

UNESP

Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá

**CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA, FÍSICA E TÉRMICA DE *PELLETS*
DE MADEIRA PRODUZIDOS NO BRASIL**

Guaratinguetá

2010

DORIVAL PINHEIRO GARCIA

**CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA, FÍSICA E TÉRMICA DE *PELLETS*
DE MADEIRA PRODUZIDOS NO BRASIL**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de Materiais Compósitos Lignocelulósicos.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Ventorim

Co-orientador: Prof. Dr. José Cláudio Caraschi

Guaratinguetá

2010

G216c

Garcia, Dorival Pinheiro

Caracterização química, física e térmica de *pellets* de madeira produzidos no Brasil / Dorival Pinheiro Garcia – Guaratinguetá : [s.n], 2010.

101 f. : il.

Bibliografia: f. 90-97

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2010.

Orientador: Dr. Gustavo Ventorim

Co-orientador: Dr. José Cláudio Caraschi

1. Biomassa 2. Energia – fontes alternativas 3. Biocombustíveis
I. Título

CDU 620.91

DORIVAL PINHEIRO GARCIA

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: MATERIAIS

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO



Prof. Dr. Marcelo dos Santos Pereira
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. JOSÉ CLÁUDIO CARASCHI
Co-Orientador / Unesp-Itapeva



Prof. Dr. CLAUDIO DE CONTI
Unesp-Itapeva



Prof. Dr. ALCIDES LOPES LEÃO
Unesp/Botucatu

DADOS CURRICULARES

DORIVAL PINHEIRO GARCIA

NASCIMENTO	30.04.1971 – Itaberá/SP
FILIAÇÃO	Onofre Pinheiro Garcia (in memorian) Geni Máximo Garcia
1990/1994	Curso de Licenciatura Plena em Matemática OSE/AEI – Associação de Ensino de Itapetininga
1998/1999	Curso de Especiliazação em Metodologia do Ensino de Matemática – Faculdade São Luis
2000/2001	Curso de Especiliazação em Metodologia do Ensino de Física - UNOESTE
2003/2008	Curso de Graduação Engenharia Industrial Madeireira - UNESP
2008/2010	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Área de Materiais Compósitos Lignocelulósicos, nível de Mestrado - FEG-UNESP.

DEDICATÓRIA

A minha filha Izadora, que com os seus meses de vida, foi a grande motivadora para que eu continuasse no curso e à minha querida esposa Fernanda.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, fonte da vida e da graça. Agradeço pela vida, dons recebidos, família e amigos,

Ao meu orientador e co-orientador, *Prof. Dr. Gustavo Ventorim e Prof. Dr. José Cláudio Caraschi*, que jamais deixaram de me incentivar,

A minha mãe Geni Máximo Garcia que, apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivou meus estudos,

A minha Prof^a Heloísa Martins Chaves de Língua Portuguesa, que com rapidez e dedicação corrigiu a ortografia dentro das novas regras ortográficas,

A todos os professores, funcionários e técnicos de laboratório da UNESP - Campus de Itapeva,

A todos os professores, funcionários e técnicos de laboratório da UNESP – FEG de Guaratinguetá,

A todos que, de maneira direta ou indireta, ajudaram no desenvolvimento e término deste trabalho.

“Eu aprendi que para crescer como pessoa
é preciso me cercar de gente mais
inteligente do que eu”

Willian Shakespeare

GARCIA, D. P. **Caracterização química, física e térmica de *pellets* de madeira produzidos no Brasil**. 2010. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - FEG/UNESP - Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2010.

RESUMO

A atual matriz energética mundial baseia-se fundamentalmente na utilização de combustíveis fósseis, mas por questões ambientais (efeito estufa e as emissões de CO₂) e econômicas (preço do barril), o petróleo vem sendo substituído por outras formas de energia como os *pellets* de madeira que possuem grande potencial para suprir as necessidades atuais de energia com menor impacto ambiental. Desta forma, este estudo objetiva comparar as principais características químicas (carbono fixo, voláteis, cinzas, extrativos, lignina e holocelulose), características físicas (comprimento, diâmetro, densidade a granel, teor de umidade e durabilidade mecânica), características térmicas (poder calorífico superior e inferior, densidade energética e termogravimetria) e as emissões de CO e NO_x, desses biocombustíveis, com os padrões de qualidade estabelecidos pelas normas nacionais e internacionais. Foram analisadas quatro procedências de *pellets* (um de eucalipto e três de pinus), uma amostra de serragem de eucalipto, uma amostra de casca de pinus e uma amostra de cavacos de pinus. Os *pellets* foram produzidos no Brasil e obtidos diretamente com os produtores em suas embalagens comerciais de venda e efetuadas análises seguindo normas padrões. A amostragem de gás foi realizada utilizando um analisador eletroquímico de gases para a determinação dos teores de monóxido de carbono, dióxido de carbono e óxidos de nitrogênio presentes nos gases da combustão. Essas análises mostraram que o poder calorífico inferior dos *pellets* P1, *pellets* P3 e *pellets* P4, não atingiram valores mínimos exigidos na norma austríaca, que estabelece valores $\geq 18\text{MJ/kg}$ e alemã, que exige valores de 17,5 a 19,5 MJ/kg. Quanto ao teor de umidade, os resultados mostraram que a maioria atingiu este parâmetro de qualidade. A durabilidade mecânica dos *pellets* P1, *pellets* P3 e *pellets* P4 estão abaixo dos valores mínimos fixados pelas normas. As emissões gasosas de NO_x de todas as biomassas analisadas encontram-se abaixo dos 650 mg/Nm³ para a referência de 8% de O₂ e das emissões gasosas de CO, apenas os *pellets* P2 e *pellets* P4 ficaram dentro da faixa estipulada pela norma do CONAMA.

PALAVRAS-CHAVE: Biomassa florestal. Madeira para energia. Energia renovável. Biocombustível. Combustível de *pellets*.

GARCIA, D. P. Chemical, physical and thermal characterization of wood pellets produced in Brazil. 2010. 101 f. Dissertation (Master's degree in Mechanical Engineering) - FEG/UNESP - Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2010.

ABSTRACT

The current world-wide energy model is based basically on the oil fuel use, but for environment questions (greenhouse effect and CO₂ emissions) and economic (barrel of the price), the oil comes being substituted for other forms of energy as wood pellets that it possess great potential to supply the current necessities of energy with lesser environment impact. In such a way, this objective study to compare the main chemistries characteristics (fixed carbon, volatile, ashes, extratives, lignin and holocellulose), physical characteristics (length, diameter, in bulk density, moisture content and mechanical durability), thermal characteristics (heating value, net heating value, energy density, thermogravimetric) and the emissions CO and NO_x, of this bioenergy with the standards of quality established by the national and international norms. The four analyzed samples had been wooden origin of pellets (one eucalyptus and three of the pinus), one sample of the sawdust of the eucalyptus, one sample of the pinus bark and one sample the wood pinus chips. The wood pellets were produced in Brazil and gotten directly with the producers in commercial packings, and made analysis regarding standard rules. An electrochemical analyzer of gases was used for the determination of carbon monoxide content, carbon dioxide and nitrogen oxides gifts in the gases of the combustion. These analyses had shown that the net value heat of pellets P1, pellets P3 and pellets P4 had not reached a minimum values claimed in the Austrian norm that demands values $\geq 18\text{MJ/kg}$ and German who requires values of 17,5 the 19,5 MJ/kg. How much to the characteristics physical (length, diameter, density in bulk, moisture content) the results had shown that the majority reached this parameter of quality. The mechanics durability of pellets P1, pellets P3 and pellets P4 is below of the minimum values settled by the requirements. The gaseous emissions of NO_x of all the analyzed biomasses meet below of 650 mg/Nm³ for the reference of 8% of O₂ and for the gaseous emissions of CO as well, only pellets P2 and pellets P4 had been inside of the band stipulated for CONAMA's norm.

WORD-KEY: Forest Biomass. Wood fuel. Renewable Energy. Biofuels. Pellet fuels

LISTA DE FIGURAS

Figura 01: <i>Pellets</i> de madeira.	18
Figura 02: Evolução das plantas industriais de <i>pellets</i> na Europa.	20
Figura 03: Fluxograma do processo produtivo dos <i>pellets</i>	22
Figura 04: Matriz de aço perfurada para produção dos <i>pellets</i>	24
Figura 05: Embalagem padrão de 20 kg de <i>pellets</i>	25
Figura 06: Transporte de <i>pellets</i> em caminhões tanques.	25
Figura 07: Diagrama dos processos de conversão da biomassa florestal.	35
Figura 08: O PC da biomassa florestal em função da umidade.	40
Figura 09: Evolução da massa de uma partícula de biomassa na combustão.	47
Figura 10: As amostras de <i>pellets</i> analisadas.	52
Figura 11: As amostras de cascas, cavacos e serragem analisadas.	53
Figura 12: Bomba calorimétrica isotérmica modelo IKA C-5000.	56
Figura 13: Caixa utilizada para o teste de durabilidade mecânica.	58
Figura 14: Analisador de gás UNIGAS 3000 MK III.	61
Figura 15: Queimador de biomassa da Berneck de 0,08 MW.	63
Figura 16: Analisador termogravimétrico Perkin Elmer modelo TGA 07.	64
Figura 17: Análise termogravimétrica para os <i>pellets</i> P1.	76
Figura 18: Análise termogravimétrica para os <i>pellets</i> P2.	77
Figura 19: Análise termogravimétrica para os <i>pellets</i> P3.	77
Figura 20: Análise termogravimétrica para os <i>pellets</i> P4.	78
Figura 21: Gráfico CO _{ref.} (calculado) comparado com os padrões CONAMA.	81
Figura 22: Evolução das emissões de CO na combustão.	82
Figura 23: Evolução das emissões de NO _x durante a combustão.	83
Figura 24: Composição das cinzas residuais dados como óxidos.	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 01: Normas de padronização austríaca e sueca para os <i>pellets</i>	26
Tabela 02: Normas de padronização alemã e americana para os <i>pellets</i>	27
Tabela 03: Oferta interna de energia no mundo em % tep.	32
Tabela 04: Composição setorial do consumo final energético de biomassa.	34
Tabela 05: A Influência da umidade no PCI.	40
Tabela 06: Teores médios de elementos minerais por espécie (em ppm).	41
Tabela 07: Teor médio de cinzas de alguns combustíveis.	42
Tabela 08: Limites de emissão de poluentes para os derivados da madeira.	50
Tabela 09: Caracterização inicial das amostras.	54
Tabela 10: Características do analisador portátil UNIGAS 3000 MKIII.	62
Tabela 11: Propriedades físicas dos <i>pellets</i> de madeira.	65
Tabela 12: Propriedades químicas dos <i>pellets</i> de madeira.	67
Tabela 13: Análise química imediata dos <i>pellets</i> de madeira.	68
Tabela 14: Análise química imediata da Se, Cv e Ca.	69
Tabela 15: Dados para o cálculo da densidade a granel dos materiais.	70
Tabela 16: Valores energéticos dos <i>pellets</i> de madeira.	71
Tabela 17: Dados da análise elementar da madeira por Pastre (2002).	72
Tabela 18: Resultados das análises de durabilidade mecânica dos <i>pellets</i>	73
Tabela 19: Resumo do comportamento termogravimétrico dos <i>pellets</i> nos estágios. ..	79
Tabela 20: Resumo do comportamento termogravimétrico dos <i>pellets</i> nos picos.	79
Tabela 21: Resultados médios obtidos na análise dos gases da combustão.	80
Tabela 22: Resultados da análise de cinzas residuais nos combustíveis.	84
Tabela 23: Resultados da análise de cinzas residuais dos combustíveis.	85

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	-	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AEBIOM	-	European Biomass Association
ASTM	-	American Society for Testing and Materials
BEN	-	Balanco Energético Nacional
CEN	-	European Committee for standardization
CETESB	-	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CONAMA		Conselho Nacional do Meio Ambiente
DIN	-	Deutsches Institut Für Normung
DTG	-	Derivada Termogravimétrica
GLP	-	Gás de Petróleo Liquefeito
MME	-	Ministério de Minas e Energia
MPa	-	Megapascal
MW	-	Megawatts
NBR	-	Norma Brasileira Registrada
ONORM		Osterreichisches Normungs Institut
PCS	-	Poder Calorífico Superior
PCI	-	Poder Calorífico Inferior
PFI	-	Pellets Fuel Institute
SS	-	Swedish Standards
SVEBIO	-	Swedish Association of Pellets Producer
TAPPI	-	Technical Association of the Pulp and Paper Industry
TGA	-	Análise Termogravimétrica
TS	-	Technical Specifications
TU	-	Teor de Umidade
UV	-	Ultravioleta

LISTA DE SÍMBOLOS

Al_2O_3	Óxido de alumínio
CaO	Óxido de cálcio
CO	Monóxido de carbono
CO_2	Dióxido de carbono
Du	Durabilidade mecânica
Fe_2O_3	Óxido de ferro II
HCl	Cloreto de hidrogênio
HCN	Cianeto de hidrogênio
KCl	Cloreto de potássio
K_2SO_4	Sulfato de potássio
K_2O	Óxido de potássio
MgO	Óxido de magnésio
MnO	Óxido de manganês II
mg/Nm^3	Miligramas por normal metro cúbico
NH_3	Amônia
NH_4Cl	Cloreto de amônia
NO_x	Óxidos de nitrogênio
Nm^3	Normal metro cúbico
Na_2O	Óxido de sódio
P_2O_5	Pentóxido de difósforo
pH	Potencial de hidrogênio
ppm	Partes por milhão
rpm	Rotações por minuto
SO_2	Dióxido de enxofre
SiO_2	Óxido de silício
TiO_2	Óxido de titânio IV

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1 Justificativa para o trabalho.....	16
1.2 Objetivos do trabalho	17
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 Os <i>pellets</i> de madeira.....	18
2.1.1 O surgimento dos <i>pellets</i> de madeira	19
2.1.2 A produção dos <i>pellets</i> de madeira.....	21
2.1.3 Normas e padrões de qualidade para os <i>pellets</i>	26
2.2 A utilização da biomassa no Brasil e no mundo	32
2.3 Tecnologias para conversão da biomassa.....	35
2.4 A formação da biomassa florestal	36
2.4.1 Teor de umidade e o poder calorífico.....	38
2.4.2 Teor de cinzas da biomassa florestal	41
2.4.3 Densidade e volume da biomassa florestal.....	42
2.4.4 A biomassa florestal densificada	43
2.4.5 A combustão da biomassa florestal	44
2.4.6 Emissões de poluentes na combustão da biomassa.....	48
2.4.7 Limites de emissões para derivados da madeira	49
3. MATERIAL E MÉTODO	51
3.1 Material.....	51
3.2 Método.....	54
3.2.1 Determinação da análise imediata	54
3.2.2 Determinação da densidade a granel	55
3.2.3 Determinação das dimensões dos <i>pellets</i>	56
3.2.4 Poder calorífico superior (PCS) e inferior (PCI).....	56
3.2.5 Teor de umidade dos biocombustíveis	57
3.2.6 Análise química dos materiais lignocelulósicos.....	57
3.2.7 Determinação da durabilidade mecânica dos <i>pellets</i>	58

3.2.8	Determinação do teor de holocelulose	59
3.2.9	Determinação do teor de lignina insolúvel.....	60
3.2.10	Análises das cinzas dos materiais lignocelulósicos.....	61
3.3	Analisador de gás da combustão	61
3.4	Análise termogravimétrica	64
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	65
4.1	Caracterização física dos <i>pellets</i> de madeira.....	65
4.2	Análises químicas dos <i>pellets</i> de madeira	66
4.3	Análise química imediata dos <i>pellets</i> de madeira	68
4.4	Caracterização térmica dos <i>pellets</i> de madeira.....	70
4.5	Durabilidade mecânica dos <i>pellets</i> de madeira	73
4.6	Análise termogravimétrica	74
4.7	Análise das emissões gasosas na combustão da biomassa	79
4.8	Composição química determinada das cinzas residuais.....	84
5.	CONCLUSÕES.....	87
6.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	89
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	90
	GLOSSÁRIO	98

1. INTRODUÇÃO

A atual matriz energética mundial baseia-se fundamentalmente na utilização de combustíveis fósseis, devido ao domínio tecnológico promovido por países desenvolvidos onde há escassez de recursos naturais de caráter renovável e grande disponibilidade de fontes energéticas de origem fóssil, mas por questões ambientais (emissões de CO₂) e econômicas, o petróleo vem sendo substituído por outras formas de energia. A biomassa vegetal vem se fortalecendo neste novo cenário energético mundial, pois, dentre as fontes renováveis de energia, possui grande potencial para suprir as necessidades atuais de energia a preços cada vez mais competitivos e com menor impacto ambiental (VERDESIO, 2008).

O termo biomassa vegetal abrange os derivados recentes de plantas utilizadas como combustíveis. Na definição de biomassa para a geração de energia excluem-se os tradicionais combustíveis fósseis, embora estes também sejam derivados da vida vegetal ou animal, mas são resultado de várias transformações que levam milhões de anos para acontecer. É uma forma indireta de energia solar sendo convertida em energia química, através da fotossíntese, base dos processos biológicos de todos os seres vivos, e sua renovação na natureza ocorre através do ciclo do carbono. Sua utilização, desde que não seja de forma predatória, pouco altera a composição da atmosfera (QUIRINO, 1991). Uma das principais vantagens da biomassa é que, embora de eficiência reduzida, seu aproveitamento pode ser feito diretamente, por intermédio da combustão em fornos, caldeiras ou outros queimadores industriais. A escassez de fontes não renováveis e pressões de ambientalistas poderão acarretar maior aproveitamento energético da biomassa (NASCIMENTO, 2008). Das formas de se utilizar a biomassa florestal como fonte de energia, a compactação (através da briquetagem e da peletização) proporcionam muitas vantagens principalmente quanto ao armazenamento e transporte.

1.1 Justificativa para o trabalho

A geração de resíduos é uma característica intrínseca da cadeia produtiva florestal, constituindo-se em um grande passivo ambiental necessitando de gestão adequada desses resíduos, controle de possíveis fontes de contaminação de águas e solos e das emissões atmosféricas (NASCIMENTO, 2008). Dentro do contexto atual, em face das emissões de poluentes das fontes de combustíveis fósseis, das resoluções do Protocolo de Kyoto, do aquecimento global, das pressões ambientais por parte de entidades ambientalistas, de instituições de pesquisa e da própria sociedade, torna-se de fundamental importância o desenvolvimento de alternativas energéticas que atendam tanto ao suprimento de energia quanto ao desenvolvimento sustentável. Nesse sentido, o uso de produtos compactados e homogêneos tem sido uma das formas mais eficientes de se viabilizar economicamente a utilização desses resíduos (QUIRINO, 1991). Além disso, a eficiência ambiental (emite menos CO₂ do que os combustíveis fósseis) dos *pellets* pode ser um fator importante nas decisões empresariais ao compor sua matriz energética.

O desenvolvimento de pesquisas e tecnologias para a produção e uso deste biocombustível em nosso país pode contribuir para:

- a) mudar os padrões de produção tecnológicos atuais;
- b) induzir estudos, pesquisas e desenvolvimento na área de biomassa para energia;
- c) definir políticas de uso da biomassa florestal para a energia;
- d) incentivar o plantio de florestas para aproveitamento energético;
- e) agregar valor a resíduos e melhorar a eficiência da cadeia produtiva;
- f) valorizar o uso dos subprodutos da indústria madeireira para energia;
- g) reduzir a dependência de combustíveis fósseis na matriz energética de muitos países;
- h) fornecer oportunidades de postos de trabalho local ajudando o desenvolvimento regional.

Produzir conhecimento e desenvolver pesquisas sobre os *pellets* contribui para redesenhar a matriz energética do país, popularizar seu uso e, sobretudo, incentivar a

utilização dos recursos naturais como forma de se obter um mundo ecologicamente mais estável, visualmente mais atraente e socialmente mais justo para nós e para as futuras gerações.

1.2 Objetivos do trabalho

- Estudar a qualidade dos *pellets* produzidos no Brasil através da análise de suas propriedades físicas, químicas e térmicas.
- Analisar a eficiência térmica da combustão deste biocombustível comparado com fontes tradicionais de biomassa florestal em um queimador industrial de biomassa.
- Comparar os resultados obtidos com os limites de emissão estabelecidos pelas Normas Ambientais Nacionais do CONAMA.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A madeira é a principal matéria-prima para a produção dos *pellets* e a Suécia é o principal consumidor mundial. Neste país, a utilização deste biocombustível em sistemas de aquecimento residencial é subsidiada pelo governo que busca um combustível renovável para substituir o petróleo e seus derivados.

2.1 Os *pellets* de madeira

Os *pellets* de madeira (Figura 01) são pequenas pelotas cilíndricas de madeira, compactadas e densas. Devem ser produzidas com baixo teor de umidade (menor que 10%), permitindo elevada eficiência na combustão. Sua geometria regular e cilíndrica permite tanto a alimentação automática num sistema industrial quanto a alimentação manual, nos aquecedores residenciais, porque é um produto natural e, em sua maioria, não tem elementos tóxicos na sua composição. Sua principal aplicação é no aquecimento comercial ou residencial de ambientes, mas também pode ser utilizado como combustível para a geração de energia elétrica em plantas industriais ou, até mesmo, em usinas termoelétricas. A utilização dos *pellets* é favorável ao meio ambiente, pois é neutro em carbono, ou seja, todo CO₂ emitido na sua queima é recuperado no crescimento da árvore, e tem baixas emissões de gases do efeito estufa, além de ser derivado de resíduos de madeira que constituem um passivo ambiental quando deixado no campo (COUTO et al., 2008).



Figura 01: *Pellets* de madeira.

Nos países de língua inglesa são chamados de *wood pellets* indicando que são fabricados a partir da madeira, mas a compactação de vários resíduos em *pellets* como a casca de arroz, a casca do amendoim, a palha de milho, as gramíneas, o lixo urbano e a turfa são muito comuns na Europa e Estados Unidos (WIKIPÉDIA, 2010).

2.1.1 O surgimento dos *pellets* de madeira

A primeira vez que os *pellets* de madeira apareceram no cenário mundial foi para solucionar a crise do petróleo no final da década de 70 na América do Norte. A alta nos preços do combustível fóssil forçou a busca por um combustível alternativo para ser usado no aquecimento industrial e comercial (DOLZAN et al., 2006).

Na Europa, a indústria dos *pellets* surgiu na cidade de Mora na Suécia, onde a primeira indústria iniciou sua produção em novembro de 1982. Neste período, o governo investiu na descoberta de novas fontes de energia para substituir o petróleo e diminuir a dependência do país neste combustível fóssil. Mas a indústria de base florestal estava protegida por muitas leis que determinavam, por exemplo, somente o uso de cascas ou resíduos florestais para sua produção. Em 1986, quase todas as plantas de *pellets* da Suécia fecharam devido a fatores como o alto custo de produção (bem acima do que foi calculado no início), falta de tecnologia de produção, baixa qualidade do produto e, principalmente, uso de eletricidade gerada a partir de usinas nucleares. Com isso, somente uma indústria no sul do país sobreviveu graças a um contrato de longo prazo que mantinha com uma grande termoelétrica de Gotemburgo. Em 1988, uma nova indústria foi criada na cidade de Kil, com produção de três mil toneladas por ano, que ainda está em operação, sendo considerada uma das mais antigas daquele país (LJUNGBLOM, 2005).

Em 1992, o governo sueco iniciou uma forte taxaço de 59% sobre todos os combustíveis fósseis viabilizando, novamente, o aquecimento residencial e o uso dos *pellets*. A venda de fogões e sistemas de aquecimento aumentou surpreendentemente e a demanda pelo combustível também, possibilitando a entrada de novos produtores no

mercado. Conseqüentemente a produção anual saltou de cento e oitenta mil toneladas em 1995, para mais de um milhão em 2000. Este ponto marca a grande virada para o mercado dos *pellets* que cresceu muito rapidamente naquele país e em toda a Europa (BIOENERGY INTERNACIONAL, 2006).

A Suécia, em 2009, foi o maior produtor europeu de *pellets* com produção estimada em mais de 1,8 milhões de toneladas por ano. Sua rede de distribuição e logística utiliza caminhões tanques para pequenas distâncias e os navios cargueiros para viagens além mar. No entanto, mesmo com esse grande volume de produção, o país não produz o suficiente para seu consumo, necessitando importar (principalmente do Canadá e Estados Unidos) grandes quantidades para suprir sua demanda interna (NYSTRÖM, 2010).

Em 2004, havia em toda a Europa apenas 195 plantas industriais de *pellets* de madeira. Com o aquecimento do mercado, vem crescendo ano a ano, o número de novas indústrias, como pode ser observado na Figura 02, fechando 2010 com 594 empresas fabricantes deste biocombustível.

A busca por fontes renováveis de energia é uma tendência global que tem se fortalecido nos últimos anos de acordo com a Bioenergy Internacional (2006).

