JP. Torrefied Wood from temperate and tropical species, advantages and prospects. In: Egneus & Ellegard ed(s). BIOENERGY 84, London 1984. v.III, p153-159.
- Bouteille J. Perfectionnements aux fours à torréfié le bois. FR patent. 839732. 04/1939.
- Boyd JR., Harper W., Westfall R. Pesquisa mercadológica. Rio de Janeiro: Fundação Getúlio Vargas, 1973.
- Bridgwater A V, Bridge S A. Biomass Pyrolysis Liquids Upgrading and Utilisation. Ed(s) Bridgwater AV and Grassi G, 1991. Cap. 2: A review of biomass pyrolysis and pyrolysis technologies, p.11-92.
- Bruce N, Pérez Padilla R, Albalak R. Contaminación del aire de los locales cerrados en los países en desarrollo: Un importante reto ambiental y de salud pública. Boletín de la Organización Mundial de la Salud (OMC), 2000, 78 (9): 1078-1092.
- Buchholz A. Apparatus for steam drying. US patent. 4026037. 05/1977.
- Cimetiere Jean-Paul; Gerard R. Procédé et dispositif de torréfaction de matière végétale. FR patent. 26624876. 06/1989.
- Cortez L. A, Silva E. Tecnologias de conversão energética da biomassa. Manaus: EDUA/EFEI, 1997. Série: Sistemas energéticos. Vol. 2, 540 p.
- Curry D P. Apparatus and process for drying cellulosic and textile substances with superheated steam. US patent. 5105558. 04/ 1992.
- Di Brasi C. And Russo G. Modelling of transport phenomena and kinetics of biomass pyrolysis. In: Bridgwater A V, and Boocock DGB, editors. Developments in thermochemical biomass conversion. London: Blackie Academic and Professional; 1994. V.1, p. 906-22.
- Doat J. CTFT Research into wood pyrolysis. In: Symposium Forest Products Research International Achievements and the Future; 1985. p. 12-24.
- Ferber R. Handbook of marketing research. New York: McGraw-Hill, 1974.
- Flyktman M, Oravainen H. Sourcebook of Methods of Analysis for Biomass and Biomass Conversion Process, by Milne, Brennan, Glenn . Ed (s). Elsevier Aplied Science. 1990. Apendix III: Methods for testing combustion equipment energy efficiency, p.II-I19.
- Fonseca Felfli F. Melhoramento das características energéticas de resíduos de biomassa através da torrefação. Campinas: Faculdade de Engenharia mecânica, UNICAMP, 1999. 110 p. Dissertação (Mestrado).
- Fonseca Felfli, F, Luengo C.A, Beaton P, Suarez A. Efficiency test for bench unit torrefaction and characterization of torrefied biomass. 4th Biomas Conference of Americas. California, 1999. Vol 1, p 589-592.

- Fonseca, Felfli F, Luengo, C. A., Beaton, P. A numerical model for biomass torrefaction.. In: H. Kopetz, Weber, Palz, Chartier and Ferrero, editors. Biomass for Energy and Industry. Wurzburg; 1998. p. 1596-99.
- Girard P. & N Shah N. Developments on Torrefied wood an alternative to charcoal for reducing deforestation. REUR Technical Series 1991; 20: 101-114.
- Guyonnet R. The improvement of wood durability by retification process. Etude du CTBA, Paris, France, no IRG/WP. Avril 1993, 5p.
- Hewitt G F, Shires G L, Bott T R. Process Heat Transfer. Ed. CRC press LLC& begell house, 1994, 1027 p.
-
- Incropera F P, De Witt D P. Introduction to Heat Transfer. Ed. John Wiley & sons, Singapore, 1990, 824 p.
- Kaplan S. Energy economics quantitative methods for environmental decisions. Mc Graw-Hill Book Co. NY, 1983.
- Kenneth M. B, Kenneth W. R., Christopher J. R. Modeling thermally thick pyrolysis of wood. Biomass and Bioenergy 2002; 22: 41-53.
- Kenneth M. B, Mathew J. H. Modeling the combined impact of moisture and char shrinkage on the pyrolysis of a biomass particle. Fuel 2003; 82: 1633-44.
- Kothari V. And Antal, M.J. Numerical studies of the flash pyrolysis of cellulose. Fuel 1985; 64:1487-93.
- Larfeld J., Leckneer B. and Malaaen MC. Modelling and measurements of the pyrolysis of large wood particles. Fuel 2000;79:1637-43.
- Leclerc De Bussy J. Method for producing torrefied wood, product obtained thereby, and application to the production of energy. US patent. 4787917. 11/1988.
- Lipinsky E S, Arcate J R and Reed T B. Enhanced wood fuel via torrefaction. Fuel Chemistry Division Preprints. 2002, 47(1).
- Machado J A P. Projetos Econômicos: Uma abordagem prática de elaboração. São Paulo, ed. Nobel, 2002, 182 p.
- Malaaem M.C, Grønli MG. Modelling and simulation of moist wood drying and pyrolysis. In: Bridgwater A V, and Boocock DGB, editors. Developments in thermochemical biomass conversion. London: Blackie Academic and Professional; 1994.p. 132-46.
- Marcos Martin F. El Carbón Vegetal. Madrid: Mundi-Prensa Castelló ed., 1989. 116 p.
- Mattar F. Pesquisa de Marketing. Edição compacta. 2ª edição. Editora Atlas, 2000, 271 p.
- Muller. Heat Exchanger Design Handbook. Ed(s) Hemisphere Publishing Corporation, Washington, 1983. Vol 3. Cap.: thermal and hydraulic design of heat exchangers.
- Netto P A D, Moreira J C, Dias A E X O, Arbilla G, Ferreira L F V, Oliveira A S, Barek J. Avaliação da contaminação humana por Hidrocarbonatos Policíclicos Aromáticos (HPAs) e seus derivados nitrados (NHPAs): Uma revisão metodológica. Química Nova, 23(6) (2000): 765-773.