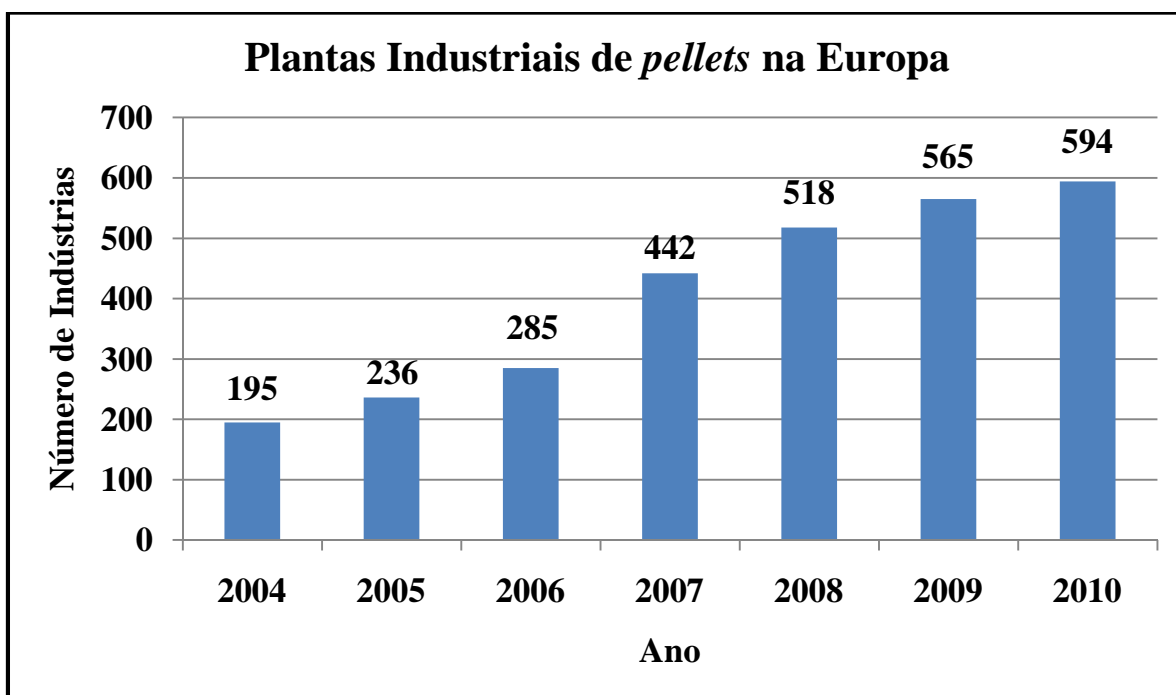


Figura 02: Evolução das plantas industriais de *pellets* na Europa.

Considerando todos os fatores que tornam viável a utilização dos *pellets* como fonte alternativa de energia (como a variação do preço do petróleo) as inovações tecnológicas dos equipamentos, baixas emissões de poluentes e até subsídios governamentais, podemos esperar que a história dos combustíveis de madeira compactada continue em crescimento, oferecendo oportunidades de negócios para o setor de base florestal.

2.1.2 A produção dos *pellets* de madeira

Os *pellets* de madeira geralmente são feitos com os resíduos da indústria madeireira tais como: a serragem, maravalhas, aparas, cavacos, galhos e resíduos agroindustriais. Essa matéria-prima é processada nas plantas industriais estacionárias e, com alta pressão e temperatura, são comprimidos no formato de pequenos cilindros de 6,0 a 10,0 mm de diâmetro. Todas as espécies de madeira podem ser peletizadas, mas nos Estados Unidos e no Canadá, as indústrias processam coníferas (softwoods ou madeira mole) que tem maior eficiência na produção do que as folhosas (hardwood ou madeiras duras), devido as suas propriedades físicas e maior teor de lignina (IEA, 2006). Basicamente, o processo de produção em uma indústria de *pellets* envolve as etapas mostradas na Figura 03:

Etapa 1: Matéria-prima

A produção de *pellets* de madeira começa com a geração da matéria-prima. Na maioria dos casos, este material é um subproduto do processamento da madeira nas indústrias. Para produção em larga escala as indústrias produzem sua própria matéria-prima reduzindo a árvore em partículas menores.

Etapa 2: Uniformização das partículas

Para obter melhor qualidade do produto na compactação é necessário que as partículas sejam uniformes. Este trabalho é realizado por um moinho industrial que padroniza as partículas de madeira em tamanhos menores que 3,0 mm.

Etapa 3: Secagem da matéria-prima

A matéria-prima para a fabricação dos *pellets* deve ter baixo teor de umidade para que tenha alto poder calorífico. Para a secagem uniforme deste material são utilizados secadores rotativos que conseguem teores abaixo de 10% (base seca). Um fluxograma do processo de produção completo dos *pellets* pode ser visto na Figura 03.

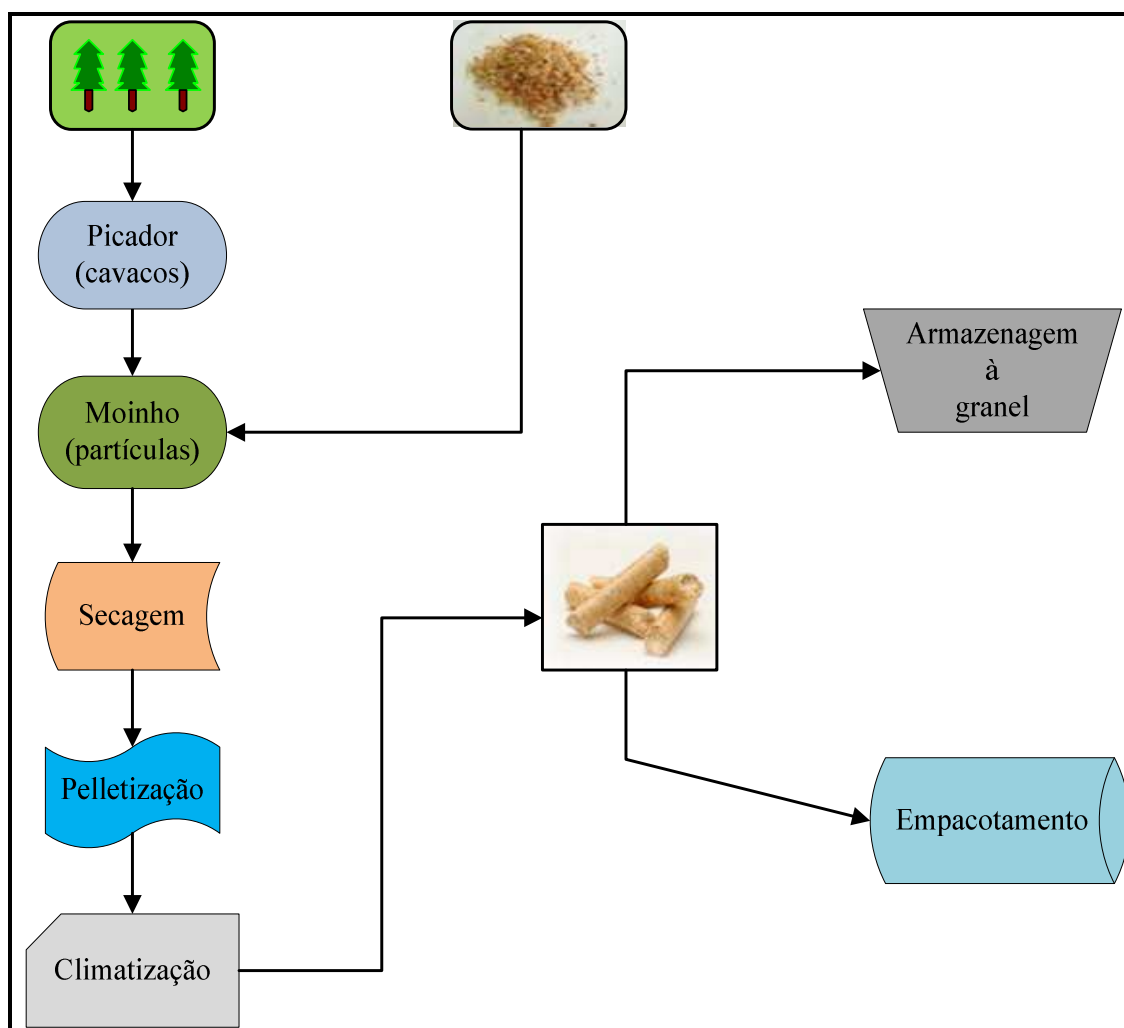


Figura 03: Fluxograma do processo produtivo dos *pellets*.

Etapa 4: A peletização

A compactação dos *pellets* ocorre através da “extrusão” da madeira através de uma matriz perfurada de aço ou peletizadora. A peletização da madeira emprega uma matriz com um denso arranjo de orifícios de 3,0 a 13,0 mm de diâmetro (Figura 04) que gira e a pressão interna dos cilindros força a passagem da madeira através desses orifícios com pressão em torno de 300 MPa e temperatura aproximada de 120°C (NIELSEN et al., 2009).

Etapa 5: Resfriamento do produto

Ao final da etapa de peletização, o combustível sai com uma temperatura em torno de 95°C. Há necessidade de algumas horas para o resfriamento e estabilização da lignina, (internamente), antes de ir para o empacotamento.

Estudos realizados por Pastre (2002) identificou alta concentração de fungos e bactérias na matéria-prima com teor de umidade acima de 23%, indicando que ela não deve ficar muito tempo no pátio de estocagem e os trabalhadores expostos a esta área devem usar máscaras de proteção. Na uniformização, a matéria-prima é picada úmida, para facilitar o processamento mecânico e diminuir a abrasão nas ferramentas, prolongando sua vida útil. Estudos realizados por Mani et al. (2006) mostraram relação entre tamanho uniforme das partículas com a qualidade dos *pellets*, mas Shaw (2008) relatou que são necessárias partículas finas e médias para uma melhor compactação do biocombustível.

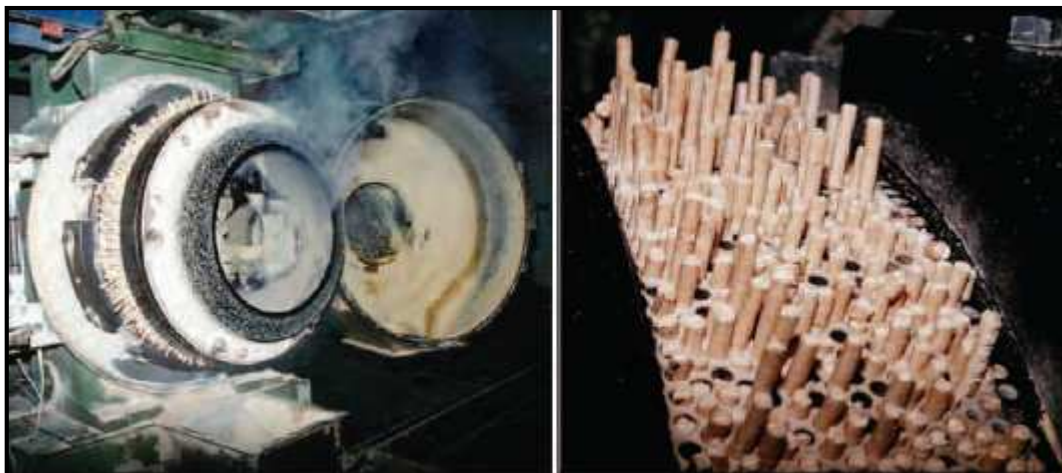


Figura 04: Matriz de aço perfurada para produção dos *pellets*.

A pressão exercida entre os componentes, segundo Lethikangas (2001), causa uma força de fricção que aquece e pressiona o material através de uma das perfurações da matriz. Em geral, nenhum aditivo é utilizado para a ligação entre partículas. A coesão, que ocorre internamente entre partículas, é causada pelo calor, gerado pela compressão, que amacia e reorganiza a lignina da madeira entre as fibras ligando-as naturalmente. Shaw (2008) observou que devido à taxa mais baixa de lignina nas folhosas e na casca, os aditivos, tais como o amido, podem ser utilizados para funcionarem como elemento ligante. O processo de resfriamento e acomodação é crítico para os *pellets* porque estão relacionados à resistência e durabilidade dos mesmos, que saem das extrusoras com temperatura em torno de 95°C e com elevada maciez. Portanto, é o ambiente que permite que a lignina se solidifique, reforçando as estruturas internas dos *pellets*. Depois desta etapa, o produto está pronto para ser utilizado. As embalagens são apresentadas em sacos de 5,0 kg, 10,0 kg, 20,0 kg (Figura 05), 50,0 kg; fardos industriais de 500,0 e 1000,0 kg ou até em caminhões tanques (Figura 06), assim como os combustíveis líquidos.



Figura 05: Embalagem padrão de 20 kg de *pellets*.

Os *pellets* são fáceis de armazenar e não se degradam ao longo do tempo devido a sua baixa umidade, ressaltaram Dolzan et al. (2006), porém, recomenda-se que o produto seja acondicionado em lugares secos para maior durabilidade do produto.



Figura 06: Transporte de *pellets* em caminhões tanques.

Para a exportação, o transporte de grandes quantidades é feito a granel através de grandes navios cargueiros. Atenção especial deve ser dada à durabilidade dos *pellets* que deve ter qualidade e durabilidade suficiente para evitar a formação de finos no compartimento do navio, que podem gerar explosão (HEINIMO; JUNGINGERB, 2009).

2.1.3 Normas e padrões de qualidade para os *pellets*

A normalização é utilizada cada vez mais como um meio para se alcançar a qualidade exigida pelo cliente, mantendo ou melhorando a qualidade dos produtos oferecidos. No Brasil, ainda não existe nenhuma norma para a padronização de combustíveis sólidos como os *pellets*. A ABNT já tem um grupo de pesquisadores trabalhando neste sentido.

O padrão sueco (Tabela 01) para os *pellets* de madeira foi estabelecido em 1999 (norma SS187120), classificando-os em três grupos de acordo com seus padrões de qualidade. Quando a expansão do mercado no setor doméstico ocorreu tornou-se necessário garantir a segurança operacional e baixas emissões dos aquecedores residenciais que utilizavam o biocombustível e os padrões surgiram para garantir que estas exigências fossem cumpridas (VIAK, 2000).

Tabela 01: Normas de padronização austríaca e sueca para os *pellets*.

Especificação	Unid.	Áustria		Suécia		
		ÖNORM M7135 madeira	casca	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
Diâmetro [Ø]	mm	4 a 20	20 a 120		4 ≤ Ø ≤ 10	
Comprimento	mm	máx. 100	máx. 400	4. Ø	5. Ø	6. Ø
Densidade a granel	kg/m ³	> 600		≥ 600	≥ 500	
Finos < 3mm	%	máx. 1		≤ 0,8	≤ 1,5	
Densidade real	kg/m ³	≥ 1,0				
Teor de umidade	%	≤ 12	≤ 18	≤ 10		≤ 12
Teor de cinzas	%	≤ 0,50	≤ 6,0	≤ 0,7	≤ 1,5	
PCI	MJ/kg	≥ 18		16,9	15,1	
Enxofre	%	≤ 0,04	≤ 0,08	≤ 0,08	indicar	
Cloro	%	≤ 0,02	≤ 0,04	≤ 0,03	indicar	
Aditivos	%	máx. 2 (natural)		Indicar na embalagem		
Durabilidade	%	≥ 95,0		≥ 95,0		

A legislação austríaca publicada em 2000 (ONORM M7135) reforça padrões de emissão para estufas residenciais e, um sistema de certificação dos *pellets*, assegura altos padrões de qualidade do combustível, exigindo o uso somente de matéria-prima

natural. Além disso, outras normas garantem a qualidade de toda a cadeia produtiva dos combustíveis como a norma ONORM M7136, que assegura o controle da qualidade durante o transporte, o armazenamento e a distribuição, e a ONORM M7137, que lista critérios de qualidade para os locais onde os *pellets* serão armazenados indicando temperatura ideal e umidade relativa do ar, por exemplo. As normas de qualidade dos *pellets* na Alemanha (DIN 51731) são muito rigorosas quanto a concentração de certos elementos químicos (Tabela 02) e estabelecem valores máximos para essas emissões. Elas dividem os *pellets* em classes de diâmetros e, desde 2002, criou-se um selo de qualidade para as empresas, o “*DIN Plus*”, que estabelece padrões de conformidade de todo o processo produtivo, bem como de transporte e armazenamento. Para receber este selo, a empresa deve ser vistoriada frequentemente e apresentar as análises realizadas no produto. A norma proíbe qualquer aditivo ou substância artificial como os plásticos, os adesivos, as tintas ou preservantes de madeira.

Tabela 02: Normas de padronização alemã e americana para os *pellets*.

Especificação	Unid.	Alemanha	EUA			
		DIN 51731 HP1 ²	SP ³	P ⁴	S ⁵	U ⁶
Diâmetro (Ø)	mm	$4 \leq \text{Ø} \leq 10$	6,35 a 7,25			
Comprimento	mm	$\leq 5 \cdot \text{Ø}$	$\leq 25,4$			
Densidade a granel	kg/m ³	> 600	640 a 736	608 a 736		
Finos < 3mm	%	máx. 1	$\leq 0,50$			
Densidade real	kg/m ³	$\geq 1,12$	-			
Teor de umidade	%	< 12	≤ 6	≤ 8	≤ 10	
Teor de cinzas	%	< 1,5	< 1	< 3		
PCI	MJ/kg	17,5 a 19,5	Especificar o teor			
Enxofre	%	< 0,04	Especificar o teor			
Cloro	%	< 0,02	< 0,3			
Aditivos	%	< 2 ⁷	Nenhum aditivo artificial			
Durabilidade	%	$\geq 95,0$	$\geq 97,5$	$\geq 95,0$		

¹ PFI=Pellets Fuel Institute

² HP1=Holz pellets

³ SP=Super Premium

⁴ P=Premium

⁵ S=Standard

⁶ U=Utilitário

⁷ < 2% de material para auxiliar a pressão.

Por outro lado, permite o uso de material para auxiliar a pressão, facilitar a compactação da madeira e diminuir o desgaste das ferramentas, desde que sejam naturais como os óleos vegetais.

Os Estados Unidos seguem normas não oficiais recomendadas pelo PFI que determinam padrões específicos para os combustíveis densificados desde 1995. Os próprios produtores têm que garantir a qualidade informando as principais características numa etiqueta junto ao produto.

A União Europeia através da CEN (Comitê Europeu de Normalização) estabeleceu, desde 1995, todas as formas e propriedades relevantes dos combustíveis sólidos que incluem as informações normativas para as análises, as formas, as classes, as propriedades, as características físicas e químicas que devem ser fornecidas. A norma CEN/TS 14961 de 2005 regulamenta os padrões de qualidade exigidos para os *pellets* de madeira que são semelhantes à norma alemã.

No Reino Unido não há uma norma oficial publicada para o estabelecimento de padrões de qualidade para os *pellets*. Os produtores seguem um código de boas práticas que especifica dois tipos de combustível: Premium e Standard. O primeiro, para uso no aquecimento residencial com baixo teor de cinzas; e o segundo, para uso comercial e industrial. Seguir o código é voluntário, mas todos os produtores são estimulados a cumprir com as recomendações que têm como base o Comitê Europeu de Normalização.

De acordo com Hahn (2004) há, basicamente, dois critérios para se julgar a qualidade dos *pellets*: a composição química e as características físicas. A seguir, alguns parâmetros comuns utilizados para esta previsão, bem como os efeitos na combustão, transporte e logística, de acordo com esta classificação do autor:

a) Composição química e suas implicações

Nesta classificação são priorizados critérios como a concentração de certos elementos químicos e sua influência na qualidade dos *pellets*.

- Teor de voláteis - este parâmetro está relacionado com o comportamento do combustível na decomposição térmica.

- Poder calorífico - este parâmetro está relacionado com a utilização do combustível e o *layout* da planta industrial.
- Teor de cloro (Cl) - este elemento é altamente nocivo ao meio ambiente, formando HCl além de causar corrosões nos queimadores.
- Teor de nitrogênio (N) - o perigo deste elemento está na formação e emissão de NO_x, HCN e N₂O.
- Teor de enxofre (S) - cuidado com a quantidade de emissões de SO_x que é um gás nocivo à saúde humana.
- Teor de sódio (Na) - corrosão, baixa temperatura de fusão das cinzas.
- Teor de potássio (K) - altas concentrações podem causar corrosão nos queimadores.
- Teores de magnésio (Mg), cálcio (Ca) e fósforo (P) - altos teores elevam a quantidade de cinzas residuais sendo necessárias limpezas constantes nos queimadores.
- Teor de cinzas - grandes quantidades inviabilizam o sistema, pois geram resíduos que aumentam a necessidade de manutenção e, conseqüentemente, elevam os custos do combustível.

b) Características físicas

Nesta classificação são descritos os parâmetros visuais do produto e suas características físicas.

- Teor de umidade - altos teores de umidade causam baixo poder calorífico, perdas de energia, baixa ignição, baixa durabilidade e menor tempo de estocagem.
- Densidade a granel - esta característica relaciona-se com manuseio e estocagem, transporte e plano logístico.
- Dimensões físicas, forma e distribuição das partículas - estes parâmetros afetam a pureza do combustível, segurança dos processos e secagem do produto interferem na formação de poeira no transporte e nas ligações intramoleculares.
- Quantidade de finos - afetam a densidade do produto, o transporte e em altas quantidades geram poeira que podem causar explosão no transporte.
- Resistência à abrasão - afeta a qualidade do produto e a geração de finos.

- Durabilidade mecânica - afeta a qualidade do combustível pós-transporte.

Durante o processamento mecânico são as características físicas do combustível as mais afetadas. Mudanças adicionais na composição química são improváveis devido à rigidez de normas europeias que proíbem o uso de aditivos químicos na produção do biocombustível. Viak (2000) defendeu que devem haver padrões de qualidade para dois grupos de *pellets*:

→ *Pellets* para uso em pequena escala - qualidade superior, com baixa quantidade de finos e de cinzas e comprimento uniforme para não causar problemas técnicos nas estufas residenciais.

→ *Pellets* para uso em larga escala – a quantidade de finos, de cinzas e o comprimento são de pouca importância, porque robustos sistemas industriais conseguem superar essas limitações.

Stahl et al. (2004), estudando problemas gerados pelo excesso de finos em aquecedores residenciais na Suécia, concluíram que os atuais padrões de qualidade estabelecidos naquele país não são suficientes para garantir a qualidade para os consumidores. Eles sugerem mudanças nos padrões atuais e indicam, como ideal, que os padrões sejam expressos em intervalos, ou seja, como é feito pela norma atual do Comitê Europeu de Normalização e Especificação Técnica CEN/TS 14961 estabelecido em 2005.

O alinhamento dos padrões e dos métodos apropriados para os testes dos *pellets* são necessários para todos os países com o intuito de facilitar os processos e procedimentos de exportação. A padronização da quantidade de finos, a durabilidade e a resistência mecânica são as principais questões que devem ser resolvidas para facilitar o livre comércio nestes países. Um resumo das principais normas e padrões estabelecidos por elas são apresentados nas Tabelas 01 e 02.

Os *pellets* devem ter alta durabilidade mecânica porque não podem produzir pó durante o transporte ou na estocagem. Lethikangas (2001) demonstrou que o aumento na resistência à abrasão e a redução do desgaste dos equipamentos, na produção do combustível, podem ser alcançadas através das seguintes ações:

- Adição de agentes ligantes naturais como o amido de milho ou batata, melado (resíduo da indústria sucroalcooleira), óleo vegetal e lignina sulfonada (resíduo

da indústria de celulose e papel). Alakangas et al. (2007) acrescentaram que o uso de aditivos deve ser analisado com cuidado, pois a lignina sulfonada, por exemplo, aumenta o teor de enxofre causando emissões de gases indesejáveis.

- Condicionamento da matéria-prima, que pode ser feito acrescentando vapor superaquecido antes do processo de peletização para que a matéria-prima obtenha a maleabilidade necessária para ativar a própria lignina como agente ligante.

- Variação do processo de fabricação, utilizando maior tempo de pressão, elevando a pressão ou temperatura para tornar a lignina mais viscosa, o que facilitaria sua reorganização na madeira.

- Agentes sintéticos como alguns plásticos são possíveis de serem usados como ligantes, mas alteraria os valores de poder calorífico e teor de cinzas, além disso, prejudicaria a imagem de biocombustível e de produto “amigo da natureza” que está relacionado aos *pellets* de madeira.

Não há um consenso sobre a utilização destes ligantes. Nos Estados Unidos e na Itália, para *pellets* de alto padrão de qualidade, ele não é permitido no produto, já na Suécia, a quantidade deste elemento deve ser informada na embalagem do produto. Estudos realizados na Suécia por Viak (2000) mostraram que os produtores daquele país adicionam de 0,5 a 2,0 % de amido de batata nos *pellets* de madeira e acrescentaram que o uso deste ligante é mais comum para a peletização com capim elefante (*Pennisetum purpureum*), resíduos da agricultura (casca de arroz, por exemplo) e casca de pinus, devido à pequena quantidade ou ausência de lignina natural nestes subprodutos. Além de aumentar a dureza dos *pellets*, alguns aditivos são acrescentados com o objetivo de melhorar alguma característica química como, por exemplo, a formação de escória (massa formada por elementos minerais) na combustão, que pode ser otimizada usando óxido de cálcio ou de magnésio. Pastre (2002) pontuou que há um entendimento de que estes agentes ligantes não devem dificultar a combustão, desenvolver mau cheiro e nem gases venenosos durante a queima do combustível.