- Nussbaume T. Wood combustion. In: Bridgwater A V, and Boocock DGB, editors. Developments in thermochemical biomass conversion. London: Blackie Academic and Professional; 1994. vol.1, pp. 575-589.
- Perry R H, Green D E. Perry's chemical engineer's handbook. Seventh edition. Mc.GRAW-HILL International editions. 1988.
- Pinel A. Procédé de traitement du bois, en vue de l'obtention, par agglomération, de produits moulés. FR patent. 953004. 10/1949.
- Pinheiro P C, Sampaio R S, De Rezende M A, Bastos Filho J G. Fundamentos e prática da carbonização de biomassa. ed. Autores, Belo Horizonte, 2001. 120p.
- Resende P W. Madeira e carvão vegetal. In: Economia e tecnologia da energia. Editora Marco Zero/FINEP 1985. Pp 274-301
- Rosillo-Calle F. The charcoal dilemma. Eds. Intermediate technology publications, London 1996, 78p.
- Schwob Y. Procédé de préparation d'un combustible de nature lignocellulosique et combustible obtenu. FR patent. 2525231. 10/1983.
- Schwob Y. Process for converting ligneous matter from vegetable origin by torrefaction, and product obtained thereby. US patent. 4553978. 11/1985.
- SINCAL, Diagnóstico sobre a cadeia produtiva de carvão vegetal e lenha do Estado de São Paulo. Pro-carvão: Relatório final. São Paulo: Setembro de 2000. 66 p.
- Stephan K. Heat transfer in condensation and boiling. Ed. Springer-Verlag, 1982, 321p.
- Stubbing T J. Method and apparatus for continuous drying in superheated steam. US patent. 5711086 01/1998.
- Tapia R, Villar S, Henrique Jr. , Rodrigues J , Ferreira Jr. Manual para a indústria de cerâmica vermelha. Rio de Janeiro: SEBRAE/JR, 2000. 92 p.
- Wai-Chun R C, Kelbon M, Kriger B. Modelling and experimental verification of physical and chemical processes during pyrolysis of a large particle. FUEL 1985; 64:1505-1514.
- WHO- World Health Organization, Guidelines for Air Quality. Geneva, 2000. 15p.
- WHO-World Health Organization. Guidelines for drinking-water quality, 2^{da} ed. Addendum to Vol. 2. Health criteria and other supporting information. Geneva, 1998. pp. 123-152.

Anexo I

I.1 Derivação da equação de difusão de calor no caso de uma peça de biomassa com formato cilíndrico submetida à torrefação.

I.1.1 Volume de controle

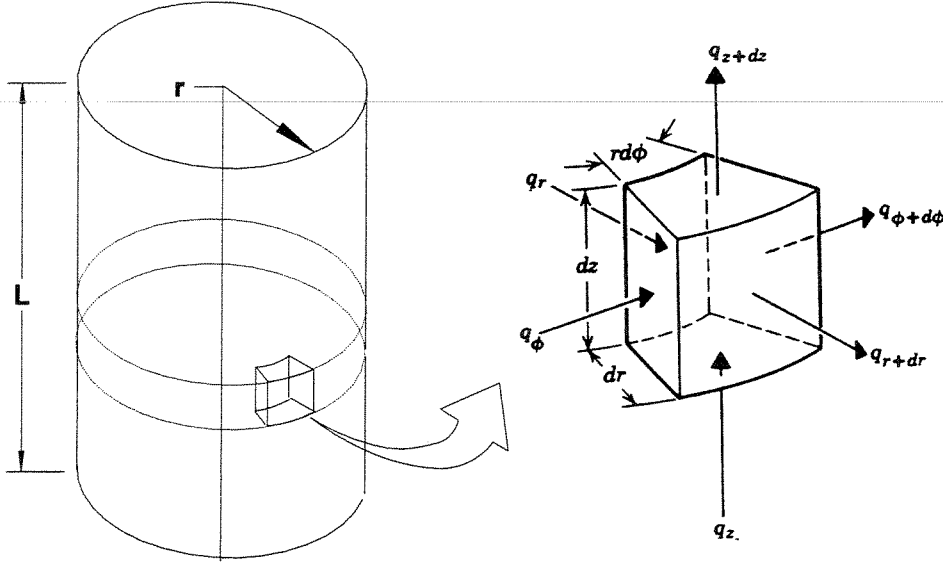


Figura I.1 Volume elementar de controle em coordenadas cilíndricas.

Para derivar a equação de balanço de calor foi selecionado um volume elementar de controle em coordenadas cilíndricas o qual representa do ponto de vista matemático quantidades infinitesimais, mas do ponto de vista físico estas quantidades são suficientemente grandes que permitem negligenciar a estrutura discreta da matéria, e portanto, considera-la como um meio contínuo.

I.1.2 Balanço de calor no volume de controle.

A quantidade de calor que penetra ou sai do elemento de volume dv (fig. I.1) no intervalo de tempo infinitesimal dt é proporcional à variação da *energia interna* da substância contida no volume de controle. Isto pode ser expresso da seguinte maneira:

$$dQ = dQ_1 + dQ_2 + dQ_3 \quad (I.1)$$

Onde dQ é a quantidade de calor transferida por condução no volume dv no tempo dt , dQ_1 Variação infinitesimal da entalpia da substância sólida, dQ_2 Variação infinitesimal da entalpia das substâncias gasosas que se desprendem durante a torrefação, dQ_3 Variação infinitesimal da entalpia devido às reações químicas de despolimerização da biomassa.