2.2 A utilização da biomassa no Brasil e no mundo

A Biomassa vegetal é uma das principais fontes de energia utilizadas aqui no Brasil. Em 2009, a lenha e os subprodutos da cana-de-açúcar, representaram 32% de toda produção de energia primária no país (Tabela 3) segundo o BEN - Balanço Energético Nacional (BRASIL, 2009). É notável a vantagem do Brasil quanto a presença de fontes renováveis na matriz energética com 47,2% de participação (2009), contra 7,2% na OECD⁸ (2007) e 12,7% no mundo (2007). No Brasil, os combustíveis fósseis respondem por 51,5% da matriz energética enquanto que no mundo esse valor é de 81,4%. No comparativo de 1973 com 2009, o Brasil reduziu o consumo de petróleo em mais de 8%, aumentou significativamente a oferta de energia hidráulica e eletricidade. Há uma tendência mundial de substituição do petróleo e seus derivados por outras fontes de energia como o etanol e biomassa (Brasil); Urânio, Gás natural e Biomassa vegetal (OECD) e Urânio e Gás natural (Mundo).

Tabela 03: Oferta interna de energia no mundo em % tep⁹.

ESPECIFICAÇÃO	BRASIL		OECD		MUNDO	
	1973	2009	1973	2007	1973	2007
Petróleo e Derivados	45,6	37,9	52,5	37,3	46,1	34,0
Gás Natural	0,4	8,8	19,0	23,7	16,0	20,9
Carvão Mineral	3,1	4,8	22,6	20,9	24,5	26,5
Urânio	0,0	1,4	1,3	10,9	0,9	5,9
Hidráulica e Eletricidade	6,1	15,2	2,1	2,0	1,8	2,2
Biomassa/Eólica e Outras	44,8	32,0	2,5	5,2	10,7	10,5
TOTAL (%)	100	100	100	100	100	100
TOTAL - milhões tep	82	244	3.724	5.433	6.115	12.029

Fonte: Brasil, 2009.

⁸ OECD: São os seguintes os 30 países membros da Organisation de Coopération et de Développement Économiques: Alemanha, Austrália, Áustria, Bélgica, Canadá, Coréia do Sul, Dinamarca, Espanha, Estados Unidos, Finlândia, França, Grécia, Holanda, Hungria, Irlanda, Islândia, Itália, Japão, Luxemburgo, México, Noruega, Nova Zelândia, Polónia, Portugal, Reino Unido, República Eslovaca, República Tcheca, Suíça, Suécia e Turquia. Além desses países, também integra a OCDE a União Européia.

⁹ 1 tep (Tonelada Equivalente de Petróleo) = 41,868 GJ

A facilidade de obtenção da madeira aliadas à possibilidade de produzir carvão vegetal com tecnologia rudimentar caracterizou a Biomassa florestal como uma fonte de uso doméstico rural e não comercial. De acordo com dados do IEA (*International Energy Agency*) de 2006, cerca de 80% da energia da biomassa florestal utilizada no mundo é destinado ao uso em residências, 18% é consumido pelas indústrias e o restante utilizado no setor de transportes.

Forsberg (2000) argumentou que a biomassa para a conversão de energia é concebida como um dos recursos renováveis mais importantes no futuro dos sistemas de energia porque está disponível em base renovável, por meio de processos naturais ou como subproduto das atividades humanas. Entre os resíduos de biomassa, normalmente utilizados para a geração de energia no Brasil, os mais importantes são os resíduos de madeira e o bagaço de cana-de-açúcar: o primeiro, gerado ao longo de todo o processo de industrialização, compreendendo desde o corte de árvores nas florestas até a manufatura de produtos derivados; o segundo tem seu aproveitamento facilitado pela centralização dos processos nas usinas e são utilizados em sistemas de cogeração, que fornecem calor útil e energia elétrica, para a própria indústria.

A evolução do consumo final de biomassa no Brasil quando desagregada por fonte, é apresentada na Tabela 04. Em 1977, mais da metade era utilizada no setor residencial principalmente na forma de lenha. Esta participação foi, paulatinamente, perdendo espaço em razão da substituição da lenha por gás liquefeito de petróleo (GLP). O setor agropecuário e as atividades rurais artesanais, intensivas no uso de lenha, perdem espaço para o processo de industrialização de produtos e de urbanização (BRASIL, 2009). A partir de 1979, com o aumento internacional dos preços de petróleo, o governo brasileiro adotou medidas de contenção do consumo de derivados de petróleo e de fomento a fontes alternativas, como o álcool, carvão mineral e outras biomassas. Nota-se então o forte acréscimo dos produtos da cana, uma paralisação na tendência de queda da lenha e moderados crescimentos na participação do carvão mineral e hidráulica.

O Brasil é líder mundial na utilização da biomassa no setor industrial com cerca de 40% de todo o consumo do setor, enquanto que em outros países do mundo este consumo é no máximo de 8%. Considerando só as fontes renováveis (biomassa e

eletricidade), mais de 60% da energia utilizada pelas indústrias brasileiras são de fontes ambientalmente corretas e sustentáveis. Os setores industriais que mais utilizam a biomassa são as indústrias dos setores de alimentos e bebidas (que utilizam casca de arroz, coco do babaçu e resíduos florestais), papel e celulose (que utilizam o licor negro¹⁰) e siderurgia (com o uso do carvão vegetal), segundo dados do Balanço Energético Nacional de 2009.

Tabela 04: Composição setorial do consumo final energético de biomassa¹¹.

IDENTIFICAÇÃO	1977	1987	1997	2007
CONSUMO FINAL (mil tep)	33.385	45.700	43.265	62.517
SETOR ENERGÉTICO (%)	1,7	16,0	19,9	16,9
RESIDENCIAL (%)	52,0	24,0	14,9	13,3
COMERCIAL E PÚBLICO (%)	0,7	0,5	0,4	0,2
AGROPECUÁRIO (%)	11,4	5,7	4,3	3,8
TRANSPORTES (%)	1,0	12,4	16,0	13,8
INDUSTRIAL (%)	33,2	41,4	44,6	51,9
Cimento	0,0	1,2	0,7	0,4
Ferro-gusa e Aço	6,3	9,3	7,5	7,6
Ferro-ligas	0,4	1,0	1,0	1,1
Mineração	0,0	0,1	0,0	0,0
Não-Ferrosos	0,1	0,4	0,1	0,0
Química	0,3	0,9	0,3	0,1
Alimentos e Bebidas	18,9	16,8	22,7	28,8
Têxtil	0,2	0,5	0,2	0,2
Papel e Celulose	1,7	4,5	7,0	9,4
Cerâmica	3,9	4,4	3,8	3,1
Outros	1,4	2,0	1,4	1,2
TOTAL	100,0	100,0	100,0	100,0

Fonte: Brasil, 2009.

A versatilidade e a disponibilidade da biomassa aliadas à sua característica de energia renovável e que não contribuem para o aquecimento global, são fortes argumentos para potencializar o seu uso no mundo todo. Por outro lado, a heterogeneidade, a umidade variável, o baixo poder calorífico (baixa densidade) e o

¹⁰ Na indústria papeleira, o Licor negro ou Lixívia negra é um fluido processual produzido no digestor que é responsável pelo cozimento da madeira para retirar componentes indesejáveis ao processo de fabricação do papel, tais como lignina, extrativos e cinzas.

¹¹Inclui bagaço de cana, lenha, outras fontes primárias renováveis, carvão vegetal e álcool.

alto custo dos transportes são desafios limitantes que devem ser superados, com novas tecnologias e novos produtos, para popularizá-la como fonte limpa de energia (LIMA, 1998).

2.3 Tecnologias para conversão da biomassa

A energia da biomassa vegetal, em especial a madeira, é de grande importância tanto em países desenvolvidos como a Suécia, Áustria, Finlândia e Estados Unidos (que utilizam modernas tecnologias com eficiência de até 80%) como em países subdesenvolvidos como Burundi, Etiópia, Moçambique, Nepal, Ruanda, Sudão, Tanzânia, Uganda (eficiência máxima de 20%), sendo que quase noventa por cento da energia vem desta fonte (SIMÕES, 2000). Com as demandas atuais por energia renovável, cresce o desenvolvimento de novas formas de se utilizar a biomassa florestal e o seu aproveitamento pode ser feito por meio da combustão direta, processos termoquímicos (gaseificação, pirólise, liquefação), processos biológicos (fermentação) ou através de processamento mecânico transformando os resíduos florestais em *pellets* de madeira. A Figura 07 apresenta os principais processos de conversão da Biomassa florestal em energéticos.

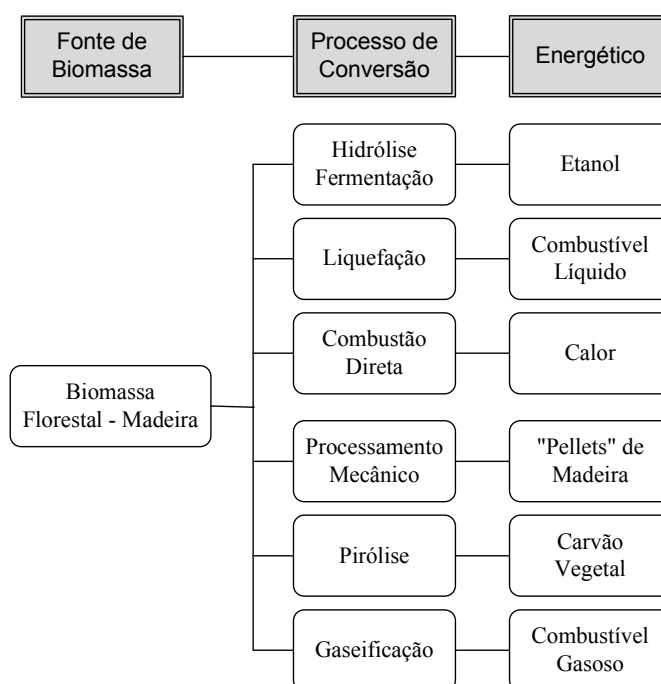


Figura 07: Diagrama dos processos de conversão da biomassa florestal.

No Brasil, estudos realizados por Quirino (1991) apontaram enormes quantidades de resíduos de biomassa (mais de 245 milhões de toneladas) produzidos anualmente, que podem ser reaproveitados para conversão em outras formas de energia especialmente nos processos mecânicos como na peletização. Uma análise da produção global de resíduos da indústria madeireira, realizados por Dolzan et al. (2006), mostraram o Brasil como um dos cinco países (ao lado dos Estados Unidos, Canadá, China e Rússia) com grande potencial de crescimento na produção de biocombustível a partir dos subprodutos gerados nessas empresas de base florestal.

2.4 A formação da biomassa florestal

De acordo com Richardson et al. (2002), a produção da biomassa ocorre através do processo da fotossíntese que converte o CO₂ da atmosfera e a água do solo em monossacarídeos (que a planta utilizará como energia) liberando oxigênio para a atmosfera. A biomassa lignocelulósica é composta de três elementos principais: o carbono (C), o hidrogênio (H), o oxigênio (O), além de pequenas quantidades de nitrogênio (N) e alguns elementos minerais. Os monossacarídeos são transformados em celulose, hemiceluloses e lignina.

Segundo esse mesmo autor, a celulose é o material orgânico mais abundante na Terra, tem cadeia longa, não ramificada constituída por unidades β -D-glicose, celubiose e com ligações glicosídicas β 1-4, que se juntam para formar longas cadeias de moléculas ou polímeros.

As hemiceluloses são polissacarídeos de composição variável, incluindo monossacarídeos de cinco e seis átomos de carbono. A sua estrutura molecular é muito semelhante à da celulose, no entanto, é mais curta e apresenta mais ramificações. A lignina é um polímero irregular, ramificado de unidades de fenilpropano unidas por ligações carbono-carbono e ligações etílicas (JENKINS et al., 1996). Ao contrário dos constituintes de maior tamanho citados anteriormente, a madeira contém ainda

componentes estranhos, que não são estruturais, que podem ser orgânicos ou inorgânicos (FPL, 1999):

- Os componentes orgânicos são os extrativos, que contribuem para propriedades da madeira como a cor, o odor, o gosto, a resistência à deterioração, a densidade, a higroscopicidade e a inflamabilidade (muito importante na utilização da madeira para energia). São compostos de taninos, óleos essenciais, gorduras, resinas, ceras entre outros. Estes componentes são chamados de extrativos porque podem ser removidos da madeira pela extração em solventes como a água, o álcool, a acetona, o benzeno ou o éter.

- Os componentes inorgânicos contribuem com a formação de cinzas residuais no processo de combustão. São compostos basicamente de cálcio (Ca), potássio (K), magnésio (Mg) e, em menores quantidades (> 100 ppm), fósforo (P), sódio (Na), ferro (Fe), silício (Si), manganês (Mn), cobre (Cu) e zinco (Zn).

A quantificação da biomassa é uma tarefa muito difícil, devido à sua heterogeneidade, complicando a comparação de dados. Além disso, ela integra a economia informal e, na maior parte dos casos, não entra nas estatísticas oficiais dos seus países. Com o intuito de padronizar medidas e colocá-las em bases que possam ser comparadas com combustíveis fósseis, ela é classificada em três grupos principais (FAO, 2008):

1. Combustíveis de madeira;
2. Combustíveis da agricultura;
3. Combustíveis do lixo urbano.

Da mesma forma, a biomassa pode ser classificada como bioenergia tradicional (madeira, carvão, resíduos de madeira) e bioenergia moderna (resíduos industriais de madeira, florestas específicas para energia, bagaço de cana-de-açúcar).

O uso tradicional da biomassa, na forma bruta, é bastante ineficiente gerando desperdício de energia útil e, frequentemente, está associado a significantes impactos negativos ao meio ambiente. As aplicações modernas estão rapidamente substituindo o uso tradicional, sobretudo em países industrializados, e exigem capital, conhecimento, tecnologia, estrutura do mercado e um determinado nível de desenvolvimento, que

estão faltando na maioria das áreas rurais dos países em desenvolvimento segundo Rosillo-Calle et al. (2007).

Algumas das características que fazem da biomassa lignocelulósica um bom combustível são:

- o alto poder calorífico;
- a baixa temperatura de ignição;
- o elevado teor de voláteis;
- a elevada taxa de combustão;
- a baixa energia de ativação.

Estas propriedades são influenciadas tanto pelas características físicas (tipo da biomassa, dimensões das partículas) e químicas (poder calorífico superior e inferior, teor de voláteis) do combustível como pelas características dos queimadores ou das fornalhas. Por outro lado, certas características como o teor de umidade, granulometria, densidade e heterogeneidade limitam a eficiência da combustão (KANURY, 1994). Outro aspecto importante mostrado por Dias (2002) é o fato de ser praticamente impossível obter uma mistura completamente homogênea entre o combustível e o comburente, sobretudo quando considerado o curto espaço de tempo em que ocorre a mistura entre eles.

2.4.1 Teor de umidade e o poder calorífico

Segundo Jara (1989), o poder calorífico superior da biomassa lignocelulósica recebe influência, além da umidade, da constituição química, principalmente a lignina e os extrativos. Desta maneira, são as coníferas que apresentam um maior conteúdo de resina e lignina do que as folhosas, conseqüentemente, um maior poder calorífico superior (PCS), que varia também conforme a parte da árvore que esteja em combustão (casca, nós, ramos, madeira do toco). Quando está úmida, parte da energia liberada na combustão é usada para a

vaporização da água. Desta forma, quanto mais seca a matéria-prima, mais energia estará disponível para o aquecimento. Consequentemente, para conhecer a massa verdadeira da biomassa é necessário calcular o seu teor de umidade. Isto pode ser medido de duas maneiras: em uma base seca (Equação 01) ou em uma base úmida (Equação 02). Estas medidas são calculadas como segue:

- Base seca

$$\text{Teor de umidade (\%)} = \frac{\text{massa úmida} - \text{massa seca}}{\text{massa seca}} \times 100 \quad (01)$$

- Base úmida

$$\text{Teor de umidade (\%)} = \frac{\text{massa úmida} - \text{massa seca}}{\text{massa úmida}} \times 100 \quad (02)$$

O poder calorífico de um combustível é definido como a quantidade de calor desprendido na sua queima completa, estequiometricamente. Se esta quantidade de calor for medida com água (gerada na queima) na fase gasosa, o poder calorífico é chamado de poder calorífico inferior (PCI) e se na fase líquida, tem-se o PCS. No meio industrial é mais comum utilizar o PCI, uma vez que, na maioria dos processos industriais, os gases de combustão são liberados a altas temperaturas e a água neles contida se encontra na fase gasosa (GARCIA, 2002). A Figura 08 evidencia essa diferença entre PCI e PCS para a biomassa florestal.

Numa madeira recém-abatida com um teor de umidade típico de 50% (base seca), o PCI por quilograma de massa seca é de 15-20% mais baixo do que o PCS, como mostrado na região I (Figura 08). Os cálculos, feitos em uma base úmida, mostram, naturalmente, valores consideravelmente mais baixos (região II).

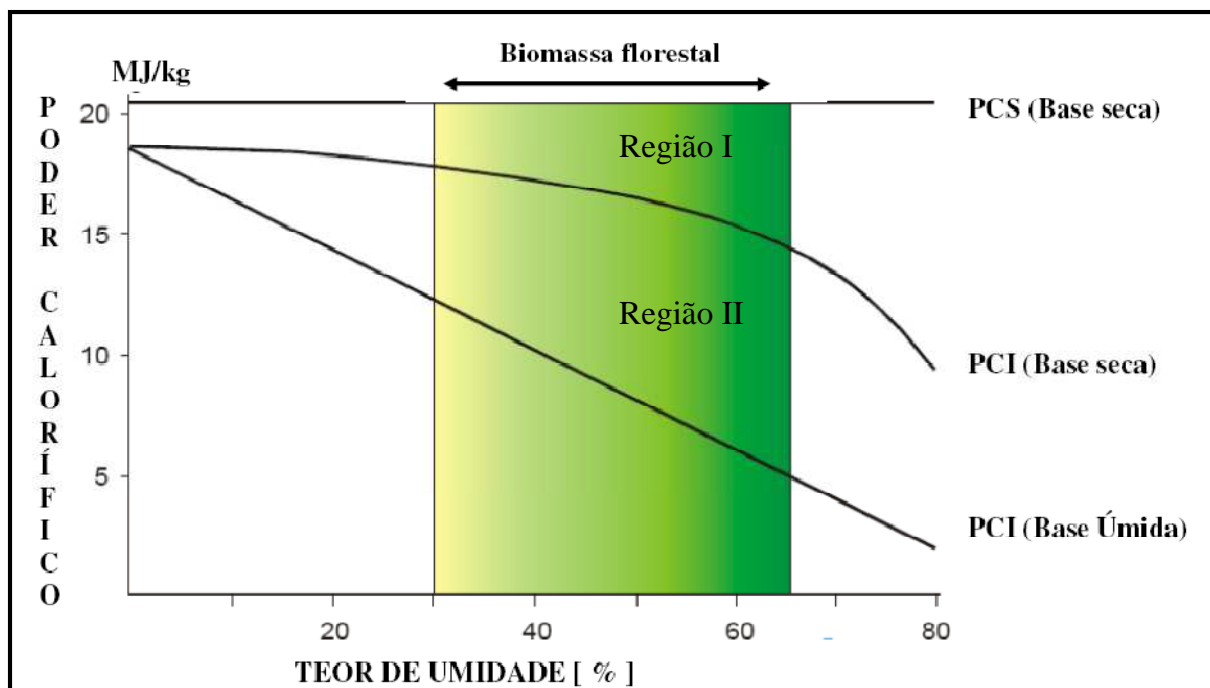


Figura 08: O PC da biomassa florestal em função da umidade (ALAKANGAS, 2007).

A diferença entre eles é, portanto, exatamente a entalpia de vaporização da água formada pela queima do hidrogênio contido no combustível e da água já contida no combustível como umidade do mesmo (ALAKANGAS, 2007). A Tabela 05 mostra alguns resultados de PCI, obtidos com diferentes teores de umidade.

Tabela 05: A Influência da umidade no PCI.

Combustível	PCI [TU 0%] (kJ/kg)	Teor de Umidade (%)	PCI com Umidade (kJ/kg)
Serragem	19,0	50,0	7,8
Casca de coníferas	18,6	50,0	7,4
<i>Pellets</i> de madeira	19,8	8,0	19,0
Bagaço cana-de-açúcar	19,0	50,0	7,5

Fonte: Alakangas (2007).

Estudos realizados por Quirino (1991) demonstrou que as chamas são inibidas com teor de umidade acima de 70% (base seca).

2.4.2 Teor de cinzas da biomassa florestal

O teor de cinzas da biomassa florestal representa a porcentagem de componentes minerais contidos no material através da agregação ao longo da vida do vegetal, ou por contaminação durante os processos de colheita, transporte e manuseio. Na combustão direta, os reagentes inorgânicos como o Na, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu e SiO₂ formam, como resíduo, as cinzas (BRAND, 2007).

As cinzas são componentes indesejáveis nos processos industriais e, principalmente, no uso doméstico da biomassa (aquecimento residencial) porque quanto mais alto o teor de cinzas do material, menor o poder calorífico do combustível, conseqüentemente, há maior quantidade de resíduos para ser removido no final da combustão. Além disso, o contato deste resíduo com partes metálicas favorecem o aparecimento da corrosão diminuindo a vida útil do equipamento (RICHARDSON, et al., 2002). A Tabela 06 mostra o percentual de cada elemento em algumas espécies e o percentual total de cinzas.

Tabela 06: Teores médios de elementos minerais por espécie (em ppm).

Elementos	<i>Acácia mearnsii</i>	<i>Eucalyptus dunnii</i>	<i>Eucalyptus globulus</i>	<i>Eucalyptus grandis</i>	<i>Eucalyptus saligna</i>
K	860	1.020	1.363	823	704
Ca	849	955	652	541	519
Mg	261	606	243	182	192
Na	361	264	112	243	458
Al	70	96	36	53	154
Mn	8,9	63,0	45,1	16,6	15,0
Si	7,2	12,3	14,5	13,0	25,0
Fe	2,27	3,56	2,61	3,52	5,33
Cu	1,31	1,07	1,73	1,11	1,43
Ni	0,06	0,23	0,38	0,12	0,27
Cinzas (%)	0,24	0,30	0,25	0,19	0,21

Fonte: Fredo et al. (1999).

Em termos de teores de cinzas, ou seja, dos minerais totais presentes na madeira em suas mais diferentes formas, a espécie *Eucalyptus dunnii* foi a mais expressiva.

Assim como na biomassa para energia, essa característica é indesejável nas fábricas de celulose e papel devido ao elevado custo para a sua retirada do processo (FREDDO et al., 1999). A biomassa florestal tem valores muito baixos de cinzas (Tabela 07) quando comparado ao carvão mineral aqui do Brasil (GARCIA, 2002).

Tabela 07: Teor médio de cinzas de alguns combustíveis.

Combustível	Teor de Cinzas (%) (base seca)
Carvão mineral	40,00
Carvão vegetal	4,00
Bagaço da cana-de-açúcar	1,50
Madeira seca	0,80

Fonte: Garcia (2002).

Esta vantagem, aliada à característica de energia renovável dos produtos Lignocelulósicos, é um dos argumentos usados para potencializar, ainda mais, o seu uso como fonte de energia renovável e sustentável.

2.4.3 Densidade e volume da biomassa florestal

A indústria florestal tradicionalmente mede a madeira pelo seu volume (m^3), porque, para o uso na construção civil, por exemplo, ela tem dimensões padronizadas e uniformes. No entanto, devido à heterogeneidade dos combustíveis oriundos da biomassa (cavacos, maravalhas, serragens, galhos, folhas...), estes devem ser medidos por massa porque o poder calorífico, ou uma quantidade de calor que possa ser fornecida, devem sempre ser referidos em uma base de peso (kJ/kg) e, devido aos espaços vazios característicos do material, o volume não é um método de medida preciso. A densidade básica (kg/m^3), que considera a massa seca e o volume saturado da amostra, não pode ser utilizada para os *pellets* de madeira porque para obter o volume saturado (imersão em água do produto até sua saturação), dado o seu baixo teor de umidade, eles absorveriam muito rapidamente a água, se desmanchariam por completo e perderiam suas características iniciais.

Por outro lado, a literatura apresenta outras formas de se medir a densidade ou massa específica ($d = m/v$) de materiais lignocelulósicos dado a sua heterogeneidade, como por exemplo:

- A densidade aparente (kg/m^3), que leva em consideração o volume da partícula sólida, o volume dos seus poros vazios e a influência do teor de umidade do material, que sempre deve ser informada.
- A densidade a granel (kg/m^3), que é o método mais utilizado para medir a densidade de materiais irregulares e de formatos diversos porque considera o volume total da amostra que inclui o volume do sólido, a porosidade das partículas e os espaços vazios entre uma partícula e outra (WIKIPÉDIA, 2010).

É importante saber o estado físico (tipos e dimensões) da biomassa para a densidade que está sendo medida. Por exemplo, madeira empilhada, *pellets* de madeira a granel, folhas, galhos entre outros. Algumas técnicas são usadas para a densificação da biomassa, como os briquetes e os *pellets*, com o propósito de reduzir custos de transporte, facilitar o manuseio do combustível e diminuir a área para estocagem.