A quantidade infinitesimal dQ é proporcional aos fluxos de calor que atravessam o volume dv (fig. I.1), portanto:

$$dQ = (q_r - q_{r+dr}) + (q_z - q_{z+dz}) + (q_\phi - q_{\phi+d\phi}) \quad (I.2)$$

Considerando que a peça é aquecida de forma homogênea em todo o perímetro, então a variação do fluxo circunferencial dq_ϕ é nula. Sendo a equação I.1 simplificada na expressão:

$$dQ = (q_r - q_{r+dr}) + (q_z - q_{z+dz}) \quad (I.3)$$

Os vetores de fluxos incrementados (q_{r+dr}) e (q_{z+dz}) são funções contínuas e diferenciáveis nos intervalos dr e dz do volume de controle. Portanto, podem ser expandidas em series de Taylor:

$$q_{r+dr} = q_r + \frac{\partial q_r}{\partial r} dr + \frac{\partial^2 q_r}{\partial r^2} \frac{d^2 r}{2!} + \dots \quad (I.4)$$

$$q_{z+dz} = q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz + \frac{\partial^2 q_z}{\partial z^2} \frac{d^2 z}{2!} + \dots \quad (I.5)$$

Considerando apenas os dois primeiros termos da series de Taylor (eq. I.4 e I.5) e substituindo na eq. I.3, esta toma a forma de:

$$dQ = -\frac{\partial q_r}{\partial r} dr - \frac{\partial q_z}{\partial z} dz \quad (I.6)$$

Os vetores de intensidade de fluxo q_r e q_z se comportam de acordo com a lei de Fourier da condução de calor, portanto:

$$q_r = -K_e \frac{\partial T}{\partial r} r dz d\phi \quad (I.7)$$

$$q_z = -K_e \frac{\partial T}{\partial z} r dr d\phi \quad (I.8)$$

Substituindo (I.7) e (I.8) em (I.6)

$$dQ = \frac{\partial}{\partial r} \left(r K_e \frac{\partial T}{\partial r} \right) dr dz d\phi + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_e \frac{\partial T}{\partial z} \right) r dr dz d\phi \quad (I.9)$$

Na equação (I.9) K_e é a condutividade térmica do sólido em transformação

A quantidade dQ_i pode ser escrita como:

$$dQ_i = \frac{\partial i}{\partial t} r dr dz d\phi \quad (I.10)$$

Onde i expressa a entalpia do sólido segundo a seguinte equação:

$$i = (\rho_w C_w + \rho_c C_c + \chi \rho_w C_{H2O}) T \quad (I.11)$$

Portanto:

$$dQ_1 = \frac{\partial(\langle \rho_w C_w + \rho_c C_c + \rho_w C_{H2O} \rangle T)}{\partial t} r dr dz d\phi \quad (I.12)$$

A quantidade infinitesimal dQ_2 é proporcional aos fluxos mássicos de calor dos voláteis que atravessam o volume dv (fig. I.1), e que tem efeito de resfriamento no sólido. Portanto:

$$dQ_2 = (i_r - i_{r+dr}) + (i_z - i_{z+dz}) \quad (I.13)$$

De igual maneira, os vetores de fluxo mássico de calor i_{r+dr} e i_{z+dz} são diferenciáveis nos correspondentes intervalos geométricos, e portanto expandidos na série de Taylor. Consequentemente a equação (I.13) se torna:

$$dQ_2 = \frac{\partial i_r}{\partial r} dr + \frac{\partial i_z}{\partial z} dz \quad (I.14)$$

Onde :

$$i_r = \left(\langle \rho_g C_g + \rho_v C_v \rangle u_r T \right) r dz d\phi \quad (I.15)$$

$$i_z = \left(\langle \rho_g C_g + \rho_v C_v \rangle u_z T \right) r dr d\phi \quad (I.16)$$

substituindo (I.15) e (I.16) em (I.14)

$$dQ_2 = \frac{\partial(\langle \rho_g C_g + \rho_v C_v \rangle u_r T)}{\partial r} r dr dz d\phi + \frac{\partial(\langle \rho_g C_g + \rho_v C_v \rangle u_z T)}{\partial z} r dr dz d\phi \quad (I.17)$$

A quantidade infinitesimal dQ_3 é proporcional à taxa de calor absorvido nas reações de despolimerização e secagem da biomassa no volume dv (fig. I.1). Expressa por:

$$dQ_3 = \left(\sum_{i=1}^3 \Delta h_i r_i + \Delta h_{ev} r_{ev} \right) r dr dz d\phi \quad (I.18)$$

Substituindo (I.9), (I.12), (I.17) e (I.18) em (I.1) resulta na equação de difusão de calor em coordenadas cilíndricas em duas dimensões.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\langle \rho_w C_w + \rho_c C_c + \rho_w C_{H2O} \rangle T)}{\partial t} = \\ & = \frac{\partial}{\partial r} \left(r K_e \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_e \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \frac{\partial(\langle \rho_g C_g + \rho_v C_v \rangle u_r T)}{\partial r} - \frac{\partial(\langle \rho_g C_g + \rho_v C_v \rangle u_z T)}{\partial z} - \sum_{i=1}^3 \Delta h_i r_i - \Delta h_{ev} r_{ev} \end{aligned} \quad (I.19)$$

Para um modelo unidimensional com geometria variável entre um cilindro e um disco se introduz na equação (I.19) o fator de forma n na dimensão característica do modelo (r).

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} [(\rho_w c_w + \rho_c c_c + x \rho_w c_{H_2O}) T] = \\ = \frac{\partial}{r^n \partial r} (r^n k_{eff} \frac{\partial T}{\partial r}) - \frac{\partial}{\partial r} [(\rho_g u c_g + \rho_v u c_v) T] - \sum_{i=1}^3 \Delta h_i r_i - \Delta h_{ev} r_{ev} \end{aligned} \quad (I.20)$$

Onde $n=1$ para um cilindro ($d/l \ll 2$) e $n=0$ para um disco ($d/l \gg 2$)

O mesmo tratamento matemático pode ser realizado para derivar as equações de continuidade dos gases e vapores. O sistema de equações resultantes é de tipo diferencial parcial não homogênea, portanto de solução não exata (precisa de método numérico). Para solucionar este sistema foi adotado um esquema em *diferenças finitas explícito*, cuja estabilidade na solução está condicionado pela relação (I.21)

$$\Delta t \leq \frac{1}{3} \Delta r^2 \left(\frac{C_w \rho_w}{K_e} \right) \quad (I.21)$$

I.2 Avaliação experimental do modelo matemático.

I.2.1 Materiais e métodos

Para a avaliação experimental, utilizou-se um forno elétrico com controle automático de temperatura. Neste forno foi introduzido um fluxo de nitrogênio (5 litros por hora), com o objetivo de criar uma atmosfera inerte. Para o controle de temperatura, foram colocados dois termopares, um registrando a temperatura dos gases no forno e o outro registrando a temperatura no centro da amostra (ver figura I.2).

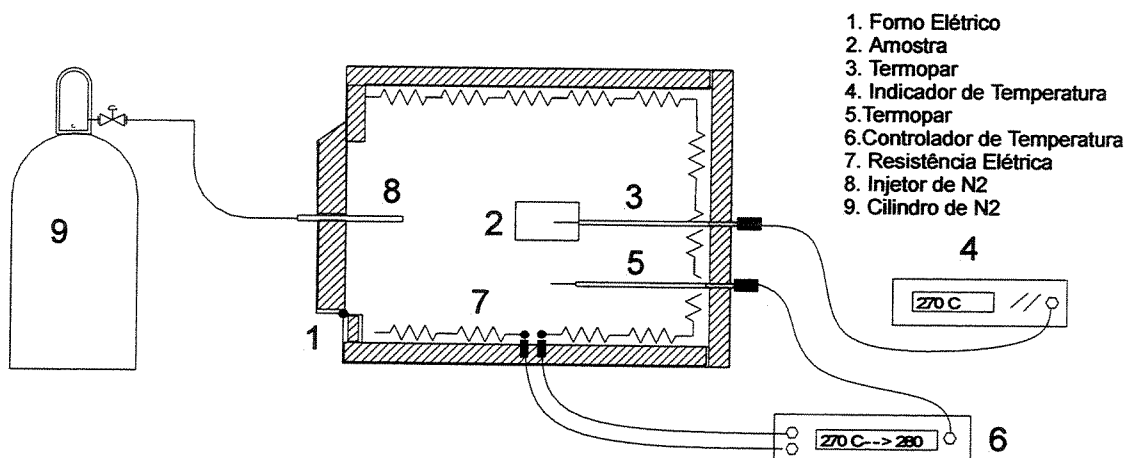


Figura I.2 Instalação experimental para a avaliação do modelo

As amostras utilizadas foram cilindros de pinho, com 20 mm de diâmetro e 40 mm de comprimento. Antes de realizar os ensaios, as amostras foram secas em uma estufa a 110°C. O termopar utilizado no centro da

amostra foi de 1 mm de diâmetro para diminuir os efeitos de descontinuidade na amostra. A faixa do erro de medição foi de $\pm 1^\circ\text{C}$.

Foram realizados ensaios a 130, 230, 260 e 280 $^\circ\text{C}$ durante um tempo de 20 minutos, com objetivo de medir o perfil de temperatura no centro da amostra. Terminado o ensaio, a amostra foi retirada rapidamente do forno e resfriada num dessecador durante um período de 2 horas. Logo após a amostra, foi pesada numa balança analítica com objetivo de determinar a conversão total no sólido.

Para a simulação numérica foram utilizados os dados cinéticos da despolimerização da madeira de pinho. O coeficiente de transferência de calor no forno, foi calculado segundo as equações criteriais para um cilindro submetido a fluxo convectivo de calor, em regime transiente. Para isto, foi utilizada uma amostra de madeira e colocada no forno a 130 $^\circ\text{C}$, determinando-se o perfil de temperatura em função do tempo. Com esses dados foi calculado, segundo os critérios de Biot e Fourier, o coeficiente médio de transferência de calor; o valor médio determinado para estas condições foi de 16 $\text{W/m}^2\text{K}$.

Tabela I.1. Dados dos parâmetros cinéticos e físicos utilizados na simulação

Dados cinéticos	Valor	Dados físicos	Valor
A_1 (1/s)	$1,30 \times 10^8$	ρ_{wo} (kg/m^3)	380,00
A_2 (1/s)	$2,00 \times 10^8$	c_w (kJ/kg)	1,50
A_3 (1/s)	$1,08 \times 10^7$	c_g (kJ/kg)	1,10
E_1 (kJ/mol)	140,00	c_c (kJ/kg)	1,10
E_2 (kJ/mol)	133,00	k_w (W/mk)	$16,00 \times 10^{-2}$
E_3 (kJ/mol)	121,00	k_c (W/mk)	$7,10 \times 10^{-2}$
Δh_1 (kJ/kg)	322,00	*h ($\text{W/m}^2\text{K}$)	16,00
Δh_2 (kJ/kg)	322,00	—	—
Δh_3 (kJ/kg)	322,00	—	—

* Determinado experimentalmente

I.2.2 Resultados

A figura I.2 mostra um bom ajuste entre os perfis de temperatura experimentais e teóricos. Observa-se que para a temperatura de 403K, o ajuste dos dados é maior que para as outras condições de temperatura. Isto, provavelmente, deve-se a que nessa fase do processo, não foram feitas simplificações no modelo, pois é um fenômeno aquecimento simples.