2.4.4 A biomassa florestal densificada

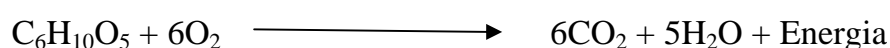
De acordo com Wherther et al. (2000), a densificação da biomassa é um processo que inclui várias etapas: coleta, transporte, estocagem, tratamento, uniformização (tritador), secagem, compactação e empacotamento. A briquetagem e a peletização são as técnicas mais utilizadas para a densificação da biomassa e exigem equipamentos robustos. Para Dias (2002), a biomassa densificada na forma de briquetes é mais comum nos países em desenvolvimento, substituindo (em alguns casos) a lenha na fabricação do carvão vegetal. Já a utilização dos *pellets* está mais difundida nos países desenvolvidos por serem mais indicados para equipamentos residenciais com alimentação automatizada e também porque não podem conter aditivos químicos, pois precisam de alto padrão de qualidade e baixos níveis de emissões de poluentes.

Obernberger e Thek (2002) consideraram que o alto padrão exigido na utilização em pequenos equipamentos residenciais não são aplicáveis para equipamentos industriais, uma vez que estes se encontram equipados com sistemas mais sofisticados de controle da combustão e tratamentos das emissões gasosas do que aqueles. Wherther et al. (2000) concluíram que o problema básico, frequentemente encontrado no uso da biomassa densificada como combustível, são os altos custos do processamento mecânico da densificação. Além disso, os estudos de Nielsen et al. (2009), por exemplo, mostraram que há necessidade de mais energia para peletizar folhosas do que coníferas. Eles concluíram que os extrativos atuam como lubrificante, diminuindo, desse modo, as exigências de energia para o processo de peletização. A maior parte desta energia é direcionada para forçar e comprimir o material da superfície até o final do canal cilíndrico da matriz perfurada na compactação.

Larsson et al. (2007), produzindo *pellets* com uma peletizadora em escala de laboratório (25 kg/h), concluíram ser muito difícil obter produção estável somente com folhosas devido a dureza do material e a influência do tamanho das partículas. Uma mistura de 60% de coníferas e 40% de folhosas foi utilizada com sucesso. Os autores encontraram, ainda, forte relação entre a qualidade dos *pellets* (durabilidade e densidade) com o tipo de matéria-prima e seu teor de umidade. O teor de umidade ótimo para a característica durabilidade é diferente daquela que melhora a densidade. O autor pontuou então, que a qualidade superior dos *pellets* exige rigorosos ajustes nos equipamentos e controle minucioso de todas as variáveis do processo.

2.4.5 A combustão da biomassa florestal

Usando a macromolécula da celulose, que é o principal componente da madeira, a combustão completa deste material lignocelulósico pode ser representado como segue (FPL, 1999):



As características que afetam a combustão da biomassa podem ser divididas em dois tipos principais segundo Kanury (1994):

- Termoquímicas: entre as características mais importantes encontram-se a entalpia da reação de combustão, a temperatura de combustão, a energia de ativação e o teor de cinzas. Estas características são influenciadas pelas propriedades dos combustíveis (análise elementar, teor de umidade, minerais, etc.) e da instalação do equipamento de queima;

- Taxa de combustão: esta afeta o processo de combustão, tanto no interior da partícula como na sua superfície. Certas propriedades, tais como o tamanho da partícula, a condutividade térmica, a densidade, o calor específico e a porosidade são propriedades físicas que interferem nos processos internos da combustão. Por outro lado, as propriedades que afetam os processos na superfície estão essencialmente relacionadas com a transferência de calor do ambiente externo para a partícula, com a circulação do ar e com a transferência de massa. Algumas das características que fazem da biomassa um bom combustível são elencadas por diversos autores (KANURY, 1994; TABARÉS et al., 2000; WERTHER et al., 2000), como:

- a facilidade de secagem;
- o elevado poder calorífico;
- a baixa temperatura de ignição;
- o elevado teor de voláteis;
- a elevada taxa de combustão;
- a baixa energia de ativação.

Estas propriedades são influenciadas tanto pelas características do combustível como pelas características dos queimadores. Por outro lado, certas características como a umidade, a granulometria, a densidade e a heterogeneidade dos materiais lignocelulósicos irão limitar a eficiência da combustão (KANURY, 1994). É importante ressaltar, que é muito difícil a obtenção de uma mistura completamente homogênea entre o combustível e o comburente, além disso, o processo de combustão da biomassa é mais complexo que de outros combustíveis (como o metano, a gasolina, etc.), uma vez que ela apresenta uma composição físico-química complexa (TABARÉS et al., 2000) e muito variável devido às diferentes espécies existentes.

A combustão da biomassa pode ser caracterizada de forma simplificada, considerando que a partícula está a uma temperatura inicial, com massa específica inicial m_0 (ρ_0) e que num determinado instante (tempo de ignição- t_{ig}) é fornecido um fluxo de energia através do aparecimento da chama. Nesta situação, as primeiras etapas de aquecimento apenas irão atingir as camadas adjacentes à superfície exposta e quando esta atingir uma temperatura suficientemente elevada, a pirólise inicia-se, com difusão dos voláteis misturando-se com o ar. Na primeira fase depois da ignição, a superfície da partícula sofre um aumento de temperatura e à medida que aumenta, a superfície externa da partícula recebe energia, por convecção, devido à passagem do ar quente (DIAS, 2002). No interior da partícula, a temperatura aumenta devido à transmissão de energia, por condução, a partir da superfície externa mais quente, verificando-se a migração simultânea da umidade no sentido oposto. A secagem ocorre com temperatura na faixa de 50-150°C (WERTHER et al., 2000), no entanto, verifica-se na generalidade dos casos que esta é superior à temperatura do início da pirólise, o que significa que pelo menos parcialmente as duas etapas processam-se simultaneamente (Figura 09), especialmente para o caso de partículas de grandes dimensões (KANURY, 1994).

Tem-se verificado que valores muito elevados de umidade podem levar a dificuldades na ignição, à limitação da liberação de voláteis, ao aumento na formação de monóxido de carbono (JENKINS et al., 1996) e à redução da temperatura da combustão, modificando assim a sua qualidade (WERTHER et al., 2000).

O limite máximo de umidade para que a reação de combustão se processe de forma autónoma é de aproximadamente 65%, uma vez que acima deste valor é liberada uma quantidade insuficiente de energia para satisfazer as necessidades do aquecimento dos reagentes e da evaporação da água. De um modo geral, verifica-se que é necessária uma fonte de combustível extra, como o gás natural, quando a umidade da biomassa é superior a 65%, verificando-se uma emissão muito maior de monóxido de carbono (CO) e outros produtos de combustão incompleta (JENKINS et al., 1996).

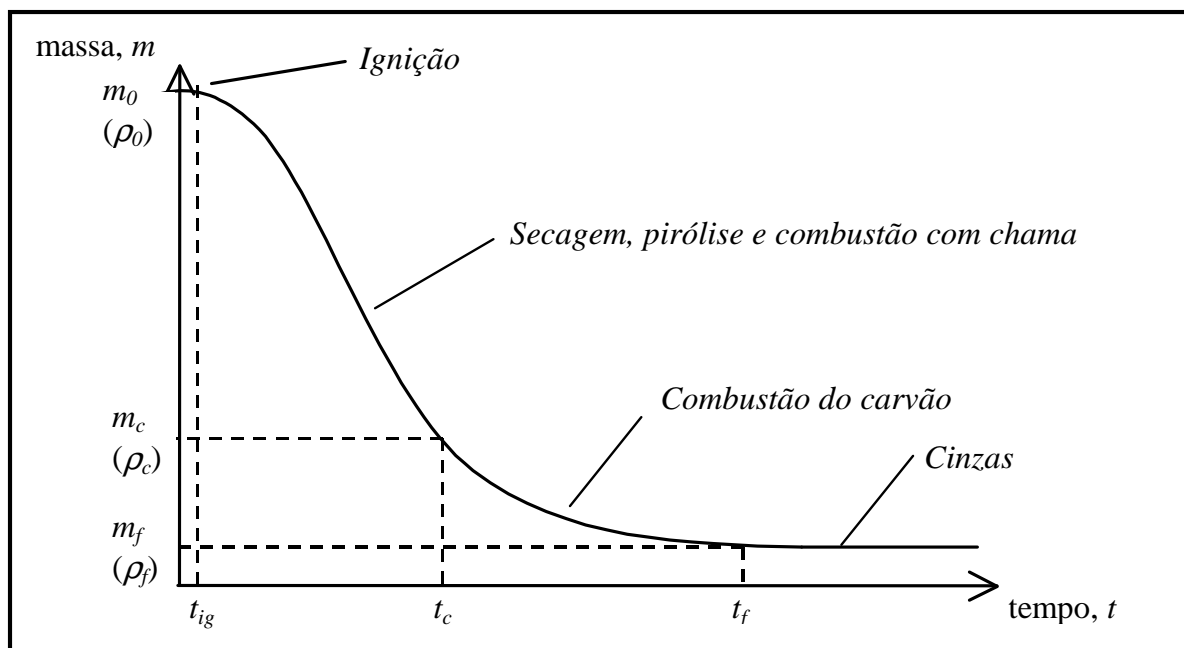


Figura 09: Evolução da massa de uma partícula de biomassa na combustão (KANURY, 1994).

Quando a temperatura da biomassa é suficientemente elevada, cerca de 190-300°C, inicia-se o processo de pirólise, originando a liberação dos voláteis (WERTHER et al., 2000). A combustão dos voláteis no exterior da partícula com formação de chama irá fornecer a energia suficiente para que o processo de pirólise continue (KANURY, 1994). Este processo inicia-se com a quebra de ligações químicas dos principais componentes da matéria seca da biomassa (celulose, hemiceluloses e lignina). Em estudos realizados por Eskilsson et al. (2004), sobre o processo de pirólise da madeira, verificou-se que as hemiceluloses são os primeiros componentes a serem alterados (a 200-260°C), seguido da celulose (a 240-350°C) e, finalmente, da lignina (a 280-500°C).

Ao contrário do carvão mineral, na combustão da biomassa, a principal fonte de energia vem da queima dos voláteis, tendo sido observado que no caso da madeira, corresponde a aproximadamente 67% da energia total liberada na combustão. De fato, uma das vantagens da biomassa, em relação ao carvão, é o elevado teor de material volátil, o que facilita a sua combustão, no entanto, esta diferença faz com que os sistemas desenhados para a combustão do carvão não sejam inteiramente aplicáveis à combustão da biomassa (WERTHER et al., 2000).

2.4.6 Emissões de poluentes na combustão da biomassa

De acordo com Loo e Koppejan (2008), as emissões de poluentes causadas pela combustão incompleta da biomassa são geradas principalmente por:

- mistura inadequada do ar e do combustível na câmara de combustão, gerando zonas ricas em combustível;
- falta do oxigênio para a reação;
- baixas temperaturas de combustão;
- curto tempo de residência do combustível na câmara.

Entretanto, nos casos onde o oxigênio está disponível em quantidades suficientes, a temperatura é a variável mais importante, devido a sua influência nas taxas de reação. Uma otimização destas variáveis contribui para reduzir as emissões da combustão incompleta da biomassa e podem ser classificadas em dois grupos principais: o primeiro grupo inclui as emissões de poluentes não queimados, que são, em grande parte, influenciadas pelo equipamento e pelo processo; enquanto que o segundo grupo considera as emissões inerentes a cada tipo de combustível (WERTHER et al., 2000).

Dentro do primeiro grupo, incluem-se o monóxido de carbono, hidrocarbonetos, voláteis, hidrocarbonetos, etc. Estes poluentes formam-se devido à baixa temperatura de combustão, insuficiente mistura ar-combustível e, ainda, ao curto tempo de permanência na câmara de combustão e podem ser minimizadas, conduzindo a combustão de forma a atingir um grau de queima mais eficiente através de uma mistura adequada de combustível com comburente e elevadas temperaturas (OLSSON, 2004).

Dentro do segundo grupo, a emissão de poluentes depende da composição da biomassa utilizada. Werther et al. (2000), destacaram que as principais emissões são de compostos de Nitrogênio (NO_x e N_2O), óxidos de enxofre (especialmente SO_2), e metais pesados (Pb, Zn, Cd). Com relação ao NO_x , a sua formação é devido à combustão dos elementos presentes nos voláteis.

O consumo continuado da biomassa florestal leva à redução da sua massa até uma porção de cinza residual (KANURY, 1994), constituindo a fração inorgânica desta, a qual varia de composição de acordo com o seu tipo. Estudos da Associação dos produtores de *pellets* do Canadá – WPAC (*The Wood Pellet Association of Canada*) mostraram que o teor de cinzas da madeira está em torno de 0.5% (base seca) enquanto que o da casca de arroz, por exemplo, é de 22-33% (base seca). Na biomassa densificada como os *pellets*, o teor de cinzas é normalmente inferior a 1.0% (base seca). Porém, devido à mistura com impurezas obtidas no transporte ou na colheita (terra, areia), atinge valores de até 5% em base seca.

Tal como nos combustíveis fósseis sólidos, muitos dos efeitos destes constituintes inorgânicos são considerados negativos, acarretando problemas ambientais e técnicos. Alguns dos principais componentes encontrados na fração inorgânica da biomassa são K, Ca, P, Si, Al, Fe e Mg (JENKINS et al., 1996), por ordem decrescente de concentração neste combustível. Estes compostos poderão formar aglomerados constituídos por cinza e areia ligados após a fusão, apresentando algum material vítreo (escória), que pode levar a problemas no funcionamento da instalação térmica residencial ou comercial segundo Stahl (2004).

2.4.7 Limites de emissões para derivados da madeira

O CONAMA, Conselho Nacional de Meio Ambiente, é o órgão que legisla sobre a qualidade do ar no Brasil. Para a madeira, tem-se a Resolução N°. 382, de 26 de Dezembro de 2006 (BRASIL, 2011), que estabelece padrões de emissão para processos de geração de calor e conversão de energia térmica e os limites de emissão para poluentes atmosféricos provenientes dos processos de geração de calor a partir da combustão externa de derivados da madeira conforme a Tabela 08.

Os resultados devem ser expressos na unidade de concentração (mg/Nm^3), em base seca e 8% de excesso de oxigênio (O_2 de referência). Os gases deverão ser convertidos às condições referenciais de oxigênio, de acordo com as Equações 03 e 04, da citada Resolução.

Tabela 08: Limites de emissão de poluentes para os derivados da madeira.

Potência Térmica Nominal (MW)	CO	NO _x
	mg/Nm ³	
Até 0,05	6500	Não aplicável
Entre >0,05 e = 0,15	3250	Não aplicável
Entre >0,15 e = 1,00	1700	Não aplicável
Entre >1,00 e = 10,0	1300	Não aplicável
Entre >10,0 e = 30,0	1300	650

Fonte: Brasil, 2011.

Os órgãos controladores e fiscalizadores são organizados em âmbito estadual e, em São Paulo, existe a Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo, que tem como órgão responsável pelo controle e fiscalização a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB), que segue diretrizes preconizadas em normas próprias em conformidade com o CONAMA (BRASIL, 2011), não podendo ser menos restritivas que o órgão nacional. Para a conversão de ppm para a concentração mássica mg/Nm³, utilizou-se a Equação 03, para o CO, e a Equação 04, para NO_x:

$$\text{CO (mg/Nm}^3\text{)} = \left[\frac{(21 - O_2 \text{ ref})}{(21 - O_2)} \right] \cdot \text{CO (ppm)} \quad (03)$$

$$\text{NO}_x \text{ (mg/Nm}^3\text{)} = \left[\frac{(21 - O_2 \text{ ref})}{(21 - O_2)} \right] \cdot [\text{NO (ppm)} + \text{NO}_2 \text{ (ppm)}] \quad (04)$$

3. MATERIAL E MÉTODO

Todos os ensaios e testes desta pesquisa foram realizados no Laboratório de Biomassa da UNESP do Campus Experimental de Itapeva, com exceção à análise termogravimétrica, que foi realizada na Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá (FEG) e as análises de raios-x das cinzas da combustão que foram realizadas no laboratório da Indústria Ferro Ligas Maringá em Itapeva Estado de São Paulo.

3.1 Material

Foram analisadas quatro procedências de *pellets* de madeira (Figura 10) de três estados brasileiros: um de São Paulo (*pellets* P1); dois do Paraná (produtores diferentes), identificados neste trabalho como *pellets* P2 e *pellets* P3; e um de Santa Catarina chamado de *pellets* P4. Também foram analisadas uma amostra de casca de pinus (Ca) do Estado do Paraná, uma amostra de cavacos de pinus (Cv) do Estado do Paraná e uma amostra de serragem de eucalipto (Se) do Estado de São Paulo.

Como todas as amostras de *pellets* coletadas referem-se a produtos comerciais, neste trabalho elas foram identificadas apenas pelo estado de origem acompanhado de uma sigla. Desta forma, procurou-se evitar a promoção positiva ou negativa de marcas comerciais. Eles encontravam-se em suas embalagens comerciais de venda e foram produzidos com subprodutos de indústrias madeireiras (serragem), tornando-se muito difícil identificar (com precisão) a espécie, porque chegaram de diferentes indústrias madeireiras da região onde foram produzidos e foram misturadas aleatoriamente antes da fabricação dos *pellets*.

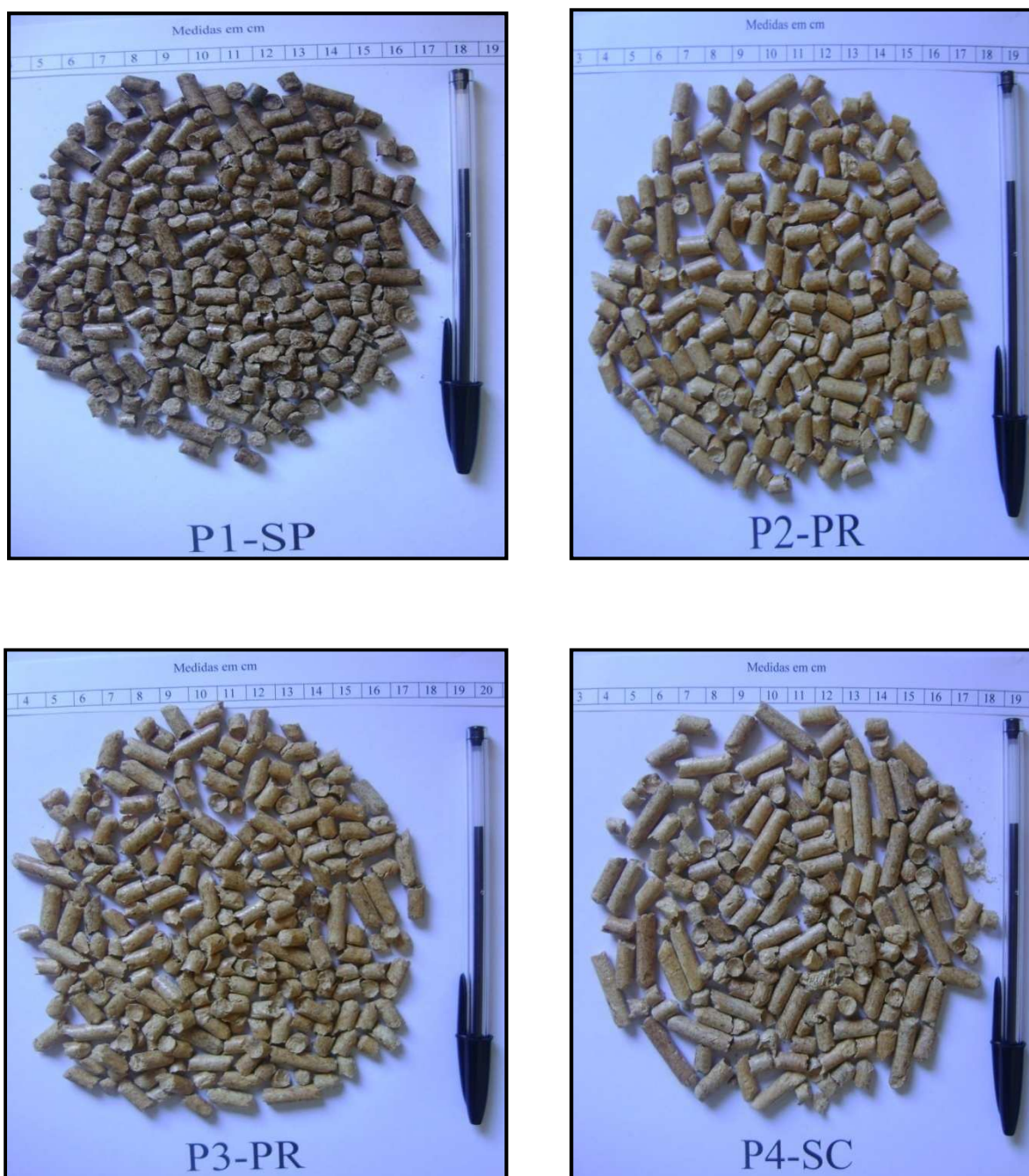


Figura 10: As amostras de *pellets* analisadas.

A serragem de eucalipto, os cavacos e a casca de pinus (Figura 11) foram acondicionados em sacos plásticos fechados para que suas características físicas originais não fossem alteradas.



Figura 11: As amostras de cascas, cavacos e serragem analisadas.

Todas as amostras foram armazenadas em local seco e à temperatura ambiente. As caracterizações iniciais destas amostras estão relacionadas na Tabela 09. As cascas e os cavacos foram picados em moinho tipo WILLEY e selecionados com peneira de 18,0 mm de diâmetro, até obter um material uniforme e de granulometria adequada para a realização dos ensaios.

Tabela 09: Caracterização inicial das amostras.

Amostras	Material	Origem	Forma	Dimensão	Classificação
P1	<i>pellets</i>	São Paulo	cilíndrica	6 mm	eucalipto
P2	<i>pellets</i>	Paraná	cilíndrica	6 mm	pinus
P3	<i>pellets</i>	Paraná	cilíndrica	6 mm	pinus
P4	<i>pellets</i>	Santa Catarina	cilíndrica	6 mm	pinus
Se	serragem	São Paulo	partículas	< 3 mm	eucalipto
Ca	casca	Paraná	partículas	> 18 mm	pinus
Cv	cavacos	Paraná	partículas	> 18 mm	pinus

A casca foi deixada ao ar livre para secar e diminuir o seu teor de umidade, facilitando, desta forma, as análises físicas, químicas e térmicas. Os cavacos e a serragem de eucalipto encontravam-se com teor de umidade adequado para o ensaio.

3.2 Método

No Brasil não há normas para padronização e caracterização dos *pellets* de madeira. Há algumas normas brasileiras específicas para briquetes e carvão vegetal que são adaptadas para a utilização em *pellets*. Por esse motivo, muitos ensaios foram feitos com base em normas europeias ou americanas.

3.2.1 Determinação da análise imediata

Efetuaram-se análises imediatas, com as determinações do teor de umidade, materiais voláteis, teor de cinzas e carbono fixo, mediante a metodologia expressa na norma ABNT NBR 8112/83, sendo três repetições para cada amostra de material. A análise imediata foi utilizada para caracterizar os seguintes parâmetros: perda de água (fornece dados sobre o poder calorífico), voláteis (indica os materiais que queimam acima do leito ou fora da partícula na fase gasosa), carbono fixo (parâmetro que indica

queima no interior do leito ou da partícula) e teor de cinzas (material a ser descartado, indica a eficiência térmica do combustível). As cinzas foram determinadas segundo a norma TAPPI T 211 om-93. Para a determinação deste material inorgânico, utilizaram-se cadinhos de porcelana previamente tarados à 575°C. Foi colocado 1,0000 g de amostra no cadinho e levados à mufla numa temperatura de 575°C por 4 horas. As amostras calcinadas foram colocadas em um dessecador para resfriamento até massa constante. O teor de cinzas foi determinado pela Equação 05:

$$\text{Teor de Cinzas (\%)} = \frac{m_1}{m_2} \times 100 \quad (05)$$

Onde o *Teor de Cinzas* é dado pelo teor percentual de cinzas (em % de massa), m_1 é a massa de cinzas (em gramas) e m_2 é a massa da amostra seca (em gramas).

3.2.2 Determinação da densidade a granel

Para determinação da densidade a granel, utilizou-se a metodologia estabelecida pela norma ABNT NBR 6922, para carvão vegetal. Em função da quantidade limitada de *pellets* de madeira e da homogeneidade granulométrica dos mesmos, promoveu-se uma adaptação da norma, utilizando-se um cilindro de PVC com volume conhecido de 5,0 litros, que foi preenchido até a borda com o biocombustível e, sua massa, obtida numa balança analítica com precisão de 0,1 g. Foram realizados cinco repetições para cada procedência de material.

3.2.3 Determinação das dimensões dos *pellets*

O diâmetro e o comprimento dos *pellets* foram determinados de acordo com a norma austríaca ONORM M 7135, através da medida individual do comprimento e do diâmetro de quarenta *pellets* selecionados, aleatoriamente, de cada amostra. Com o auxílio de um paquímetro digital verificou-se o diâmetro e altura de cada um deles. A média dos valores do comprimento (h) e do diâmetro (duas vezes o raio) foi calculada através do método estereométrico. Foram realizadas três análises independentes de cada amostra.

3.2.4 Poder calorífico superior (PCS) e inferior (PCI)

Determinou-se o PCS em uma bomba calorimétrica isotérmica marca IKA WORKS modelo C-5000 (Figura 12), por meio da metodologia estabelecida na norma ABNT NBR 8633 que prescreve o método de determinação do PCS do carvão vegetal a volume constante. Para os *pellets*, a norma foi adaptada triturando-os antes da análise. Realizaram-se cinco repetições para cada amostra coletada. O valor do PCI foi calculado de acordo com a Equação 07, considerando o teor de umidade de cada amostra.