Na tabela I.2 é oferecida uma análise estatística entre os valores experimentais e os teóricos. Observa-se que a temperaturas mais altas o ajuste diminui, este fato pode estar relacionado aos valores cinéticos utilizados, assim como as simplificações do modelo e a erros nas medições. A figura I.4, mostra uma comparação dos valores experimentais e simulados da conversão no sólido. O ajuste do modelo é melhor para temperaturas menores.

O ajuste dos dados corresponde a um coeficiente de correlação de 99 % com um desvio padrão médio de $\pm 0,2$ %. Das análises anteriores, pode-se concluir que o modelo proposto descreve de forma adequada o fenômeno de torrefação. Portanto, este modelo pode ser utilizado como ferramenta de análise e diagnóstico.

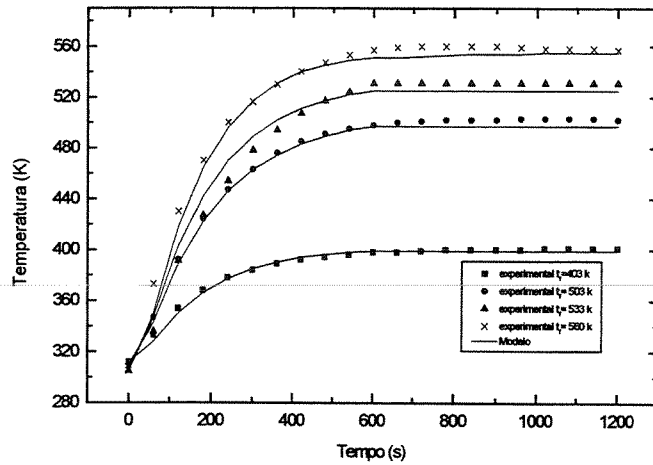


Figura I.3 . Comparação dos perfis de temperatura experimentais e teóricos.

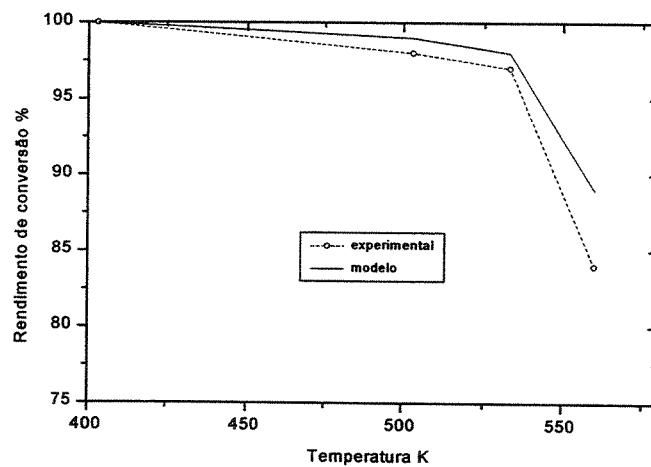
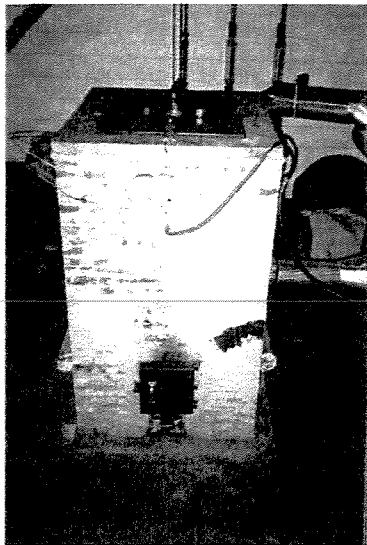


Figura I.4. Rendimento na conversão. comparação dos valores experimentais e simulados

Tabela I.2. Análise estatística entre valores experimentais e teóricos dos perfis de temperaturas

Temperatura do forno (K)	Coefficiente de correlação (%)	Desvio padrão (K)
403	99,70	$\pm 1,83$
503	99,90	$\pm 1,92$
533	99,50	$\pm 6,45$
560	99,70	$\pm 5,11$