Figura 12: Bomba calorimétrica isotérmica modelo IKA C-5000.

$$PCI = PCS - m \cdot L_v \quad (07)$$

Sendo m a massa total de H₂O nos produtos de combustão (g), o L_v é o calor latente de vaporização da água que vale 2,26 kJ/kg, o PCI é o poder calorífico inferior (kJ/kg) e o PCS é o poder calorífico superior (kJ/kg).

A densidade energética é a quantidade de energia por unidade de volume de um combustível e foi obtida pelo produto do PCI com a densidade a granel das amostras.

3.2.5 Teor de umidade dos biocombustíveis

Esta determinação foi realizada de acordo com a norma ABNT NBR9656. Em cadinhos previamente tarados adicionou-se 1,00 g de amostra que foram levados à estufa ($103 \pm 2^\circ \text{C}$) por aproximadamente quatro horas. Transferiram-se os cadinhos para um dessecador até atingir massa constante. O teor de umidade da madeira foi determinado pela Equação 08:

$$\text{Teor de umidade (\%)} = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \cdot 100 \quad (08)$$

Onde o *Teor de umidade (%)* é o teor percentual de umidade (em % de massa), m_1 é a massa da amostra úmida (em gramas) e m_2 é a massa da amostra seca (em gramas).

3.2.6 Análise química dos materiais lignocelulósicos

Para a caracterização química, primeiramente os materiais lignocelulósicos (*pellets*, serragem, cavacos e casca de pinus) foram reduzidos a partículas menores que 1,0 mm, em moinho tipo Willey e, em seguida, foram classificadas para obtenção da fração 40/60 mesh (0,420/0,250 mm), que é a fração recomendada segundo as normas

TAPPI T 264 cm-97 e TAPPI T 257 cm-85 para análise química. A partir desta fração, foi efetuado o procedimento padrão de caracterização química, discriminado a seguir:

- Teor de extrativos totais (TAPPI T 204 om-94);
- Teor de cinzas (TAPPI T 211 om-93);
- Teor de lignina insolúvel (TAPPI T 222 om-98);
- Teor de holocelulose (TAPPI T 19 m-54);

Essas determinações químicas foram realizadas através de três análises independentes.

3.2.7 Determinação da durabilidade mecânica dos *pellets*

A durabilidade mecânica (D_u) dos *pellets* foi determinada de acordo com as especificações técnicas da norma CEN/TS 15210-1 de 2005, usando 500,0 g da amostra do biocombustível, que foi rotacionado a 50 rpm – rotações por minuto, durante o tempo de 10 minutos, numa caixa fechada (Figura 13) de 300 x 300 x 125 mm confeccionada em MDF de 15 mm de espessura.



Figura 13: Caixa utilizada para o teste de durabilidade mecânica.

Uma peneira de 3,0 mm foi utilizada para reter os *pellets* depois da execução do experimento e um pincel de 12,0 mm foi utilizado para reunir as pequenas partículas

após os ensaios. A durabilidade mecânica foi expressa através do percentual médio da massa retida na peneira (m_r) e a massa inicial (m_i), segundo a Equação 09:

$$Du (\%) = 100 - \left(100 \cdot \frac{m_r}{m_i} \right) \quad (09)$$

Onde $Du (\%)$ é a durabilidade mecânica (em % de massa), m_r é a massa de partículas menores que 3,0 mm retidas na peneira (em gramas) e m_i é a massa inicial (em gramas).

Os resultados foram realizados em duplicata para cada amostra e os parâmetros de análise de acordo com a referida norma são:

- Durabilidade alta quando a medida for superior a 80%;
- Durabilidade média quando a medida estiver entre 70 e 80%;
- Durabilidade baixa quando a medida for inferior a 70%.

3.2.8 Determinação do teor de holocelulose

Em erlenmeyer de 250 mL adicionou-se cerca de 4,0000 g de amostra seca livre de extrativos (40/60 mesh), 140,0 mL de água destilada, 3,0 mL de ácido acético glacial, 3,3 g de clorito de sódio e 4,3 g de acetato de sódio. Tampou-se o recipiente com outro erlenmeyer de 50 mL invertido sobre o primeiro e levou-se o conjunto para um banho termostatizado a $70 \pm 2^\circ\text{C}$. Manteve-se a mistura reacional sob agitação constante por 30 minutos e em seguida adicionou mais 3,0 mL de ácido acético glacial e 3,3 g de clorito de sódio. Este tratamento foi repetido mais quatro vezes. Ao final de 150 min., a mistura foi resfriada abaixo de 10°C e, em seguida, filtrada em um funil de vidro sinterizado, e previamente tarado. A holocelulose (resíduo sólido) foi lavada com cerca de 1,0 L de água destilada ou até o filtrado sair incolor e com pH neutro. Em seguida foi lavada com três porções de etanol e seco em estufa a $103 \pm 2^\circ\text{C}$. A porcentagem de holocelulose foi obtida pela Equação 10:

$$\text{Teor de holocelulose (\%)} = \frac{m_1}{m_2} \times 100 \quad (10)$$

Onde *Teor de holocelulose (%)* é o teor percentual de holocelulose (em % de massa), m_1 é a massa de holocelulose seca (em gramas) e m_2 é a massa da amostra livre de extrativos (em gramas).

3.2.9 Determinação do teor de lignina insolúvel

A determinação do teor de lignina insolúvel em meio ácido (Método Klason) foi realizada segundo o método TAPPI T 222 om-98 (adaptada). Pesou-se 1,0000 g de amostra livre de extrativos e transferiu-se para almofariz com 15,0 mL de ácido sulfúrico 72% (densidade de 1,6389 g/cm³). Esta mistura foi macerada cuidadosamente até obter-se um máximo de desfibramento e deixou-se a reação prosseguir por 24 horas. Após este tempo, transferiu-se a mistura para um balão de 1,0 L, completou-se o volume até 560,0 mL com água destilada e aqueceu-se sob refluxo por 4 horas. Em seguida, filtrou-se a lignina insolúvel em um funil de vidro sinterizado nº 4 que foi, previamente, tarado. Coletou-se o filtrado para análise posterior de lignina Klason solúvel e secou-se o funil, com a lignina insolúvel, em estufa à 103 ± 2°C por 24 horas. Resfriou-se em dessecador e pesou-se até a obtenção de massa constante. A porcentagem de lignina Klason insolúvel foi determinada pela Equação 08:

$$\text{Teor de lignina (\%)} = \frac{m_1}{m_2} \times 100 \quad (11)$$

Onde *Teor de lignina (%)* é o teor percentual de lignina insolúvel (em % de massa), m_1 é a massa de lignina Klason insolúvel (em gramas) e m_2 é a massa da amostra livre de extrativos (em gramas).

3.2.10 Análises das cinzas dos materiais lignocelulósicos

Para a caracterização das cinzas residuais do processo, cerca de 50,0 g do material foi coletado em sacos plásticos após o término da combustão e enviado ao laboratório da Indústria Ferro Ligas Maringá em Itapeva-SP, onde foi analisado utilizando um espectrômetro de fluorescência de raios x, marca Rigaku RIX2000, com detector de fluxo para elementos leves (elementos de F a Sc), localizado na parte interna da câmara de vácuo, e o detector de contagem de cintilação (para elementos de Titânio a Urânio), localizado na parte externa da câmara de vácuo do equipamento.

As análises efetuadas neste equipamento são de detecção das substâncias na forma de óxidos como o SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , TiO_2 e P_2O_5 .

3.3 Analisador de gás da combustão

Um analisador Eletroquímico Portátil (Figura 14) modelo UNIGAS 3000 MKIII, fornecido pela EUOTRON, foi utilizado para as análises das emissões gasosas e determinação da composição química dos gases da combustão.



Figura 14: Analisador de gás UNIGAS 3000 MK III.

Este equipamento determina a composição dos gases (O_2 , CO , CO_2 , NO , NO_x , SO_2) pela passagem destes através de um detector eletroquímico. Além disso,

determina também a temperatura do gás na saída da chaminé e a temperatura ambiente. As características e propriedades deste equipamento, assim como a faixa de medição e o limite de erro, são mostradas na Tabela 10:

Tabela 10: Características do analisador portátil UNIGAS 3000 MKIII

Parâmetros	Tipo de sensor	Faixa de Medição	Resolução	Limite de erro
O ₂	Eletroquímico	0 - 25%	0,10%	± 0,1% volume
CO compensado para H ₂	Eletroquímico	0 - 8000 ppm	1 ppm	± 10 ppm <300 ppm ± 4% até 2000 ppm ± 10% >2000 ppm
CO	Eletroquímico	0 - 2000 ppm	1 ppm	± 10 ppm <300 ppm ± 4% até 2000 ppm ± 10% >2000 ppm
NO	Eletroquímico	0 - 4000 ppm	1 ppm	± 5 ppm <125 ppm ± 4% até 4000 ppm
NO ₂	Eletroquímico	0 - 1000 ppm	1 ppm	± 5 ppm <125 ppm ± 4% até 4000 ppm
SO ₂	Eletroquímico	0 - 4000 ppm	1 ppm	± 5 ppm <125ppm ± 4% até 4000 ppm
Temperatura do ar	Pt100	-10 a 100°C	1°C	± (0,2% + 0,15°C)
Temperatura do gás	TC-K	0 a 1000°C	1°C	± (0,3% + 0,3°C)
Excesso de ar	Calculado	1 a infinito	0,01%	0 - 250 %

Fonte: Manual Técnico do equipamento (EUOTRON)

Sua faixa de operação é de 0 a 25% para oxigênio (O₂), de 0 a 20000 ppm para o monóxido de carbono (CO), de 0 a 4000 ppm para NO_x (óxidos de nitrogênio calculado a partir de NO e NO₂) e o dióxido de carbono (CO₂) calculado, na faixa de 0 a 99%. Este equipamento atende a norma americana ASTM D6522-00 - *Determination of Nitrogen Oxides, Carbon Monoxide and Oxygen Concentrations in Emissions from Natural Gas-Fired Reciprocating Engines, Combustion Turbines, Boilers and Process Heaters using Portable Analyzers*.

Os *pellets* foram alimentados num queimador de biomassa da Berneck, com potência térmica nominal de aproximadamente 0,08 MW (Figura 15), através de uma rosca dosadora, com uma taxa de alimentação constante de aproximadamente 14,0

kg/h de biomassa. O ar atmosférico foi-lhe fornecido sem o pré-aquecimento a uma taxa de fluxo do ar de, aproximadamente, 40 Nm^3 .

Para que houvesse igualdade de condições na combustão para todas as amostras, padronizaram-se os seguintes parâmetros:

- As medições só começavam após 1 hora de queima do material, para que houvesse estabilização das chamas, aquecimento por igual das paredes do queimador, aquecimento dos gases da câmara e da chaminé e queima estável dos *pellets*.
- As duas entradas de ar secundárias do queimador foram mantidas na mesma posição para todas as amostras, para permitir a entrada da mesma quantidade de ar atmosférico.
- O analisador de gás estava a 4,0 metros de altura devido à temperatura elevada na saída do queimador que poderia avariar o equipamento. O termo-anemômetro, a 1,80 m, pelo mesmo motivo.

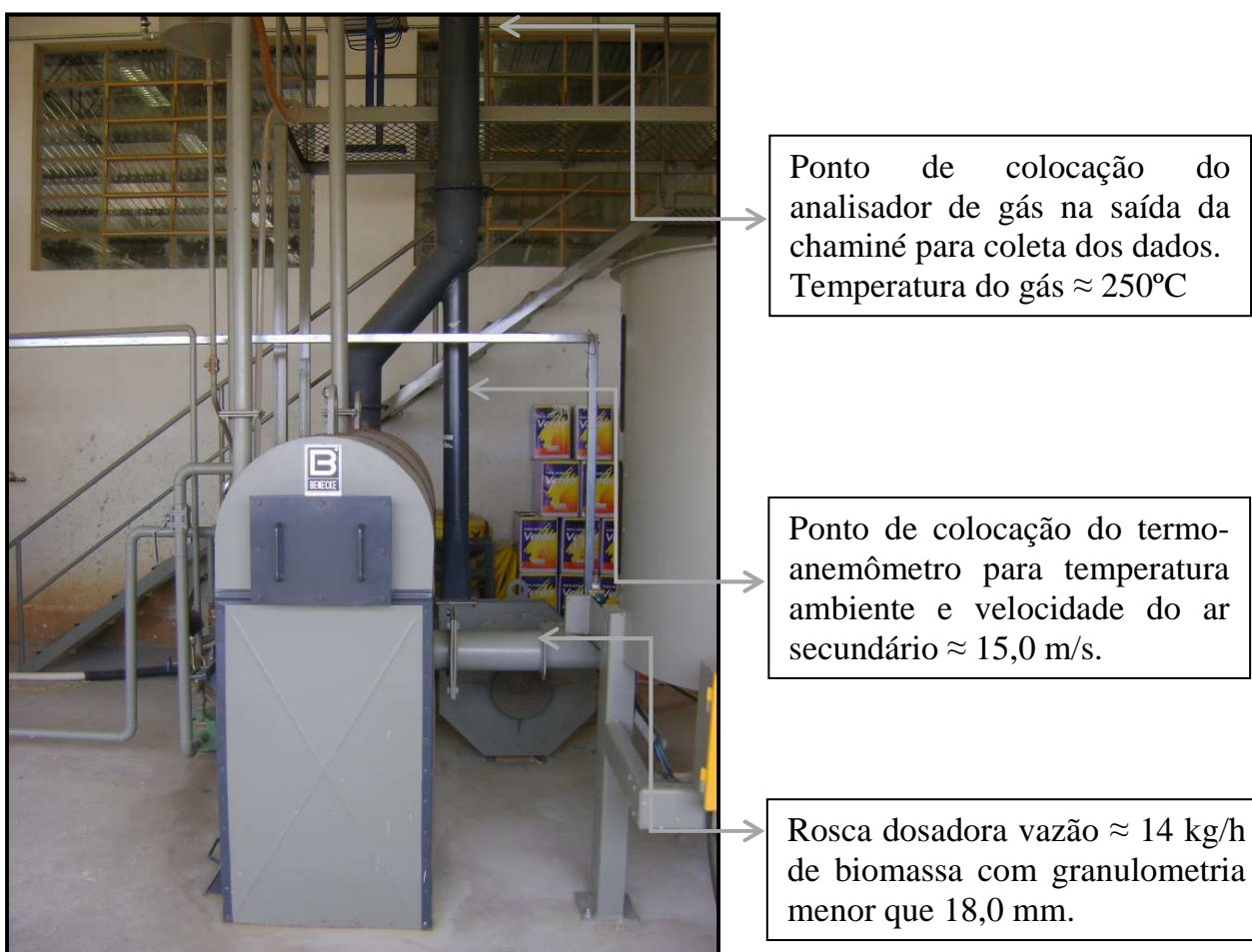


Figura 15: Queimador de biomssa da Berneck de 0,08 MW.

Um termo-anemômetro da marca DWYER séries 471 foi utilizado para a medida da temperatura ambiente e da velocidade do ar secundário produzido pelo exaustor que auxiliava na combustão da biomassa. A velocidade do exaustor foi de, aproximadamente, 15,0 m/s e utilizou-se este padrão para todas as amostras.

3.4 Análise termogravimétrica

A análise termogravimétrica (TGA) é uma técnica utilizada para medir as variações de massa de uma amostra durante o aquecimento ou quando mantida a uma temperatura específica. A medida destas variações foi realizada por uma termobalança. O peso e a temperatura são exibidos em função do tempo para permitir a verificação aproximada da taxa de aquecimento e as curvas DTG aperfeiçoam a resolução e são mais facilmente comparadas a outras medidas. A caracterização térmica do material feita por meio da análise termogravimétrica e de sua derivada (DTG) são as técnicas mais utilizadas para investigar e comparar os eventos térmicos durante a combustão e pirólise de materiais sólidos. A avaliação da porcentagem mássica, da temperatura de degradação e das perdas de voláteis dos *pellets* P1, P2, P3 e P4, foram realizadas em um equipamento da Perkin Elmer, modelo TGA 07 (Figura 16), utilizando um fluxo constante de ar atmosférico com razão de aquecimento de 20°C/min.



Figura 16: Analisador termogravimétrico Perkin Elmer modelo TGA 07.

Para cada amostra de *pellets* de madeira, foram realizadas análises em triplicata, com massas de aproximadamente 10,0 mg do material e aquecimento de 30°C a 500°C.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão abordados e discutidos os resultados obtidos na realização desse estudo.

4.1 Caracterização física dos *pellets* de madeira

Os resultados da caracterização física dos *pellets* de madeira produzidos aqui no Brasil são mostrados na Tabela 11. Os diâmetros finais não tiveram variações significativas porque todos são produzidos numa matriz perfurada com diâmetro padronizado de 6,0 mm. No entanto, o comprimento mínimo encontrado 6,6 mm (para os *pellets* P1) e o máximo 34,4 mm (para os pellets P4) permitiram verificar que há grandes variações nos processos de fabricação dos mesmos.

Tabela 11: Propriedades físicas dos *pellets* de madeira.

Propriedades Físicas	Unid.	P1	P2	P3	P4	Média	DP	CV
Diâmetro médio	mm	6,2	6,6	6,3	6,5	6,4	0,16	2,47
Comprimento médio	mm	11,5	12,8	18,4	22,1	16,2	4,28	26,4
Comprimento máx.	mm	19,2	19,3	26,5	34,4	24,85	6,26	25,2
Comprimento mín.	mm	6,6	8,8	11	13,2	9,9	2,46	24,9
<i>Pellets</i> / 100 g	Unid.	545	334	265	198	335,5	130,2	38,8
Densidade a granel	kg/m ³	647,4	638,0	638,1	640,6	641,0	3,83	0,60
Durabilidade mec.	%	96,6	98,1	96,8	96,3	96,9	0,69	0,71

Muitos pesquisadores como Lehtikangas (2001); Alakangas, Valtanen e Levlin (2006) e Demirbas (2000), já relacionaram o teor de umidade e o tempo de resfriamento como importantes fatores que explicam essa variação. O número de *pellets*, contados em 100 gramas da amostra, mostrou valores com grandes variações, de 198 para os *pellets* P4 a 545 para os *pellets* P1, que fornece 38,8 de coeficiente de variação na análise das médias. Observações visuais indicavam que os *pellets* P1 estavam com comprimentos menores quando comparados aos outros. Isto pode estar relacionado com o tempo de permanência do material na matriz perfurada durante a

pressão e também pela grande quantidade de pontos “pretos” no produto que podem indicar a mistura de cascas no processo, diminuindo a adesão natural das partículas, sobretudo porque a casca tem menor quantidade de lignina do que no lenho. Há possibilidade de que os *pellets* P1 tenham problemas com excesso de geração de finos no transporte. Estudo de Lethikangas (2001) mostrou que há uma relação entre o teor de umidade e o comprimento dos *pellets*. Segundo o autor, isto indicaria que a umidade estaria funcionando como um elemento “ligante”. Sobre a densidade a granel dos *pellets* que variou entre 638,0 a 647,4 kg/m³, o autor acrescenta que não há influência do comprimento dos *pellets* com a densidade a granel. Isto foi comprovado nesta análise, porque apesar do grande coeficiente de variação para o comprimento máx. que foi de 25,2, não houve diferença significativa na densidade a granel que permaneceu com baixo coeficiente de variação de 0,60.

Em quase todas as normas aceita-se valores superiores a 600,0 kg/m³ para combustível com alto padrão de qualidade. Na Suécia, para os *pellets* de padrão do grupo 2 e 3 aceita-se valores superiores a 500,0 kg/m³, que é normalmente utilizado em sistemas industriais. Obernberger e Thek (2002) salientam que baixos valores de densidades a granel resultam em maior custo de transporte influenciando a capacidade de estocagem de produtores e consumidores.

4.2 Análises químicas dos *pellets* de madeira

Na Tabela 12, estão apresentados valores médios para o teor de extrativos totais, lignina, cinzas e holocelulose dos *pellets* avaliados.

A lignina é o ligante natural dos *pellets*. Com a alta temperatura e pressão do processo de fabricação, ela se reorganiza internamente oferecendo a adesão necessária para dar a durabilidade mecânica dos biocombustíveis. No entanto, o maior percentual de lignina dos *pellets* P1, em torno de 29,31%, não representou maior durabilidade nos mesmos, o que pode ser explicado pelo alto teor de cinzas (0,93%) e baixo teor de extrativos (3,95%) quando comparado às outras amostras.

Tabela 12: Propriedades químicas dos *pellets* de madeira.

Propriedades	P1	P2	P3	P4	Média	DP	CV	Literatura ¹²
Análises	(% massa)							
Cinzas	0,93	0,33	0,59	0,54	0,60	0,215	36,04	0,30 a 1,0
Extrativos	3,95	6,54	8,38	5,58	6,11	1,603	26,23	1,0 a 8,0
Holocelulose	67,25	65,94	64,53	66,03	65,94	0,963	1,46	65 a 75
Lignina	29,31	28,02	26,79	28,42	28,14	0,906	3,22	25 a 34

O maior índice de extrativos dos *pellets* P3, com um percentual de 8,38%, pode interferir, positivamente, no limite inferior de inflamabilidade do biocombustível. Este índice está um pouco acima daquela faixa de referência indicada por Bledzki et al. (2002) e Moraes et al. (2005), indicados na Tabela 12.

A maior quantidade de cinzas, apresentado pelos *pellets* P1, pode gerar excesso de resíduos no final da combustão, aumentando a necessidade de manutenção do sistema e, por consequência, inviabilizando a utilização deste combustível em sistemas de aquecimento residencial.

Estudo realizado por Lehtikangas (2001) concluiu que há relação direta entre a quantidade de lignina e a durabilidade mecânica. Nestas análises não se evidenciou isso, pois os *pellets* P1, que têm o maior teor de lignina com 29,31%, foi o que demonstrou a segunda menor durabilidade mecânica de 96,6%.

¹² Moraes et al. (2005) e Bledzki et al. (2002)

4.3 Análise química imediata dos *pellets* de madeira

O resultado da análise química imediata dos *pellets* de madeira, os valores médios e as medidas de dispersão como o Desvio Padrão (DP) e o Coeficiente de Variação de Pearson (CV) são mostrados na Tabela 13.

Tabela 13: Análise química imediata dos *pellets* de madeira.

Propriedades	P1	P2	P3	P4	Média	DP	CV	Literatura ¹³
Análises	(% massa)							
Carbono fixo	15,63	14,7	15,42	14,56	15,08	± 0,46	3,03	15,13
Teor de voláteis	83,4	84,9	84,0	84,9	84,3	± 0,64	0,75	83,8
Teor de cinzas	0,93	0,33	0,58	0,54	0,60	± 0,22	36,21	1,09
Teor de umidade	10,25	6,76	7,78	8,55	8,34	± 1,27	15,30	8,80

Em geral os *pellets* de madeira apresentaram altos teores de voláteis de 83,4% a 84,9% quando comparados com a literatura. Esses valores podem melhorar o ponto de ignição dos combustíveis.

O teor de umidade dos *pellets* variou entre 6,76% (P2) e 10,25% (P1). Nos Estados Unidos recomenda-se teor de umidade abaixo de 6% para os *pellets* classe Super Premium (SP) e abaixo de 8% para Premium. Baixos teores de umidade (menores que 6%) são requeridos para a obtenção de maior quantidade de energia útil disponível. Além disso, estudos de Stahl et al. (2004) mostraram que teores de umidade abaixo de 8% prolongam o tempo de estocagem do produto minimizando a proliferação de micro-organismos (como os fungos que se desenvolvem em teores de umidade acima de 23%) e a deterioração do material.

Os teores de materiais voláteis e carbono fixo na madeira também estão de acordo com Brito e Barrichello (1982), que preconizaram, em termos gerais, teores de matérias voláteis entre 75% a 85% e de carbono fixo entre 14% a 25%. Segundo esses autores, combustíveis com alto índice de carbono fixo devem ter queima mais lenta,

¹³ Yorulmaz e Atimtay (2009)

implicando maior tempo de residência destes dentro dos queimadores, em comparação com outros que tenham menor teor de carbono fixo.

Os teores de cinzas da madeira, em geral, são baixos por isso Lethikangas (2001) esclareceu que valores superiores podem vir de fontes externas como impurezas adquiridas no transporte ou no processamento da matéria-prima. O maior índice percentual encontrado 0,93% (para os *pellets* P1) pode ser explicado pela coloração mais escura do material (pode ser observado visualmente) que sugere a adição de casca no processo de densificação.

O resultado da análise química imediata da serragem (Se), cavacos (Cv) e casca de pinus (Ca), bem como o desvio padrão (DP) da análise são mostrados na Tabela 14.

Tabela 14: Análise química imediata da Se, Cv e Ca.