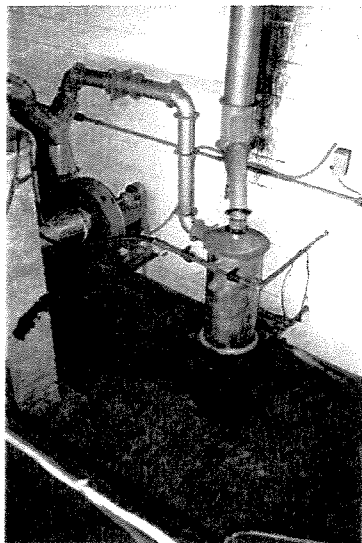
Anexo II



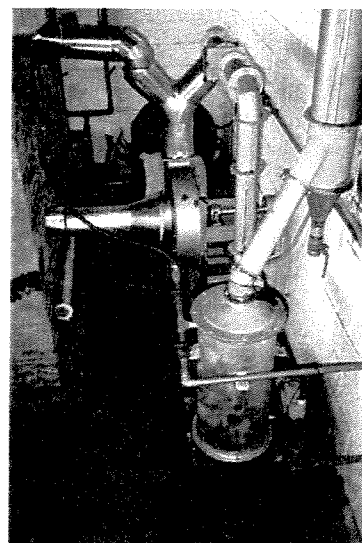
Vista frontal do forno de torrefação



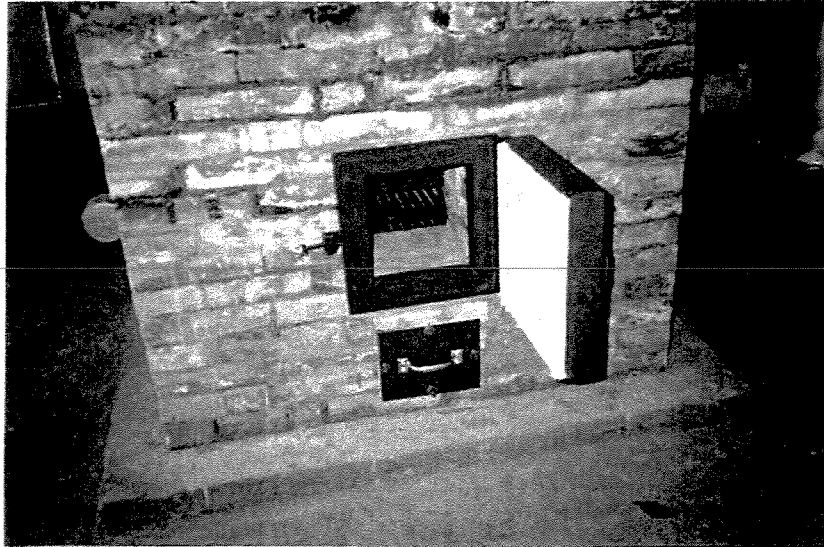
Sistema de refluxo de gás e vapor



Sistema de exaustão



Detalhe do acoplamento do sistema de exaustão e condensação



Vista da câmara de combustão



Carregando o cesto no forno



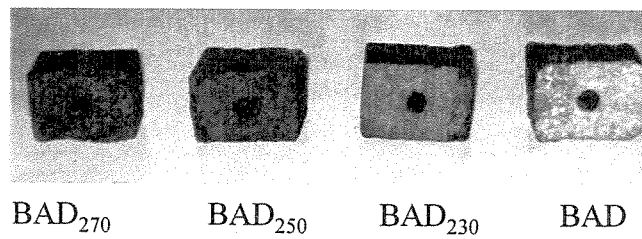
Cesto para carregar a biomassa



Aspecto das amostras ME₂₇₀

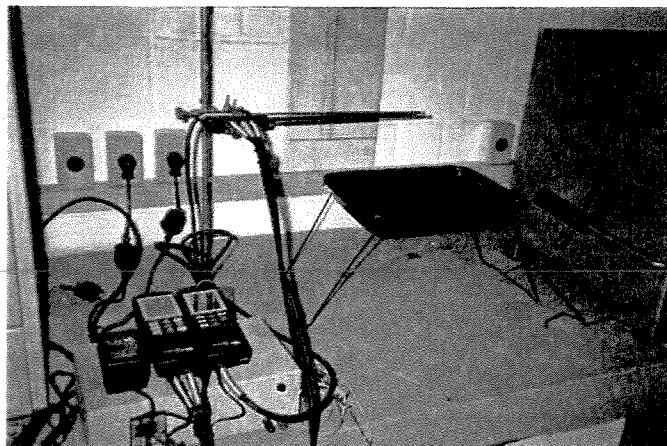


Aspecto da madeira antes e após a torrefação



Aspecto dos briquetes antes e após a torrefação

Anexo III



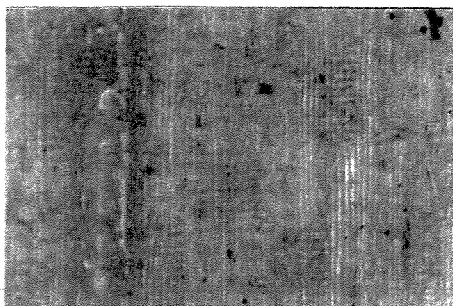
Montagem experimental para determinar a concentração de CO durante a combustão em uma churrasqueira



Teste de combustão com amostras ME₂₇₀



Teste de combustão com amostras BAD₂₇₀



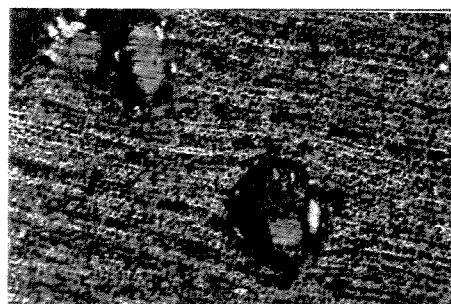
Micrografia (1): Madeira *in natura*



Micrografia (2): Madeira torrificada 230°C



Micrografia (3): Madeira torrificada 250°C



Micrografia (4): Madeira torrificada 270°C

Anexo IV

IV. Regressão numérica da equação do Poder Calorífico Superior (PCS)

IV.1 Equação de regressão

A equação de regressão utilizada foi de tipo linear, sendo a variável dependente o PCS e as variáveis independentes as porcentagens elementares de carbono (C), Hidrogênio (H) e oxigênios (O).

A forma geral da equação é a seguinte:

$$PCS = K_1[C] + K_2[H] + K_3[O] + K_4 \quad (IV.1)$$

Onde:

PCS = poder calorífico superior (kJ/kg);

[C] = teor de carbono elementar, em base seca, (%);

[H] = teor de hidrogênio elementar, em base seca, (%);

[O] = teor de oxigênio elementar, em base seca, (%)

[A] = teor de cinzas, em base seca, (%);

K_i = constantes.

IV.2 O método é os dados de regressão

Para a regressão foi utilizado o método de redução de Gauss, para isto foram utilizados dois conjuntos de dados diferentes. Estes dados foram obtidos de forma experimental, e correspondem a madeira ou resíduos de madeiras torreficados em diferentes temperaturas. Com tais dados, é possível encontrar as quatro constantes K_i para a equação (IV.1) A tabela IV.1 mostra os conjuntos de dados utilizados na regressão.