Propriedades	Se	DP	Cv	DP	Ca	DP
Análises	(% massa)					
Carbono fixo	16,33	-	17,58	-	23,94	-
Teor de voláteis	82,45	0,05	82,05	0,19	72,63	0,08
Teor de cinzas	1,22	0,39	0,37	0,02	1,96	0,12
Teor de umidade	14,24	0,07	10,76	0,11	19,22	0,09

A casca de pinus (Ca) teve o menor índice de voláteis com 72,63% da massa e o maior índice de carbono fixo que implica em maior tempo de residência deste combustível no queimador. Além disso, o alto teor de umidade de 19,22% dificulta o início da queima e causa instabilidade na combustão. O teor de cinzas encontrado para a casca foi, consideravelmente, baixo com 1,96%. Lehtikangas (2001), estudando os *pellets* de casca de pinus, encontrou valores entre 3,45 a 3,71%.

4.4 Caracterização térmica dos *pellets* de madeira

A densidade a granel é muito importante para quantificar volumes de produtos com formas irregulares, pois fornece informações que poderão ser úteis para a logística e transportes dos mesmos, já que considera os espaços vazios entre uma partícula e fornece dados reais dos volumes para o transporte. Além disso, é utilizada para o cálculo da densidade energética. Os dados para o cálculo são mostrados na Tabela 15.

Tabela 15: Dados para o cálculo da densidade a granel dos materiais.

Materiais	P1	P2	P3	P4	Se	Ca	Cv
Média aritmética (kg)	3,2370	3,1902	3,1908	3,2032	0,8773	1,0531	1,2221
Volume do cilindro (m ³)	0,0050	0,0050	0,0050	0,0050	0,0050	0,0050	0,0050
Densidade a granel (kg/m ³)	647,4	638,0	638,1	640,6	175,5	210,6	244,4

A densidade a granel fornece o grau de compactação de um material em relação a outro. Por exemplo, podemos dizer que os *pellets* P1 está 3,69 vezes mais compactado do que a serragem ($647,4/175,5 = 3,69$). Isso comprova a vantagem dos *pellets* de madeira, como combustível compactado, que é a maior quantidade de energia por unidade de volume. Além disso, reduz o espaço requerido para a estocagem e transporte deste combustível nesta mesma proporção. Pastre (2002), analisando 38 tipos diferentes de *pellets*, encontrou valores de densidade a granel na faixa de 520,0 a 640,0 kg/m³.

O PCS e o PCI, das amostras de *pellets* analisadas, tiveram valores com baixo coeficiente de variação, como pode ser observado na Tabela 16. O maior PCS encontrado foi para os *pellets* P2 com 19,48 MJ/kg e o menor PCS foi para os *pellets* P4 com 18,71 MJ/kg.

Tabela 16: Valores energéticos dos *pellets* de madeira.

Propriedades	Unid.	P1	P2	P3	P4	Média	DP	CV	Literatura ¹⁴
Valores Energéticos									
PCS	MJ/kg	18,81	19,48	19,13	18,71	19,03	0,31	1,64	18,7-19,0
PCI	MJ/kg	17,35	18,13	17,70	17,29	17,62	0,33	1,90	16,7-17,9
Densidade a granel	kg/m ³	647,4	638,0	638,1	640,6	641,0	3,83	0,60	560 - 690
Teor de umidade	%	10,25	6,76	7,78	8,55	8,34	1,27	15,30	6,0-12,0
Densidade energética	GJ/m ³	11,23	11,57	11,29	11,08	11,29	0,18	1,57	9,3-12,3

A densidade energética foi obtida multiplicando-se a densidade a granel pelo PCI. Os resultados demonstram que os *pellets* P2 têm a maior quantidade de energia por unidade de volume. Este valor está intimamente relacionado com o teor de umidade e o poder calorífico do combustível. Pode-se inferir ainda que não houve diferença significativa entre as médias dado que o CV foi de, apenas, 1,57. Além disso, percebe-se que todas as amostras de *pellets* têm densidades energéticas muito semelhantes.

O PCS foi obtido diretamente da bomba colorimétrica e o PCI foi obtido por diferença, considerando o teor de umidade da amostra. Para uma base de cálculo de 1000 g, os cálculos preliminares para os *pellets* P1, considerando os valores médios de cada elemento químico obtidos na análise elementar realizada na madeira de acordo com Pastre (2002) são mostrados na Tabela 17.

Dado PCS de 18,81 kJ/kg dos *pellets* P1 e o calor latente de vaporização da água de 2,26 kJ/kg, o PCI pode ser obtido usando a Equação 07:

¹⁴ Lethikangas (2001)

Tabela 17: Dados da análise elementar da madeira por Pastre (2002).

Madeira	Carbono	Hidrogênio	Oxigênio	Nitrogênio	Umidade	Cinza
% massa	51,0	6,0	41,5	0,5	10,25	0,93
m (g)	510,0	60,0	415	5,0	102,5	9,30
M (g/Mol)	12,01	2,02	32,0	28,02	18,02	-
n (mol)	42,5	30	12,9	0,18	5,7	-

$$\text{Como } n_{\text{H}_2} \text{ total} = n_{\text{H}_2\text{O}} \text{ total} = 30 \text{ mol}$$

$$n_{\text{H}_2\text{O}} = n_{\text{H}_2\text{O}} \text{ total} + n_{\text{H}_2\text{O}} \text{ umidade}$$

$$n_{\text{H}_2\text{O}} = 30 + 5,7 = 35,7 \text{ mol}$$

$$m = n \cdot M = 35,7 \cdot 18 = 642,6 \text{ g} = 0,6426 \text{ kg}$$

$$\text{PCI} = \text{PCS} - m \cdot L_v$$

$$\text{PCI} = 18,81 - 0,6426 \times 2,26 = 18,81 - 0,9641 = 17,35 \text{ kJ/kg}$$

Para as amostras de *pellets* P2, *pellets* P3 e *pellets* P4 foram utilizados o mesmo raciocínio ajustando o teor de umidade de cada amostra conforme dados dos *pellets* mostrados na Tabela 13.

O PCI, quando se considera a energia utilizada na vaporização da água, para os *pellets* P1 (que tem o maior teor de umidade entre os *pellets*) foi de 17,35 MJ/kg. Os resultados estão abaixo dos exigidos por grande parte das normas internacionais como a norma austríaca que exige valores ≥ 18 MJ/kg. Os *pellets* P1 e os *pellets* P4 não poderiam ser exportados para a Alemanha que exige valores entre 17,50 a 19,50 MJ/kg. Para a norma sueca (grupos 1 e 2) que estabelecem valores mínimos de 16,90 MJ/kg, as amostras estariam conformes. Ou seja, a aplicação mais nobre dos biocombustíveis, que é o aquecimento residencial, estaria comprometida, restando apenas a utilização em aplicações industriais. O mercado europeu residencial é muito mais exigente, quanto aos critérios de qualidade, do que o setor industrial.

4.5 Durabilidade mecânica dos *pellets* de madeira

Estudos publicados por Fasina (2008) relacionavam o teor de umidade com a durabilidade nos *pellets* de casca de amendoim. Outros autores como Fasina e Sokhansanj (1992), que estudaram os *pellets* produzidos a partir da alfafa e Colley (2008), estudou os *pellets* produzidos a partir de gramíneas, também mostraram que um aumento no teor de umidade reduz a durabilidade mecânica dos *pellets*. Lehtikangas (2001), porém, ao estudar *pellets* produzidos a partir da casca de pinus, verificou que não há correlação entre teor de umidade e durabilidade mecânica. O autor suspeita, inicialmente, que as forças intermoleculares das moléculas de água reforçam a ligação entre as partículas individuais nos *pellets* e, um aumento mais acentuado no teor de umidade, causa o rompimento dessas ligações. O resultado é um sistema de duas fases (partículas e água) que mantém a ligação estrutural dos *pellets*. Isto colabora para o surgimento das pequenas rachaduras que podem torná-los suscetíveis à ruptura. A tabela 18 mostra os resultados das análises efetuadas e o teor de umidade de cada um dos quatro *pellets* analisados.

Tabela 18: Resultados das análises de durabilidade mecânica dos *pellets*.

<i>Pellets</i>	Teor de Umidade (%)	Massa inicial (g)	Massa Retida (g)	Durabilidade (%)
P1	10,25	497,25	16,80	96,6
P2	6,76	509,70	9,60	98,1
P3	7,78	503,85	16,05	96,8
P4	8,55	508,30	18,85	96,3

De acordo com o método descrito pela norma CEN/TS 15210-1 de 2005, os *pellets* de madeira, produzidos no Brasil, têm alta durabilidade mecânica com medida superior a 80% (96,3 a 98,1%) para todas as amostras analisadas. Nota-se ainda que os *pellets* P2 tem o menor teor de umidade de 6,76% combinado com a maior durabilidade mecânica (98,1%), confirmando estudos de Fasina (2008).

4.6 Análise termogravimétrica

O processo de pirólise dos materiais lignocelulósicos consiste em um conjunto de reações químicas complexas acompanhadas pela transferência de calor e massa. Essas reações ocorrem durante a degradação dos principais componentes da biomassa vegetal que são as hemiceluloses, a celulose e a lignina.

As curvas termogravimétricas e termogravimétricas diferencial permitem concluir que o processo de pirólise se desenvolve basicamente em três estágios principais.

O primeiro estágio ocorre entre a temperatura ambiente e 250°C. Neste estágio o material absorve calor, liberando a umidade em forma de vapor de água e os materiais voláteis (extrativos) presentes no material. A partir de aproximadamente 50°C até 160°C inicia-se a perda de massa correspondente a perda de umidade e dos extrativos voláteis.

O segundo estágio inicia-se a partir de 180°C e vai até aproximadamente 370°C a 400°C, dependendo do material lignocelulósico. Acima de 180°C iniciam-se os fenômenos de desidratação que envolvem os grupos hidroxila (-OH) presentes nas moléculas dos polissacarídeos. Na faixa de temperatura de 180°C a 370°C ocorre a degradação térmica das hemiceluloses, sendo parcialmente degradadas a celulose (parte amorfa) e a lignina (GHETTI et al., 1996; MANFREDI et al., 2006). Aos 290°C é alcançada a degradação máxima das hemiceluloses.

Entre 290°C e 370°C é alcançada a degradação térmica total da celulose, sendo alcançada a taxa máxima de degradação por volta de 370°C. Nessa fase ocorre a clivagem das ligações glicosídicas dos polissacarídeos, dando lugar a uma grande emissão de voláteis, compostos por vapores orgânicos e altas concentrações de CO, CO₂, CH₄, e H₂.

O último estágio ocorre por volta de 400°C, quando se completa a degradação da lignina que é responsável pela formação de cerca de 50% do carbono fixo no material sólido. Esta decomposição aparece como um pico largo na região de 200°C a 500°C e a

degradação da celulose ocorre entre 275°C e 400°C (ALVAREZ, VÁZQUEZ, 2004; OUAJAI, SHANKS, 2005).

As Figuras 17, 18, 19 e 20 apresentam as análises termogravimétricas dos *pellets* P1, P2, P3 e P4, respectivamente, bem como sua derivada DTG.

Os valores de perda de massa e seus respectivos intervalos de temperatura para as amostras de *pellets* estão sumarizados nas Tabelas 19 e 20.

O comportamento termogravimétrico para os *pellets* P1 nos três estágios é descrito a seguir e a Figura 17 apresenta a curva termogravimétrica, bem como sua derivada DTG.

- 1º estágio: Para a faixa de temperatura até 250°C, houve uma perda de massa de 13%, devido principalmente a evaporação da umidade (água adsorvida na amostra), da influência dos materiais voláteis que se degradam nesta faixa de temperatura e, de acordo com Shebani et al. (2008), a contribuição das hemiceluloses, que têm baixa estabilidade térmica devido a presença de grupos acetil.

- 2º estágio: A pirólise ativa dos *pellets* ocorreu entre 250°C e 400°C com uma perda brusca de massa de 66% e pico máximo de temperatura de 370°C e 5431 µg/min observadas na curva DTG. Nesta faixa de temperatura, há principalmente a decomposição térmica das hemiceluloses e da celulose de acordo com Alvarez e Vázquez (2004) e Ray et al.(2004).

Observa-se ainda que o início da perda de massa acentuada ocorreu em temperaturas acima de 250°C, na qual ocorre a degradação máxima das hemiceluloses e inicia-se a degradação térmica da celulose, apresentando um indicativo de degradação que se prolonga até aproximadamente 400°C, estabilizando em aproximadamente 464°C.

- 3º estágio: Acima de 400°C observa-se a pirólise passiva e certa estabilidade do material seguido de um pico de perda de massa residual de 21% em 468°C e velocidade de degradação de 1197 µg/min.

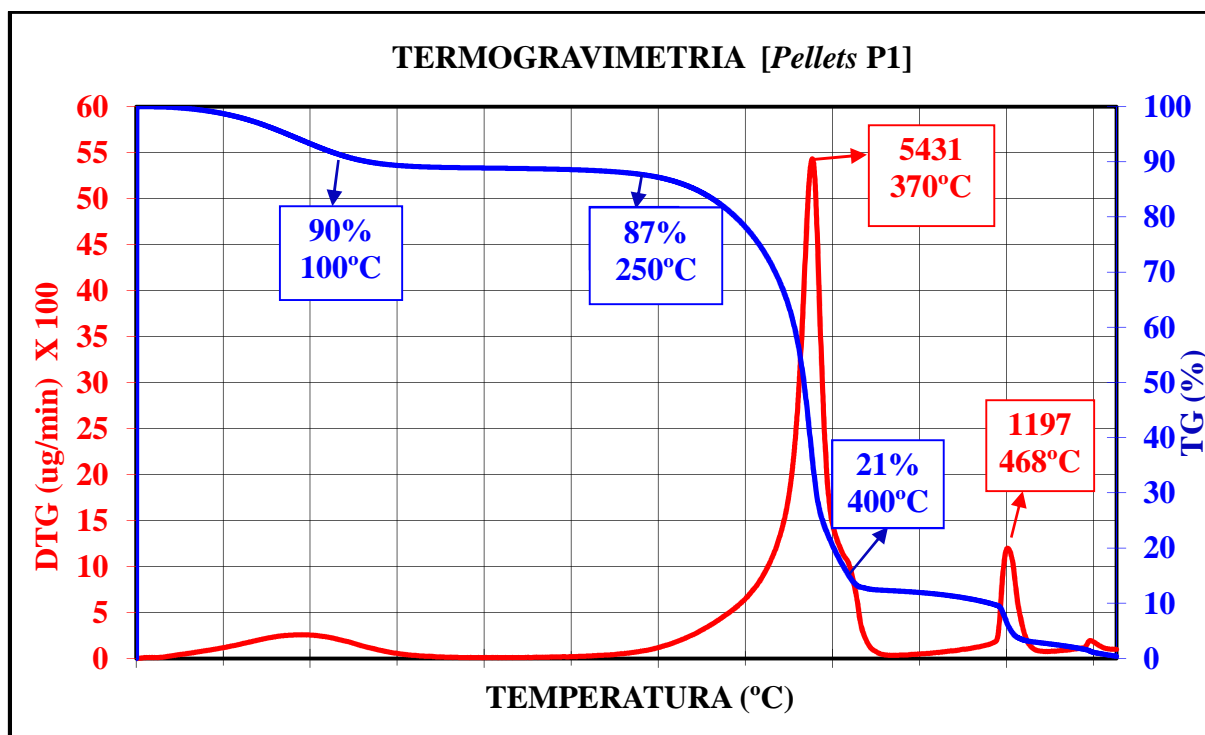


Figura 17: Análise termogravimétrica para os pellets P1.

Para os *pellets* P2, P3 e P4, o comportamento térmico nos três estágios foi semelhante ao descrito para os *pellets* P1, com pequena variação de perda de massa. O comportamento termogravimétrico para os *pellets* nos três estágios são apresentados nas Figuras 18, 19 e 20.

No 2º estágio, a pirólise ativa dos *pellets* P2 ocorreu entre 250°C e 400°C com um pico máximo de perda brusca de massa de 61% em 344°C e velocidade de degradação de 2344 µg/min observadas na curva DTG. Já para os *pellets* P3, a pirólise ocorreu entre 250°C e 400°C com um pico máximo de perda brusca de massa de 65% (88 – 23%) em 350°C e velocidade de degradação de 4076 µg/min. Para os *pellets* P4, a pirólise ativa ocorreu entre 250°C e 400°C com um pico máximo de perda brusca de massa de 66% (91% – 25%) em 352°C e velocidade de degradação de 4093 µg/min.

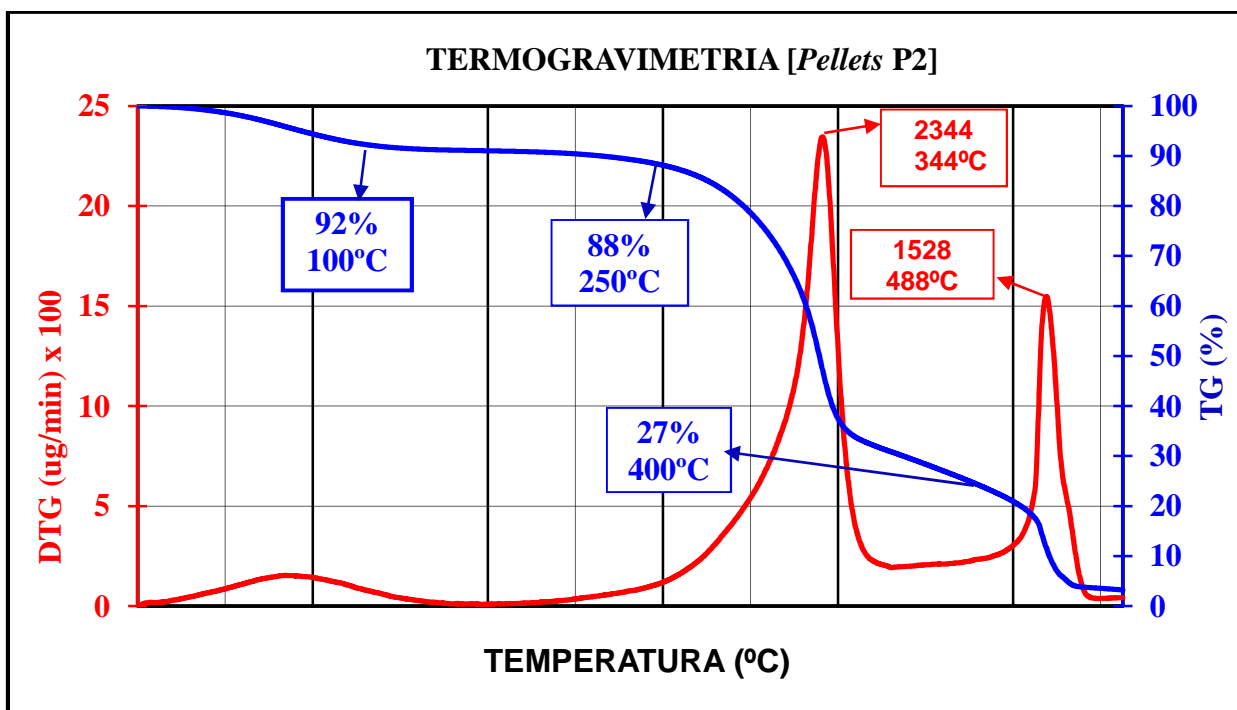


Figura 18: Análise termogravimétrica para os pellets P2.

No 3º estágio, a pirólise passiva para os pellets P2 iniciou-se em temperatura acima de 400°C com estabilização do material seguido de um pequeno pico de perda de massa residual na temperatura de 488°C e velocidade de degradação de 1528 $\mu\text{g}/\text{min}$.

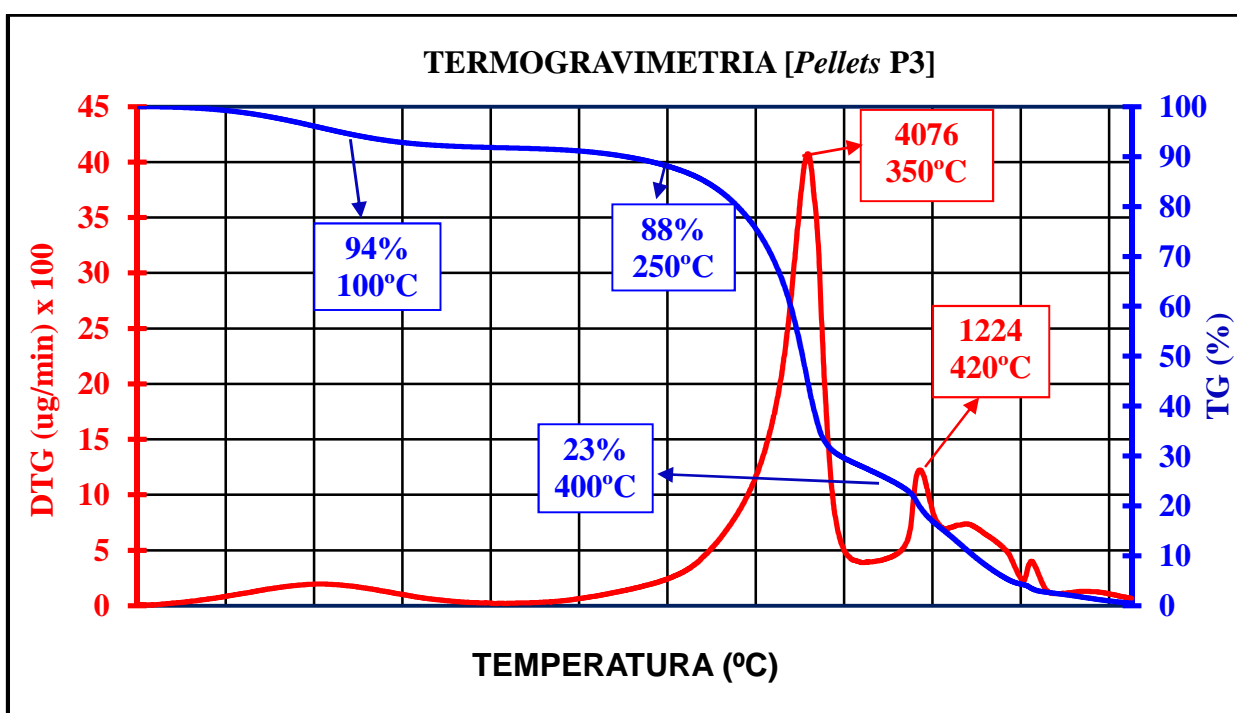


Figura 19: Análise termogravimétrica para os pellets P3.

Para os *pellets* P3, a pirólise passiva ocorreu para temperaturas acima de 400°C com um pequeno pico de perda de massa residual na temperatura de 420°C e velocidade de degradação 1224 $\mu\text{g}/\text{min}$, e para os *pellets* P4 a pirólise passiva começou em 400°C com um pico de perda de massa residual na temperatura de 456°C e velocidade de degradação de 1118 $\mu\text{g}/\text{min}$.

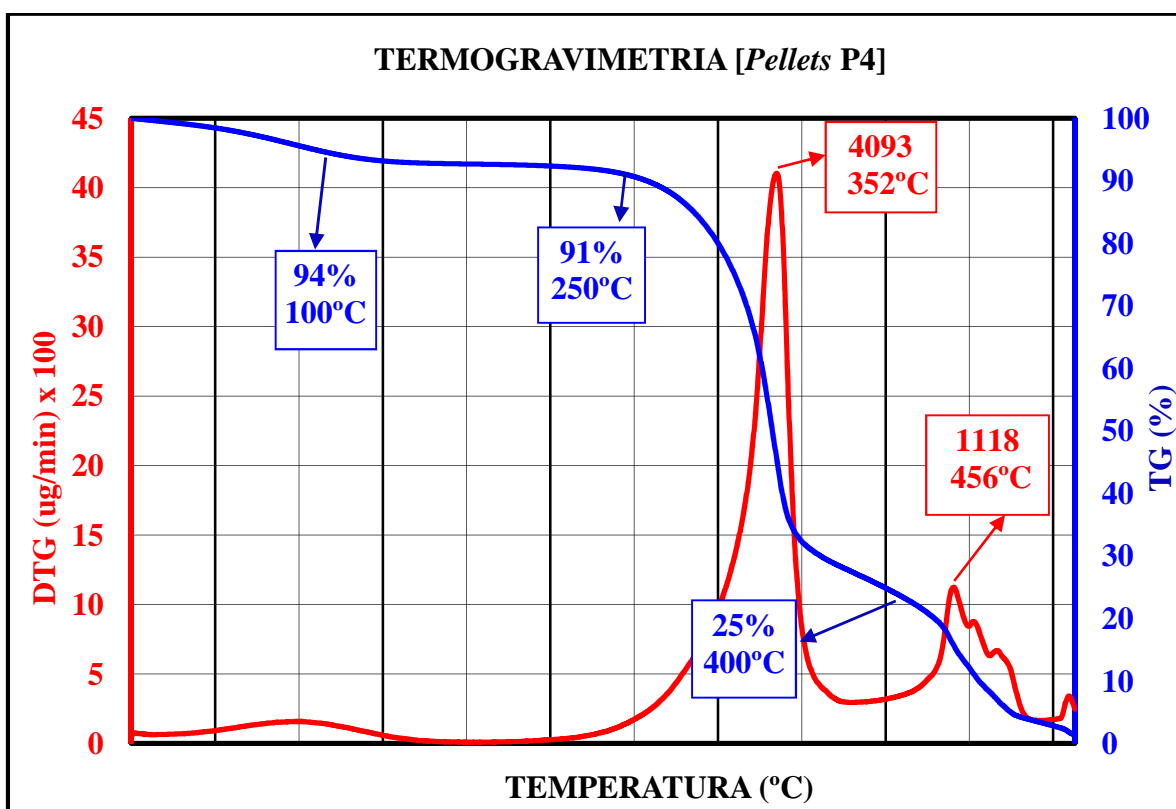


Figura 20: Análise termogravimétrica para os *pellets* P4.