Tabela IV.1 Conjunto de dados experimentais				
Fontes	C (%)	H (%)	O (%)	PCS (kJ/kg)
(1)	51,58	6,87	34,95	20426
	52,02	6,5	35,08	20989
	53,79	6,28	33,33	21065
	54,66	6,1	31,44	21209
	55,81	6,6	29,79	22061
	57,63	6	28,47	22674
	58,85	5,52	25,93	22772
	59,82	5,26	25,22	22981
	63	4,28	22,92	23066
(2)	53,17	5,93	39,81	20450
	54,22	5,83	38,82	21050
	57,52	5,6	35,8	22150
	57,71	5,54	35,63	22150
	68,68	4,83	25,35	25800

Fontes:

(1) Fonseca Felfli, F. (1999) Melhoramento das características energéticas de resíduos de biomassa através da torrefação. Faculdade de Engenharia mecânica, Dissertação de mestrado UNICAMP. 110p.

(2) Girard P. & Nshah N. (1991) Developments on Torrefied wood an alternative to charcoal for reducing deforestation. REUR Technical Series, n° 20, p. 101-114.

IV.3 Resultados da regressão

A equação de regressão obtida foi a seguinte:

$$PCS = 243,08 (\%C) + 548,89 (\%H) - 21,73 (\%O)$$

Tabela IV.2 Resumo da Regressão

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,988
R-Quadrado	0,978
R-quadrado ajustado	0,883
Erro padrão	228,162
Observações	14

Tabela IV.3 ANOVA

	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	3	25318802,16	8439600,72	162,1191325	8,9093E-09
Resíduo	11	572638,1982	52058,01801		
Total	14	25891440,36			

Tabela IV.4 Coeficientes de regressão

	Coefficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Interseção	0	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
Variável C	343,0874946	5,743243996	59,73757947	3,57715E-15	330,4466934	355,7283	330,4467	355,7283
Variável H	548,8993523	94,30053691	5,82074472	0,000115725	341,345165	756,4535	341,3452	756,4535
Variável O	-21,72634452	14,15717888	-1,534652115	0,15311549	-52,88610091	9,433412	-52,8861	9,433412

IV.4 Validade da equação e correlação numérica com outras bases de dados

Para comprovar a validade da equação obtida, foram usadas outras fontes de dados experimentais e comparadas com os resultados teóricos da equação.

Tabela IV.5 Correlação com outros dados

C (%)	H(%)	O(%)	PCS ⁽³⁾ (kJ/kg)	PCS = 243,08 (%C) + 548,89 (%H) - 21,73 (%O)
51,45	6,13	41,59	20450	20112,40
53,26	6,14	40,48	21000	20763,00
54,03	6,03	39,84	21500	20980,70
56,37	5,8	37,23	22500	21713,97
58,62	5,65	34,87	22850	22454,85
48,07	6,32	44,77	19350	18987,99
47,33	6,34	45,23	19350	18735,09
48,58	5,93	45,67	16434	18929,33
83,69	2,49	9,59	30250	29870,71

(3) fonte: BOURGEOIS, JP. Torrefied Wood from temperate and tropical species, advantages and prospects. BIOENERGY 84, p153-159, 1985

O coeficiente de correlação entre os dados experimentais e teóricos é de 0,967, ou seja, aceitável em termos estatísticos. Na figura IV.1 é mostrada esta correlação.

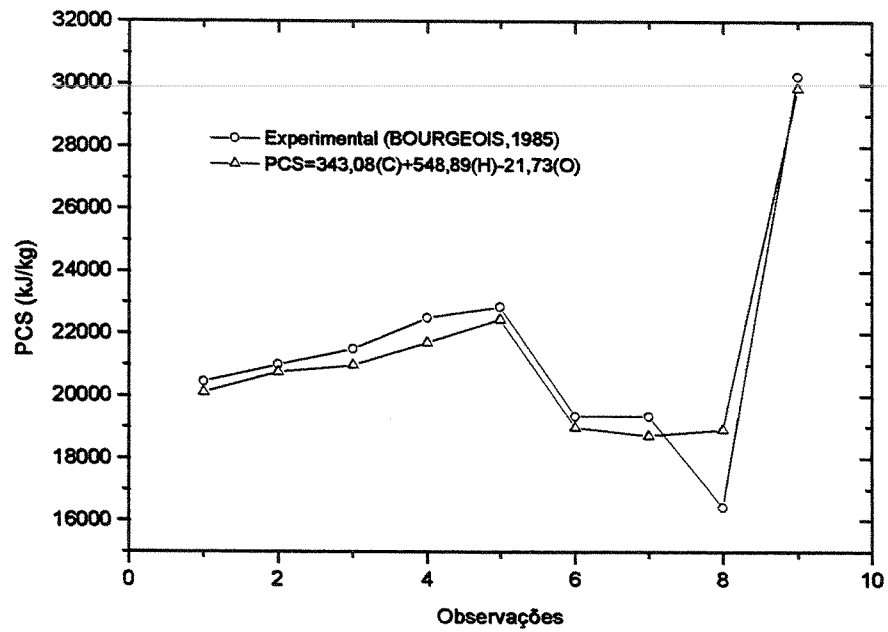


Figura IV.1. Comparação entre valores experimentais e valores modelados.

Anexo V

PESQUISA DO MERCADO DOMÉSTICO DE CARVÃO VEGETAL

ENTREVISTADOR:
DATA:
Nº QUESTIONÁRIO:

QUESTÕES

1. Você já comprou carvão para uso doméstico?
☐ 1. Não (encerrar)
☐ 2. Sim (continuar)
2. Para que finalidade você compra carvão? (*pode marcar mais de uma opção*)
☐ 1. Churrasco
☐ 2. Combustível doméstico
☐ 3. Outras. Quais?: _____
3. Aproximadamente, quantas vezes ao ano você costuma comprar carvão?
☐ menos de uma vez por ano (1)
☐ 1 vez por ano (2)
☐ 2 vezes por ano (3)
☐ 3 vezes por ano (4)
☐ 4 vezes por ano (5)
☐ 5 vezes por ano (6)
☐ 6 vezes por ano (7)
☐ mais de 6 vezes por ano (8)
4. Você tem preferência por alguma marca de carvão?
☐ 1. Não (passar à pergunta 6)
☐ 2. Sim (passar à pergunta 5)
5. Qual é a marca de sua preferência? _____
6. Você compra o carvão:
☐ 1. Pelo preço ?
☐ 2. Pela Procedência (reflorestado, selo ambiental ...)?
☐ 3. Pela qualidade?
☐ 4. Por estar disponível na prateleira?
7. Como você avalia a qualidade do carvão que se costuma vender no mercado?
☐ 1. Ótima
☐ 2. Boa
☐ 3. Regular
☐ 4. Ruim
☐ 5. Péssima
☐ 6. Não sabe