O pico de temperatura representa o lugar onde a perda média de massa é máxima, devido à rapidez da volatilização acompanhado da formação de resíduos do material. Este parâmetro é utilizado como indicador da combustibilidade dos *pellets* de madeira. A baixa temperatura indica facilidade na ignição, conforme estudos de Yorulmaz e Atimtay (2009). Esses três estágios foram constantes para todas as amostras de *pellets*. A Tabela 19 apresenta um resumo destas análises, observado por meio dos três estágios descritos.

A perda de massa percentual [Δm (%)], em cada um dos estágios, é semelhante para todas as amostras. Uma perda de massa acentuada (61 a 66%) ocorreu no 2º estágio para temperaturas entre 250°C a 400°C.

Tabela 19: Resumo do comportamento termogravimétrico dos *pellets* nos estágios.

<i>Pellets</i>	1º estágio		2º estágio		3º estágio	
	T (°C)	Δm (%)	T (°C)	Δm (%)	T (°C)	Δm (%)
P1	<250	13	250-400	66	>400	21
P2	<250	12	250-400	61	>400	27
P3	<250	12	250-400	65	>400	23
P4	<250	9	250-400	66	>400	25

Um resumo dos picos de temperatura e sua velocidade de degradação são mostrados na Tabela 20.

Tabela 20: Resumo do comportamento termogravimétrico dos *pellets* nos picos.

<i>Pellets</i>	DTG 1º pico (°C)	Velocidade de degradação ($\mu\text{g}/\text{min}$)	DTG 2º pico (°C)	Velocidade de degradação ($\mu\text{g}/\text{min}$)
P1	370	5431	468	1197
P2	344	2344	488	1528
P3	350	4076	420	1224
P4	352	4093	456	1118

Observa-se na Tabela 20 e nas Figuras 17, 18, 19 e 20, que a curva DTG apresenta dois picos de decomposição: o primeiro, para temperaturas entre 344 a 370°C e o segundo, para temperatura de 420 a 488 °C. Nesses picos a perda média de massa é máxima, devido à rapidez da volatilização, chegando a 5431 $\mu\text{g}/\text{min}$ e 1528 $\mu\text{g}/\text{min}$, respectivamente.

4.7 Análise das emissões gasosas na combustão da biomassa

As análises dos gases foram realizadas durante a combustão na chaminé do queimador de biomassa. Com intuito de obter média representativa do fluxo de gás, foram realizadas análises a cada minuto de forma a se obter um mínimo de 105 resultados em 2 horas de queima. A Tabela 21 mostra os resultados médios das análises do gás de combustão com os dados obtidos de % O₂, % CO₂, CO (ppm), NO e NO_x (ppm). O limite estabelecido pelas normas ambientais em relação ao Oxigênio

(O₂) de referência foi de 8% e serviu como parâmetro de referência para recálculo dos teores de CO_{ref} e NO_{x ref} como mostrou a Equação 03.

Tabela 21: Resultados médios obtidos na análise dos gases da combustão.

Biomassas	O ₂ ref. (%)	O ₂ (%)	CO ₂ (%)	CO (ppm)	NO (ppm)	NO _x (ppm)	T gás (°C)	CO _{ref.} (mg/Nm ³)	NO _{x ref.} (mg/Nm ³)
Se	8,0	19,9	1,1	798	5,5	5,2	132,8	9.425	126,3
Cv	8,0	19,7	1,1	422	9,1	9,5	139,3	4.188	184,2
Ca	8,0	19,9	1,1	1199	12,9	13,1	136,9	14.170	306,8
P1	8,0	19,5	1,4	423	12,0	12,4	160,1	3.666	211,5
P2	8,0	19,3	1,6	369	27,7	28,6	179,9	2.822	430,5
P3	8,0	19,2	1,7	579	15,7	16,1	187,3	4.182	229,7
P4	8,0	18,7	2,1	435	16,0	16,5	185,1	2.459	183,7

Os resultados médios de concentração de CO_{ref} obtidos quando comparados ao limite de 3250 mg/Nm³, recomendados pelo CONAMA, mostram que o processo de combustão em queimadores de biomassa alimentados por Se, Cv, Ca, P1 e P3, emitem além dos limites estipulados pela norma, como mostra a Figura 21 e Figura 22. Por outro lado, a formação de NO_x de nenhuma das amostras ultrapassou os valores mínimos estipulados pela norma, como pode ser observado pela Figura 23.

Nenhuma emissão de óxidos de enxofre (SO_x) foi encontrada nas amostras. Pode-se inferir que a matéria-prima (madeira), utilizada para a produção dos *pellets*, não continha substâncias químicas como tintas, vernizes, adesivos ou substâncias preservantes que tivesse este elemento em sua composição. Estudo de Dias (2002) encontrou baixos teores de enxofre (< 0,3%) na análise elementar da madeira, comprovando baixo índice de emissão desse elemento nocivo à saúde nos gases da combustão.

Foi observado, por meio de observações visuais, que a casca continha muita poeira o que pode ter afetado os resultados de CO. Dentre todos os biocombustíveis analisados somente os *pellets* P2 e os *pellets* P4 atenderam à norma CONAMA com emissões abaixo de 3250 mg/Nm³. Dias (2002), relatou que na combustão da biomassa em sistemas com baixa eficiência, observaram-se valores de 1000 a 5000 mg/Nm³ de CO.

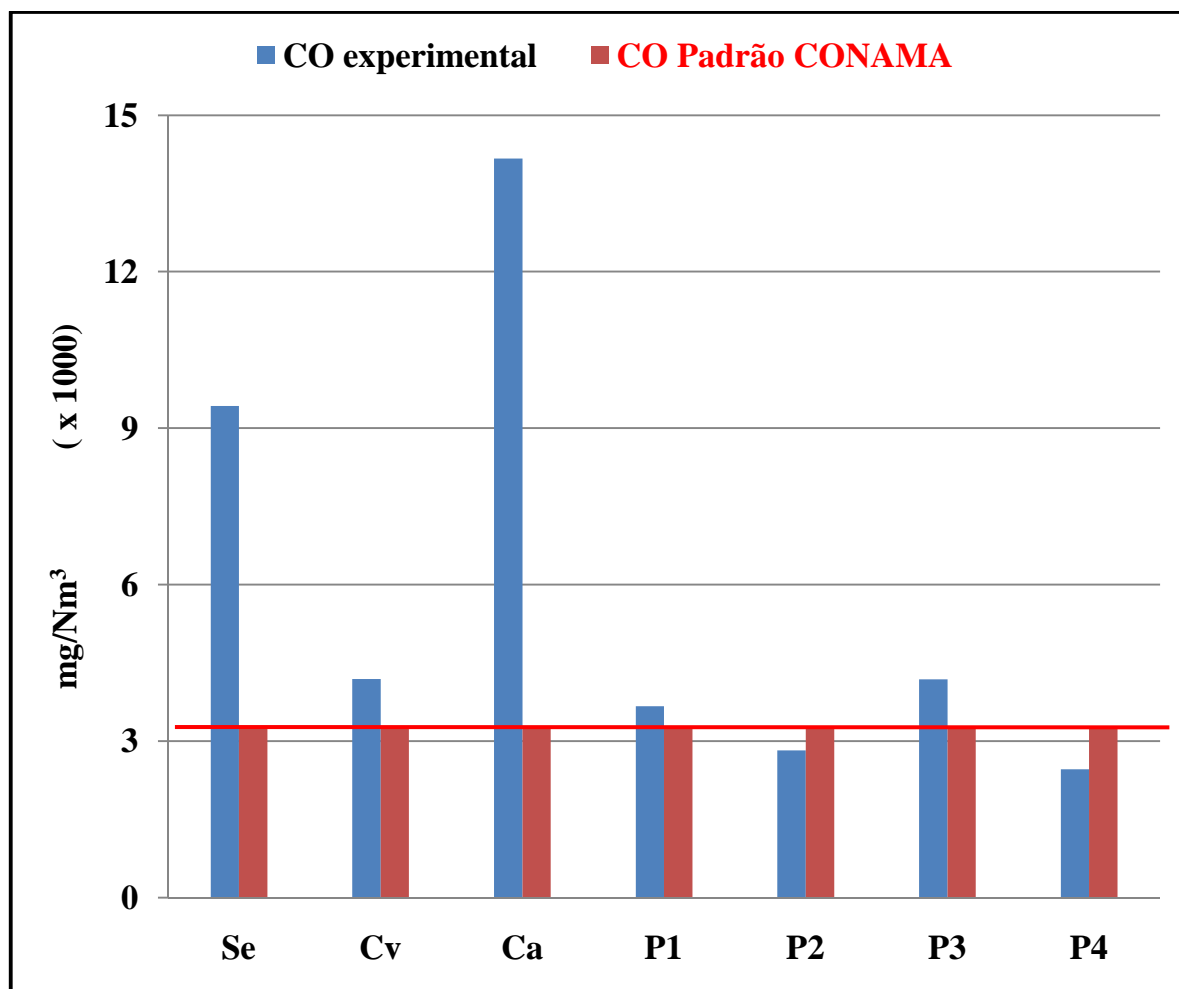


Figura 21: Gráfico CO_{ref.} (calculado) comparado com os padrões CONAMA.

A composição dos gases da combustão incompleta dos biocombustíveis refletem a composição química dessas biomassas, mas também dependem das condições da combustão. Alterações na temperatura da queima ou entrada secundária de ar atmosférico, por exemplo, podem diminuir essas emissões e atender os requisitos da norma. Além disto, a casca de pinus e a serragem de eucalipto, que tiveram os maiores índices de emissões de CO, são combustíveis neutros em carbono, ou seja, a quantidade de CO ou CO₂ que está sendo liberada na queima já foi compensada com o período de crescimento da árvore.

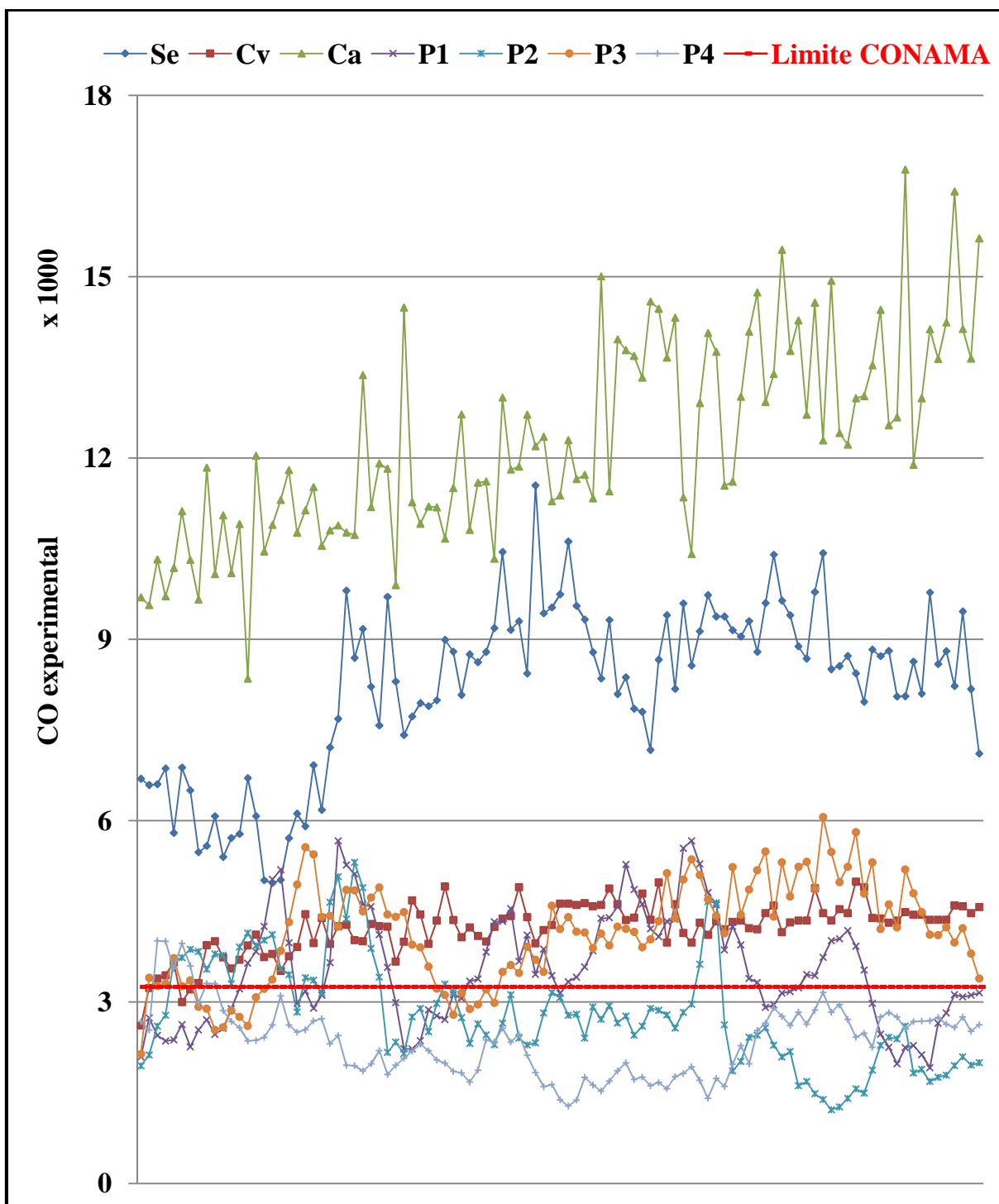


Figura 22: Evolução das emissões de CO na combustão.

Como previsto, a casca de pinus, teve a maior quantidade de emissões ao longo do processo. Para a utilização deste biocombustível nas indústrias faz-se necessário a utilização de equipamento industrial para coleta dos gases da combustão, como por exemplo, um precipitador eletrostático.

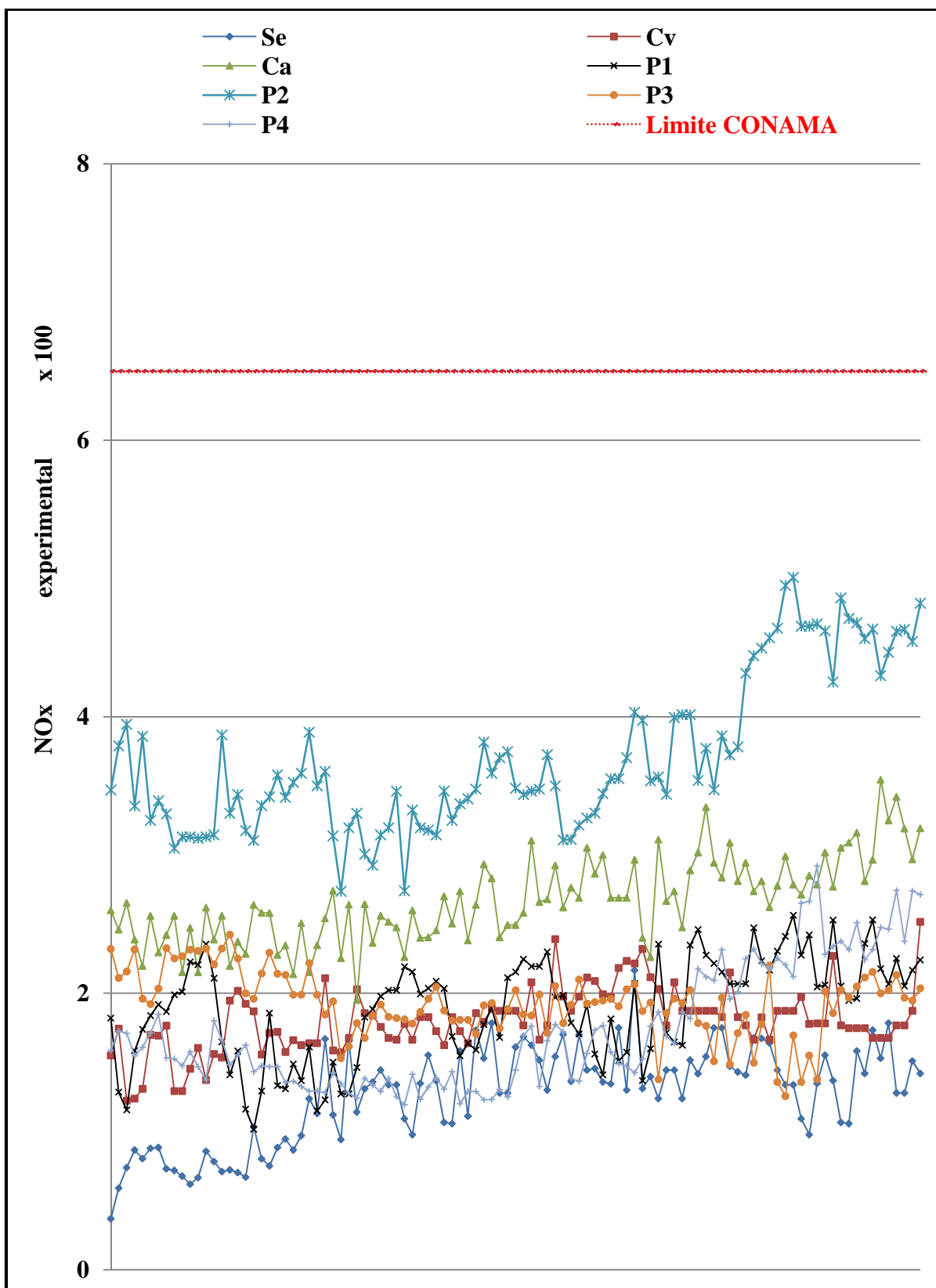


Figura 23: Evolução das emissões de NO_x durante a combustão.

Todas as amostras analisadas tiveram baixos teores de óxidos de nitrogênio e estão de acordo com a norma CONAMA. Isto já era previsto pois, o próprio órgão, não

estabelece padrões de emissão para NO_x para queimadores com potência nominal menor que 30 MW, como é o caso deste queimador de biomassa, que tem potência nominal de 0,08 MW. Um alto teor desta substância pode ser um indicativo do uso de substâncias proibidas no processo de peletização, como relatou Obernberger e Thek (2002).

4.8 Composição química determinada das cinzas residuais

Ao final da combustão, cerca de 100 gramas das cinzas residuais foram coletadas para análise de sua composição química. Os resultados médios obtidos são apresentados nas Tabelas 22 e 23 e na Figura 24. Na Tabela 23, a coluna Total corresponde à porcentagem de massa (base úmida) das substâncias.

Tabela 22: Resultados da análise de cinzas residuais nos combustíveis.

	Substâncias (%)										
	Na ₂ O	K ₂ O	Rb ₂ O	CaO	MgO	SrO	SiO ₂	As ₂ O ₃	SO ₃	P ₂ O ₅	Br
Se	0,58	3,07	-	12,40	1,83	0,07	66,00	-	-	0,56	-
Ca	-	1,34	-	2,42	0,65	0,03	76,30	-	0,05	0,29	-
Cv	0,47	7,76	-	15,60	6,59	0,19	45,60	-	-	2,23	-
P1	0,59	15,30	0,11	22,80	7,28	0,13	30,50	-	0,19	5,18	-
P2	1,35	8,01	-	16,30	4,12	0,12	44,10	-	-	1,95	-
P3	1,08	13,10	0,09	22,40	6,71	0,14	33,90	-	0,32	3,42	-
P4	0,44	3,12	-	8,85	1,68	0,11	50,50	-	0,04	0,83	-

Analisando as substâncias encontradas nas cinzas da combustão dos materiais, verificou-se, observando a Tabela 22, a predominância do elemento silício (30,5% a 76,3%), na forma de sílica (SiO₂), em todas as amostras analisadas, principalmente na casca (76,30%), seguido do elemento cálcio (Ca) que foi o metal alcalino predominante nos *pellets* P1 e *pellets* P3. Isso pode facilitar a formação de escória que prejudica o sistema e ocasionará maior custo de manutenção.

A predominância da sílica na casca de pinus é devido à casca ser a parte de maior predominância de cinzas (Teor de cinzas na casca 1,96% mostrados na Tabela 14), além de estar sujeita a um maior contato com a terra devido ao corte e transporte da madeira. O teor de silício na serragem de eucalipto também foi alto (66,0%), devido a essa serragem apresentar em sua composição lenho e casca. Os elementos cobre, chumbo, arsênio e bromo não foram detectados e outros como o níquel, o cromo e o rubídio só foram encontrados em alguns materiais.

Na Tabela 22 pode-se observar que as cinzas também apresentaram alto teor de metais alcalinos na forma de óxidos de potássio, sódio, cálcio, magnésio, estrôncio. O alto índice desses metais, principalmente sódio e potássio, são responsáveis pela corrosão dos equipamentos de combustão.

Tabela 23: Resultados da análise de cinzas residuais dos combustíveis.

	Substâncias (%)										Total
	MnO	Fe ₂ O ₃	NiO	Cr ₂ O ₃	CuO	ZnO	ZrO ₂	PbO	Al ₂ O ₃	TiO ₂	
Se	0,48	4,78	-	0,06	-	-	0,06	-	5,29	1,75	96,92
Ca	0,15	2,90	-	-	-	-	0,04	-	12,30	1,05	97,52
Cv	1,40	4,69	-	-	-	0,04	0,08	-	9,94	2,10	96,68
P1	2,61	4,35	0,03	0,08	-	0,05	0,05	-	7,19	0,90	97,35
P2	1,77	5,97	-	-	-	0,07	0,05	-	11,60	1,25	96,67
P3	2,49	4,85	-	-	-	0,08	0,06	-	7,67	1,01	97,31
P4	0,38	5,23	-	-	-	0,04	0,07	-	22,40	1,72	95,41

Werther et al. (2000) acrescentaram que nas cinzas da combustão da biomassa podem conter certas substâncias químicas que podem gerar corrosão nos aquecedores residenciais como os óxidos de Na₂O e K₂O. Os *pellets* P1 tiveram a maior concentração de K₂O com 15,30% e os *pellets* P2, tiveram a maior concentração de Na₂O com 1,35%.

Ainda foi detectado na composição das cinzas, outros óxidos metálicos tais como os óxidos de zircônio, zinco, manganês, ferro, titânio e alumínio (Tabela 23). A presença de substâncias não metálicas também foi encontrada como o fósforo e o enxofre, na forma de pentóxido de fósforo V (P₂O₅) e trióxido de enxofre, respectivamente. Esses óxidos não metálicos podem causar um abaixamento do pH, uma vez que, em contato com a água, formam substâncias ácidas.

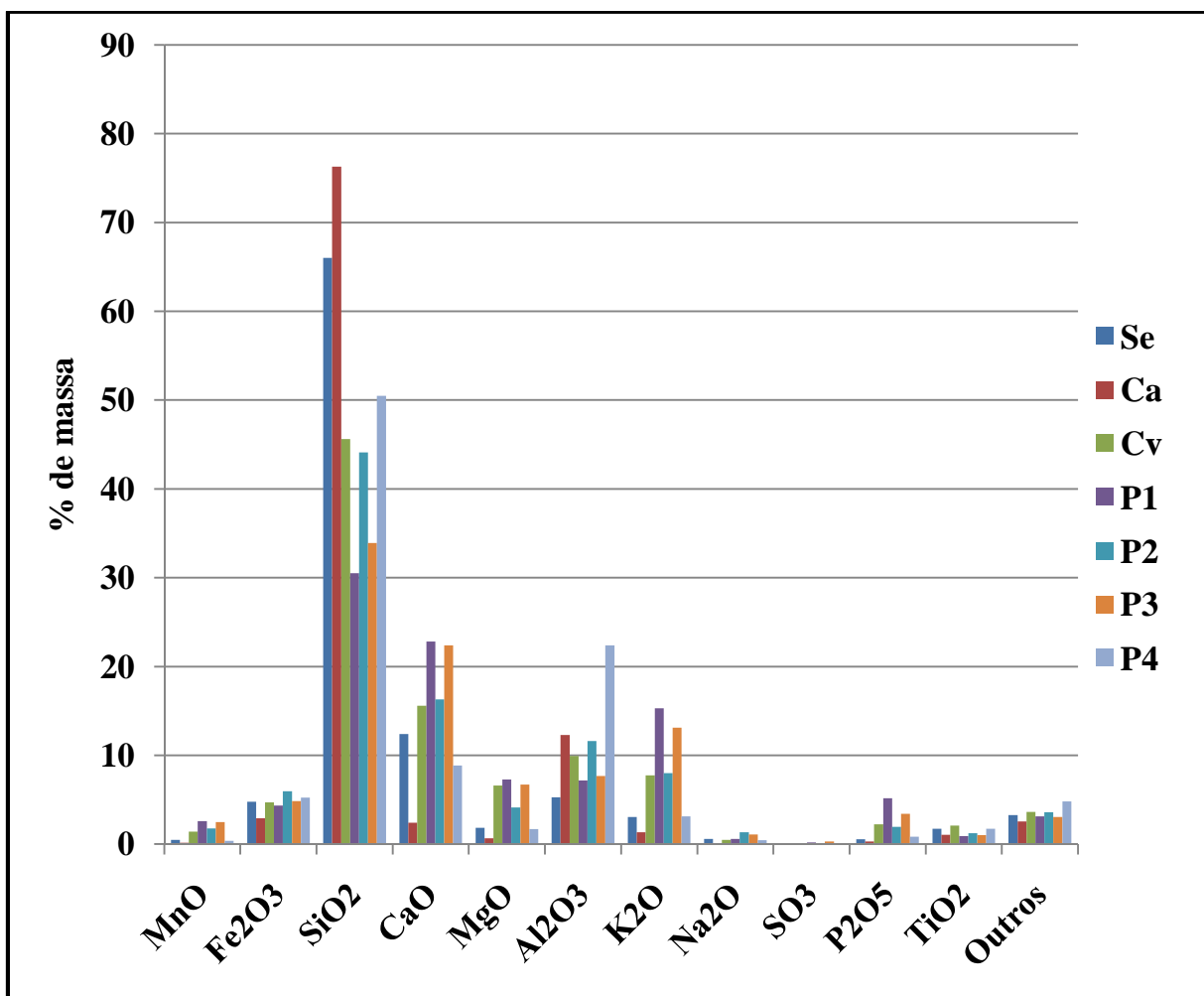


Figura 24: Composição das cinzas residuais dados como óxidos.

Como observado na Tabela 22 e também na Figura 24, valores baixos de óxido de enxofre foram detectados nas cinzas dos *pellets* P1 e *pellets* P4, já para os outros *pellets* e matérias, a concentração de enxofre é praticamente desprezível. Jenkins et al. (1996) relataram que a madeira contém baixos teores de enxofre, minimizando as emissões de SO_3 , que é um gás nocivo à saúde humana e um dos gases responsáveis pela chuva ácida.

5. CONCLUSÕES

Os *pellets* de madeira são combustíveis renováveis que têm bom potencial energético, principalmente no Brasil, devido às condições climáticas favoráveis à produção de madeira e sua indústria de base florestal.

Considerando o resultado das análises efetuadas nos biocombustíveis e nas condições em que foram feitos esses experimentos, pode-se concluir que:

- O poder calorífico inferior dos *pellets* P1, P3 e P4 não atingiu valores mínimos exigidos na norma austríaca $\geq 18\text{MJ/kg}$ e alemã que exige valores de 17,5 a 19,5 MJ/kg. Os *pellets* P2 obtiveram o melhor desempenho neste quesito com 18,13 MJ/kg;
- Quanto ao teor de umidade, os resultados mostraram que a maioria atingiu este parâmetro de qualidade, com exceção a algumas aplicações Super Premium (SP) e Premium (P) dos EUA que exigem teores de umidade abaixo de 8%;
- A durabilidade mecânica dos *pellets* P1, *pellets* P3 e *pellets* P4 está abaixo dos valores mínimos fixados pelas normas internacionais de qualidade, o que pode levar à produção de finos em excesso, gerando riscos de explosões nos navios cargueiros na exportação;
- Os *pellets* P2 têm durabilidade mecânica aceitável pelas normas internacionais, baixo teor de umidade e a mais alta densidade energética garantindo o melhor desempenho de qualidade entre as quatro amostras;
- As emissões gasosas de NO_x de todas as biomassas analisadas encontram-se abaixo dos 650 mg/Nm^3 para a referência de 8% de O_2 ;
- Das emissões gasosas de CO, apenas os *pellets* P2 e os *pellets* P4 ficaram dentro da faixa estipulada pela norma CONAMA;
- A Análise termogravimétrica mostrou que as amostras dos *pellets* de madeira têm comportamento similar, com três regiões bem definidas, intensa degradação térmica, para uma faixa de temperatura de 250°C a 400°C;
- O número de *pellets*, em 100 gramas das amostras, mostrou grandes variações entre os comprimentos dos *pellets* P1 e os *pellets* P4 tiveram o melhor resultado neste parâmetro;

- As emissões de monóxido de carbono da casca, acima da norma CONAMA, inviabilizam o seu uso doméstico. Para uso industrial, exige-se um equipamento de coleta de material particulado e gases da combustão;
- Não foram detectadas nas análises dos gases da combustão as emissões de óxidos de enxofre.
- Nas cinzas da combustão dos biocombustíveis estudados há predominância do elemento silício na forma de sílica, principalmente na casca de pinus.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Determinação da eficiência real dos queimadores de biomassa utilizando *pellets*;
- Balanço de energia na queima dos *pellets* de madeira;
- Produção, em escala de laboratório, de *pellets* de casca de pinus para análise da utilização de ligante no processo;
- *Blends* de *pellets* de madeira com outros resíduos;
- Estudo das variáveis que afetam o processo de densificação da biomassa;
- Segurança no transporte de *pellets* de madeira;
- Otimização do processo produtivo dos *pellets*.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALAKANGAS, E., VALTANEN, J.; LEVLIN, J. CEN-Technical Specification for Solid Biofuels-Fuel specification and classes. **Biomass and Bioenergy**. v.30, n.11, p.908-914, nov. 2006.

ALAKANGAS, E.; HEIKKINEN, A.; LENSU, T.; VESTSRINEN, P. Biomass fuel trade in Europe. Summary Report VTT-R-03508-07. EUBIONET II. [ppt]. Intelligent Energy Europe. Finlândia, 2007. 57p.

ALVAREZ, V.A.; VÁZQUEZ, A. Thermal degradation of cellulose derivatives/starch blends and sisal fiber biocomposites. **Polymer Degradation and Stability**. v.84, n.1, p.13–21, apr. 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA TÉCNICA DE CELULOSE E PAPEL/ABTCP, Normas Técnicas. São Paulo, ABTCP, 1974.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6922-Carvão vegetal - Ensaio físicos - Determinação da massa específica - Densidade a granel. Rio de Janeiro, 1981.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8112-Carvão vegetal – Análise Imediata. Rio de Janeiro, 1986.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14929 - Madeira-Determinação do teor de umidade de cavacos - Método por secagem em estufa. Rio de Janeiro, 2003.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D6522-Determination of Nitrogen Oxides, Carbon Monoxide and Oxygen Concentrations in Emissions from Natural Gas-Fired Reciprocating Engines, Combustion Turbines, Boilers and Process Heaters using Portable Analyzers. West Conshohocken, 2000.

BIOENERGY INTERNACIONAL. The pellets Map 2007. Stockholm: Lennart Ljungblom, n.29, dec. 2006, 48p.

BLEDZKI, A.K; SPERBER, V.E; FARUK, O. Natural and wood fiber reinforcement in polymers. Rapra Review Reports. United Kingdom: Rapra, 2002.v.13, 144p.

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

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. RESOLUÇÃO Nº. 382, de 26 de Dezembro de 2006, Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA, 2006. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res06/res38206.pdf>>. Acesso em 12 jan. 2011.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Balanço Energético Nacional. Brasília: BEN, 2009. 22p. Disponível em: < <http://www.mme.gov.br>>. Acesso em: 04 Abr. 2009.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION - Technical Specification CEN/TS 14961: Solid biofuels – fuel specification and classes. London, 2005.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION - Technical Specification CEN/TS 15.210-1: Methodos for determination mechanical durability of pellets. Solid biofuels – fuel specification and classes. London, 2005.

COLLEY, Z. Compaction of switchgrass for value-added utilization. **Bioresource Technology**, Alabama, v.99, n.12, p.1259-1266, dec.2008.

COUTO, L.; MÜLLER, M.D., SILVA, A.G.J.;NARDOTO, L.J.C. Produção de *pellets* de madeira – o caso da Bioenergy no Espírito Santo. Disponível em: <http://www.renabio.org.br/arquivos/p_producao_santo_31296.pdf>. Acesso em: 26 abr. 2010.7p.

DIAS, J.J.M. **Utilização da biomassa: avaliação dos resíduos e utilização de *pellets* em caldeiras domésticas**. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, 2002.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. DIN 51731: Testing of solid fuels – Compressed untreated wood, Requirements and testing. Berlin, 1996.

DEMIRBAS, A. Mechanisms of liquefaction and pyrolysis reactions of biomass. **Energy Conversion and Management**, Selcuk University, Konya, Turkey, v.41, n.6, p. 633-646, April, 2000.

DOLZAN, P.; BLANCHARD, M.P.; GRASSI, A.; HEINIMO, J.; JUNGINGER, M.; RANTA, T. IEA Bioenergy. Global Wood pellets Markets and Industry: Policy Drivers, Market Status and Raw Material Potential. Organizado pela IEA-International Energy Agency – Task 40. Paris, 2006. 112p.

ESKILSSON, D.; RÖNNBÄCK, M.; SAMUELSSON, J.; TULLIN, C. Optimisation of efficiency and emission in pellet burners, Proceedings of The First World Conference on pellets. **Biomass and Bioenergy**, Estocolmo, v.27, n.6, p.541-546. dec. 2004.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. The State of food and agriculture: Biofuels: prospects, risks and opportunities. Roma, 2008. 138 p. (ISBN 978-92-5-105980-7). Disponível em: <<http://www.fao.org/catalog/inter-e.htm>>. Acesso em: 26 dez. 2008.

FASINA, O.O., SOKHANSANJ, S. Hygroscopic moisture absorption by alfalfa cubes and pellets. ASABE 35, p.1611–1619, jan.1992.

FASINA, O.O. Physical properties of peanut hull pellets. Department of Biosystems Engineering, Auburn University. **Bioresource Technology**, Alabama, v.2, n.4, p. 1259–1266, oct. 2008.

FREDDO, A.; FOELKEL, C. E. B.; FRIZZO, S. M. B.; SILVA, M. C. M. Elementos minerais em madeiras de eucaliptos e acácia negra e sua influência na indústria de celulose Kraft branqueada. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.9, n.1, p.193-209, 1999.

FORSBERG, G. Biomass energy transport. Analysis of bioenergy transport chains using life cycle inventory method. **Biomass and Bioenergy**. Great Britain, v.19, n.15, p.17 - 30, Mar. 2000.

FPL - Forest Products Laboratory. Wood handbook-Wood as an engineering material. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-113. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1999, 463 p.

GARCIA, R. Combustíveis e combustão industrial. Rio de Janeiro: Interciência, 2002. 195p.

GHETTI, P.; RICCA, L.; ANGELINI, L. Thermal analysis of biomass and corresponding pyrolysis products. **FUEL**, v.75, n.5, p.565, apr.1996.

HAHN, B. Pellets for Europe. Existing Guidelines and Quality Assurance for Fuel pellets. St. Pölten, Áustria, 2004, 20p.

HEINIMO, J; JUNGINGERB, M. Production and trading of biomass for energy – An overview of the global status. Lappeenranta University of Technology, **Biomass and Bioenergy**, Finland, v.33, n.9, p. 1310-1320, sept.2009.

I.E.A. Global Wood Pellets Markets and Industry. Organizado pela IEA-International Energy Agency – Bioenergy Task 32. Paris, 2006. 87p.

JARA, E.R.P. O poder calorífico de algumas madeiras que ocorrem no Brasil. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, 1989.

JENKINS, B.; BAXTER, L.L.; MILES JR, T.R.; MILES, T.R.. Combustion properties of biomass, Biomass Usage for Utility and Industrial Power. Utah, Ed. Engineering Foundation Conferences, **Fuel Processing Technology**, v.54, n.9, p.17-46, nov. 1996.

KANURY, A.M. Combustion characteristics of biomass fuels, **Combustion Science and Technology**. New York, v. 97, n.6, p. 469-491, may. 1994.

LARSON, S. H.; THYREL, M.; GELADI, P.; LESTANDER, T.A. High quality biofuel pellet production from precompacted low density raw materials. Swedish University of Agricultural Sciences Faculty Of Natural Resources And Agricultural Sciences. **Bioresource Technology**, Umea, v. 99, n.5, p.7176-7182, aug. 2007.

LJUNGBLOM, L. Bioenergy International: Pellets are so hot. Stockholm: 17 ed., n.6, 2005. 28p.

LETHIKANGAS, P. Quality properties of pelletised sawdust, logging residues and bark. **Biomass and Bioenergy**, Uppsala, v.19, n.20, p.351-360, aug. 2001.

LIMA, C. R. Viabilidade econômica da produção de briquetes a partir da serragem de *Pinus* sp. Congresso Brasileiro de Planejamento Energético. SBPE, São Paulo, 1998.

LOO, S.V.; KOPPEJAN, J. The handbook of biomass combustion & co-firing. 1ª ed. Sterling: Earthscan, 2008. 465p.

MANFREDI, B.L.; RODRÍGUES, E. S.; WLADYKA-PRZYBYLAK, M.; VÁZQUEZ, A. Thermal degradation and fire resistance of unsaturated polyester modified acrylic resins and their composites with natural fibers. **Polymer Degradation and Stability**. v.91, n.2, p.255–261, feb.2006.

MANI, S.; SOKHANSANJ, S.; BI, X.; TURHOLLOW, A. Economics of producing fuel pellets from biomass. **Applied Engineering in Agriculture**. Vancouver, v. 22, n.3, p.421-426, feb. 2006.

MELLO, M. G. Biomassa Energia dos Trópicos em Minas Gerais. LabMídia / FAFICH, Belo Horizonte, 2001. 32p.

MORAIS, S. A. L.; NASCIMENTO, E. A.; MELO, D. C. Análise da madeira de *Pinus oocarpa* Parte I: Estudo dos constituintes macromoleculares e extrativos voláteis. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n. 3, p. 145-155, jun. 2005.

NASCIMENTO, G. A. **Aproveitamento de bagaço em usinas de álcool e açúcar – venda, queima ou hidrólise**. 2008.113f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista (FEG/UNESP). Guaratinguetá, 2008.

NIELSEN, N. P.K.; GARDNER, D. J.; FELBY, C. Effect of extractives and storage on the pelletizing process of sawdust. **FUEL**, Copenhagen, v.89, n.1, p.94-98, jan. 2009.

NYSTRÖM, K. Bioenergy in Sweden and Globally. Disponível em: <<http://www.svebio.se/?p=726>>. Acesso em: 28 maio 2010.

OBERNBERGER, I.; THEK, G. Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their composition behaviour, Proceedings of The First World Conference on pellets, **Biomass and Bioenergy**. Estocolmo, v.27, n.6, p.653-669, sep. 2002.

OLSSON, M. Emissions from burning of softwood pellets. **Biomass and Bioenergy**. Goteborg, v.27, n.6, p.607-611, dec. 2004.

OSTREICHES NORMUNGS INSTITUT. ONORM M 7135. Compressed wood or compressed bark in natural state – pellets and briquettes, Requirements and test specifications, Vienna, 2000.

OUAJAI, S.; SHANKS, R. A. Composition, structure and thermal degradation of hemp cellulose after chemical treatments. **Polymer Degradation and Stability**. v.89, n.2, p.327–335, aug. 2005.

PASTRE, O. Analysis of the technical obstacles related to the production and utilisation of fuel pellets made from agricultural residues. EUBIA, 2002, 107p.

QUIRINO, W.F. **Características e índice de combustão de briquetes de carvão vegetal**. 1991. 64f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais). ESALQ - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1991.

RAY, D.; SARKAR, B. K.; BASAK, R. K.; RANA, A. K. Thermal behavior of vinyl ester resin matrix composites reinforced with alkali-treated jute fibers. **Journal of Applied Polymer Science**, v.94, p.123-129, 2004. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/app.20754/pdf>>. Acesso em: 08 out. 2010.

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

ROSILLO-CALLE, F.; HEMSTOCK, S.; GROOT, P.; WOODS, J. The Biomass Assessment Handbook: Bioenergy for a Sustainable Environment. Earthscan, London, 2007. 276p.

SHAW, M. **Feedstock and process variables influencing biomass densification**. 2008. 159f. Thesis (Master of Science). Department of Agricultural and Bioresource Engineering University of Saskatchewan. Saskatoon, 2008.

SHEBANI, A.N.; Van Reenen, A.J.; Meincken, M. The effect of wood extractives on the thermal stability of different wood species. **Thermochimica Acta**. V.471, n.1-2, p.43–50, may. 2008.

SIMÕES, V.P.M. **Produção de briquetes de carvão vegetal com alcatrão de madeira**. 2000. 53f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2000.

SWEDISH STANDARDS. SS187180: Biofuels and Peat-Determination of mechanical durability of pellets and briquettes. Classification Swedish Standards. Stockholm, 1999.

STAHL, M.; GRANSTRÖM, K.; BERGHEL, J.; RENSTRÖM, R. Industrial processes for biomass drying and their effects on the quality properties of wood pellets. **Biomass and Bioenergy**, Karlstad, Sweden, v. 27, n.6, p. 621-628, dec.2004.

TABARÉS, J.; ORTIZ, L.; GRANADA, E.; VIAR, F.P. Feasibility study of energy use for densificated lignocellulosic material (briquettes). **FUEL**, Oviedo, Spain, v.79, n.10, p.1229-1237, jun. 2000.

VERDESIO, J.J. Viabilidade das energias renováveis no Brasil. Universidade de Brasília. Brasília, 2008.68p.

VIAK, A. Wood pellets in Europe – State of the art, technologies, activities, markets. AEBIOM, Editor UMBERA. Part of the Thermie B project, Oslo, 2000.88p.

W.P.A.C. Wood Pellet Association of Canada. Disponível em: <<http://www.pellet.org>>. Acesso em: 16 Abr. 2008.

WERTHER, J.; SAENGER, M.; HARTGE, E.U.; OGADA, T.; SIAGI, Z. Combustion of agricultural residues. **Progress in Energy and Combustion Science**. Hamburg, Germany, v.26, n.1, p.1-27, feb. 2000.

WIKIPÉDIA. Desenvolvido pela Wikimedia Foundation. Apresenta conteúdo enciclopédico. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Densidade_aparente>. Acesso em: 19 maio 2010.

YORULMAZ, S.Y.; ATIMTAY, A.T. Investigation of combustion kinetics of treated and untreated waste wood samples with thermogravimetric analysis, **Fuel Processing Technology**, v.90, v. 7-8, p. 939-946, sept. 2009.

GLOSSÁRIO

Carbonização ou Pirólise . É o mais simples e mais antigo processo de conversão, o processo consiste em aquecer o material original, na “quase-ausência” de ar, até que o material volátil seja retirado.

Celulose (C₆H₁₀O₅)_n. É um polissacarídeo que se apresenta como um polímero de cadeia linear com comprimento suficiente para ser insolúvel em solventes orgânicos, água, ácidos e álcalis diluídos, à temperatura ambiente, consistindo única e exclusivamente de unidades de β-D- anidroglicopirranose, que se ligam entre si através dos carbonos C1-C4 , possuindo uma estrutura organizada e parcialmente cristalina. Na madeira, a celulose da parede das fibras representa de 40 a 45% do peso seco.

Combustão direta. É a transformação da energia química dos combustíveis em calor, por meio das reações dos elementos constituintes com o oxigênio fornecido.

Craqueamento térmico. É também chamado de pirólise, pois o processo provoca a quebra de moléculas por aquecimento a altas temperaturas, isto é, pelo aquecimento da substância na ausência de ar ou oxigênio, formando uma mistura de compostos químicos com propriedades muito semelhantes às do diesel de petróleo.

Digestão Anaeróbia. Assim como a pirólise, ocorre na ausência de ar, mas, nesse caso, o processo consiste na decomposição do material pela ação de bactérias. Trata-se de um processo simples, que ocorre naturalmente com quase todos os compostos orgânicos.

Energia Renovável. São os recursos naturais que se repõe como a água, a madeira, a cana-de-açúcar entre outras.

Energia Limpa. É aquela que não polui o meio ambiente na produção e no consumo, como a energia hídrica, a eólica e a solar. A energia limpa é um objetivo que deve ser constantemente pesquisado e aprimorado.

Energia Sustentável. É a que dá sustentação à produção e ao consumo, porque se encontra disponível para uso no decorrer do tempo. O conceito leva em conta a preservação do equilíbrio ambiental, mas não significa necessariamente que seja energia limpa. A madeira, por exemplo, é um recurso sustentável, mas libera poluentes na combustão; portanto, não é limpa.

Eucalipto. Do grego, *eu* + *καλύπτω* = "verdadeira cobertura". É a designação vulgar das várias espécies vegetais do género *Eucalyptus*, em termos gerais, são árvores nativas da Oceania, onde constituem, de longe o género dominante da flora. O género inclui mais de 700 espécies, quase todas originárias da Austrália, existindo apenas um pequeno número de espécies próprias dos territórios vizinhos da Nova Guiné e Indonésia, e mais uma espécie no sul das Filipinas.

Fermentação. É um processo biológico anaeróbio em que os açúcares de plantas como a batata, o milho, a beterraba e, principalmente, a cana-de-açúcar são convertidos em álcool, por meio da ação de microrganismos.

Gaseificação. É um processo de conversão de combustíveis sólidos em gasosos, por meio de reações termoquímicas, envolvendo vapor quente e ar, ou oxigênio, em quantidades inferiores à estequiométrica (mínimo teórico para a combustão).

Hemiceluloses. São polissacarídeos de cadeias ramificadas que estão estruturalmente associados à celulose nas plantas e são depositadas na parede das células em um estágio anterior à lignina. A natureza química das hemiceluloses varia, nas plantas, de tecido para tecido e de espécie para espécie. Elas são compostas por vários açúcares que formam macromoléculas de baixa massa. São classificadas basicamente de acordo com os açúcares presentes na cadeia principal da macromolécula: xilanas, mananas, glucanas, galactanas e pectinas. Na madeira, elas representam em torno de 20 a 35% do peso seco.

Lenha. Resíduo de maiores dimensões, gerado em todos os tipos de indústria, composto por costaneiras, aparas, refilos, resíduos de topo de tora, restos de lâminas.

Lignina (C₄₀H₄₄O₆). São macromoléculas heterogêneas, aromáticas, amorfa e de estrutura química complexa e tridimensional de alta massa molar, encontrada em toda a parede celular, principalmente na lamela média, cuja a função é de aumentar a rigidez e a impermeabilidade à água da parede celular. É encontrada em muitas plantas, porém sua constituição é muito variável: por isso, não é considerada como uma substância química, mas sim como uma classe de compostos correlatos. A composição química elementar da lignina é única e exclusivamente formada de carbono, hidrogênio e oxigênio. Na madeira, a lignina da parede das fibras representa de 15 a 35% do peso seco.

Liquefação. Produz combustível líquido por meio da reação da biomassa triturada, em um meio líquido com monóxido de carbono, em presença de um catalisador alcalino.

Matriz energética. O conjunto da produção e do consumo de energia, dos materiais utilizados no mundo e do modo como são utilizados.

Pirólise (do Grego **pyr, pyrós** = fogo + **lýsis** = dissolução) - Em sentido estrito é uma reação de análise ou decomposição que ocorre pela ação de altas temperaturas. Ocorre uma ruptura da estrutura molecular original de um determinado composto pela ação do calor em um ambiente com pouco ou nenhum oxigênio.

Poder calorífico. Poder calorífico é a quantidade de energia liberada durante a combustão completa de uma unidade de massa ou de volume de combustível, tendo como unidade de medida a caloria, quilocaloria ou Joule por unidade de massa. O poder calorífico pode ser definido com poder calorífico superior, inferior e líquido.

Poder calorífico superior (PCS). É determinado em bomba calorimétrica, onde toda energia gerada fica retida dentro do recipiente de combustão, sendo que a água formada durante o processo é condensada, representando assim a quantidade máxima de energia obtida de um combustível. Nos combustíveis que originam água nos produtos da combustão, além do poder calorífico superior, obtêm-se um poder

calorífico inferior (PCI). Tanto o PCS quanto o PCI são calculados em base seca, ou seja, a 0% de umidade.

Poder calorífico inferior (PCI). É o valor obtido após ser descontada a energia consumida para evaporar a água formada durante o processo de combustão. Esta variável é influenciada pela porcentagem de hidrogênio contido no combustível.

Serragem. Resíduo originado da operação de serras, encontrado em todos os tipos de indústria, à exceção das laminadoras.

Teor de cinzas. O teor de cinzas da biomassa florestal representa a porcentagem de componentes minerais contidos no material através da agregação ao longo da vida do vegetal, ou por contaminação durante os processos de colheita, transporte e manuseio. As cinzas se constituem no resíduo após a combustão completa da biomassa.

Tep. Tonelada equivalente de petróleo (tep), que é a conversão do poder de liberar calor na combustão dos diversos materiais para o petróleo como forma de fazer a comparação entre eles. A Agência Internacional de Energia (AIE)/OECD define 1 tep como 41,868 GJ.

Transesterificação. É um processo químico que consiste na reação de óleos vegetais com um produto intermediário ativo (metóxido ou etóxido), oriundo da reação entre alcoóis (metanol ou etanol) e uma base (hidróxido de sódio ou de potássio). Os produtos dessa reação química são a glicerina e uma mistura de ésteres etílicos ou metílicos (biodiesel).

Turfa. É um material de origem vegetal, parcialmente decomposto, encontrado em camadas, geralmente em regiões pantanosas e também sobre montanhas (turfa de altitude). É formada principalmente por *Sphagnum* (grupo de musgos) e *Hypnum*, mas também de juncos, árvores, etc. Sob condições geológicas adequadas, transformam-se em carvão, através de emissões de metano vindo das profundezas e da preservação em ambiente sem oxigênio. É utilizada como combustível para aquecimento doméstico na forma de *pellets*.