8. Você sabe se o carvão quando é queimado emite alguma substância prejudicial à saúde?

- ☐ 1. Sim
- ☐ 2. Não

9. Em sua opinião um carvão muito bom:

9.1 DEVE

- ☐ 1. Acender rápido
- ☐ 2. Demorar para acender
- ☐ 3. Não sabe

9.2 DEVE

- ☐ 1. Ter cheiro quando queima
- ☐ 2. Não ter cheiro quando queima
- ☐ 3. Não sabe

9.3 DEVE (no caso de churrasco)

- ☐ 1. Dar sabor à carne
- ☐ 2. Não dar sabor à carne
- ☐ 3. Não sabe

9.4 DEVE

- ☐ 1. Sujar as mãos
- ☐ 2. Não sujar as mãos
- ☐ 3. Não sabe

9.5 DEVE

- ☐ 1. Ter uma Brasa de longa duração
- ☐ 2. Ter Brasa de curta duração
- ☐ 3. Não sabe

9.6 DEVE

- ☐ 1. Ser produzido de madeira reflorestada
- ☐ 2. Ser produzido de madeiras nativas
- ☐ 3. Não sabe

9.7 Quais outras características você atribuiria a um bom carvão?:

10. No caso de um novo tipo de carvão ser comercializado saberia identificá-lo?

- ☐ 1. Sim
- ☐ 2. Não

11. Compraria o novo produto ?

- ☐ 1. Não
- ☐ 2. Sim . Por quê?----
- ☐ 3. Não sabe

12. Critério Brasil de estratificação social

Artigos domésticos

ITENS	Não tem	TEM			
		1	2	3	4 ou +
Televisão em cores	0	2	3	4	5
Rádio	0	1	2	3	4
Banheiro	0	2	3	4	4
Automóvel	0	2	4	5	5
Empregada	0	2	4	4	4
Aspirador de pó	0	1	1	1	1
Maquina de lavar	0	1	1	1	1
Videocassete	0	2	2	2	2
Geladeira	0	2	2	2	2
Freezer	0	1	1	1	1

Grau de instrução do chefe de família

Analfabeto/Primário incompleto	0
Primário completo/ ginásial incompleto	1
Ginásial completo/ Colegial incompleto	2
Colegial completo/ superior incompleto	3
Superior completo	5

PESQUISA DO MECADO DE LENHA NO SETOR COMERCIAL DE PIZZARIAS

ESTABELECIMENTO COMERCIAL:

DATA:

Nº QUESTIONÁRIO:

QUESTÕES

1. Qual o combustível que costuma-se usar ?

- ☐ 1. Lenha
☐ 2. Briquetes de madeira
☐ 3. Outros. Qual? _____

2. Qual é o consumo semanal ou mensal de combustível ? _____

3. Tem preferência por algum fornecedor?

- ☐ 1. Sim
☐ 2. Não

4. Quais os critérios usados para a compra da lenha?

- ☐ 1. Pelo preço
☐ 2. Pela procedência (Fornecedor, etc..)

- ☐ 3. Pela qualidade
5. Como avalia a qualidade da lenha que geralmente é usada?
- ☐ 1. Ótima
☐ 2. Boa
☐ 3. Regular
☐ 4. Ruim
☐ 5. Péssima
☐ 6. Não sabe
-
6. Quais as características ideais para a lenha ser considerada de uma boa qualidade?.

PESQUISA DO MECADO DE LENHA NO SETOR DE INDUSTRIAS CERÂMICAS

INDUSTRIA:
DATA:
Nº QUESTIONÁRIO:

QUESTÕES

1. Qual o combustível que costuma usar ?
- ☐ 1. Lenha
☐ 2. Briquetes de madeira
☐ 3. Outros. Qual? _____
2. Qual é o consumo semanal ou mensal de combustível ? _____
3. Quais os critérios usados para a compra da lenha?
- ☐ 1. Pelo preço
☐ 2. Pela procedência (Fornecedor, etc..)
☐ 3. Pela qualidade
4. Como avalia a qualidade da lenha que geralmente é usada?
- ☐ 1. Ótima
☐ 2. Boa
☐ 3. Regular
☐ 4. Ruim
☐ 5. Péssima
☐ 6. Não sabe
5. Quais os fatores que mais influenciam na qualidade do produto?

- ☐ 1. Combustível
- ☐ 2. Matéria prima
- ☐ 3. Ambos

6. Como deveria ser a lenha ideal para o processo?

- ☐ 1. Umidade:
- ☐ 2. Calorias:
- ☐ 3. Labaredas:
- ☐ 4. Braças:
- ☐ 5. Tempo de queima
- ☐ 6. Outros Fatores

7. Questões técnicas

- 1. Tipo de forno?: _____
- 2. O forno usa ar secundário?: Sim _____ Não _____
- 3. Como alimenta o forno?: Manual _____ Mecânico _____
- 4. Como estoca a lenha?: _____

Diagnostico energético dos fornos

- 1. Amostras de lenha _____
- 2. Amostras de cinzas _____

No.	CO ppm	O2 %	CO2 %	T °C

- 3. Obs.: _____