



**Gabriel Pena Vergara**

**Caracterização e Avaliação do Potencial  
Energético dos Resíduos Florestais da  
Indústria de Papel e Celulose**

39/2014

CAMPINAS

2014



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**Gabriel Pena Vergara**

# **Caracterização e Avaliação do Potencial Energético dos Resíduos Florestais da Indústria de Papel e Celulose**

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, na Área de Térmica e Fluidos.

Orientador: Prof. Dr. Waldir Antonio Bizzo

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO ALUNO Gabriel Pena Vergara, E ORIENTADA PELO PROF. DR. Waldir Antonio Bizzo.

A handwritten signature in blue ink, consisting of several loops and flourishes, positioned above a horizontal dotted line.

ASSINATURA DO ORIENTADOR

CAMPINAS

2014

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

P32c Pena Vergara, Gabriel, 1986  
Caracterização e Avaliação do Potencial Energético  
dos Resíduos Florestais da Indústria de Papel e Celulose \\  
Gabriel Pena Vergara. - Campinas, SP: [s.n.], 2014.

Orientador: Waldir Antonio Bizzo.  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de  
Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Biomassa - Combustão. 2. Recursos florestais.  
3. Celulose 4. Papel.

I. Bizzo, Waldir Antonio II. Universidade Estadual  
de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica.  
III. Título.

Título em Inglês: Characterization and Energy Potential Assessment of the  
Forestry Residues from the Paper and Pulp Industry.  
Palavras-chave em Inglês: Biomass - Combustion, Forest resources, Cellulose, Paper  
Área de concentração: Térmica e Fluidos - Combustão e Controle de Poluição  
Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica  
Banca Examinadora: Waldir Antonio Bizzo [Orientador]  
Profa. Dra. Araí Augusta Bernárdez Pécora  
Prof. Dr. Edgardo Olivares Gómez  
Data da defesa: 26-02-2014  
Programa de Pós Graduação: Engenharia Mecânica

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**  
**DEPARTAMENTO DE ENERGIA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO**

**Caracterização e Avaliação do Potencial  
Energético dos Resíduos Florestais da  
Indústria de Papel e Celulose**

Autor: Gabriel Pena Vergara

Orientador: Waldir Antonio Bizzo

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:



---

**Prof. Dr. Waldir Antonio Bizzo, Presidente**

**DE/FEM/UNICAMP**



---

**Profa. Dra. Araí Augusta Bernárdez Pécora**

**DE/FEM/UNICAMP**



---

**Prof. Dr. Edgardo Olivares Gómez**

**FEAGRI/CTBE - CAMPINAS**

Campinas, 26 de Fevereiro de 2014.

## **Dedicatória**

Dedico este trabalho às novas e futuras gerações, especialmente a meu sobrinho Felipe Pena, pelas quais devemos nos esforçar cada dia em construir uma sociedade mais igualitária e um jeito de viver mais amigável com o meio ambiente.

## Agradecimentos

Ao meu orientador, Prof. Dr. Waldir A. Bizzo, por essa oportunidade e confiança na minha capacidade, pelo seu apoio e incentivo ao longo desse período.

À Agencia Nacional de Investigación e Inovação (ANII - Agencia Nacional de Investigación e Innovación), pelo indispensável apoio financeiro.

Às pessoas que colaboraram na realização das análises. Jorge Luiz Colodette e Gustavo Souza Lima Bittencourt de Souza da UFV; Fernanda Miranda Mendes, Carlos Eduardo Driemeier e Talita Mazon do CNPM; Tereza Losada Valle do IAC.

À LME - LNNano - CNPEM pelo suporte técnico durante o trabalho de microscopia eletrônica.

Ao Gabriel Pisciotano e Pedro Curto da Faculdade de Engenharia - UdelaR, pelo apoio e incentivo para continuar com minha formação acadêmica.

Aos meus pais, Pedro Pena e Adriana Vergara, que sempre me apoiaram nas minhas decisões e incentivaram a estudar, vendo no saber e na educação seu grande e verdadeiro valor.

Aos meus amigos e companheiros da faculdade, Germán Navarrete, Diego Franco, Diego Rueda, Laidy Hernandez, Handel Saracho, Danilo Carvalho e Luiz Augusto Badan, pela sua amizade e por ter compartilhado esse tempo comigo.

A todas as pessoas que conheci nestes dois anos, principalmente aos colombianos, mas também aos peruanos, argentinos, espanhóis, alemães, uruguaios e brasileiros, os quais abriram minha cabeça e fizeram da estadia no Brasil uma experiência incrível.

A todos meus amigos no Uruguai, que fizeram cada uma das minhas viagens muito especial e cheia de emoções.

Por fim, a minha namorada, amiga e companheira, Inês Carriquiry, por quem foi possível ter vivido essa experiência, além de ser a pessoa que me apóia, ajuda e motiva todos os dias e que faz com que eu veja o mundo de forma mais alegre.

*A educação é a mais poderosa arma que  
podemos usar para mudar o mundo.*

---

Nelson Mandela

## Resumo

A indústria de papel e celulose é a principal consumidora de biomassa como combustível e como matéria-prima, gerando resíduos de biomassa, os quais representam uma grande quantidade de energia disponível. A produção de papel e celulose necessita de grandes quantidades de energia tanto mecânica quanto térmica, a qual usualmente é produzida através da queima de biomassa. Além dos resíduos gerados na própria indústria, a cadeia de produção de papel e celulose envolve uma importante atividade florestal, da qual é aproveitada a madeira e geralmente deixando no campo resíduos, os quais representam entre 15 e 25% da massa seca da árvore. Este trabalho de pesquisa enfoca-se na caracterização como combustível dos resíduos sólidos gerados no campo (folhas, cascas, galhos e pontas) e na produção de papel e celulose (finos, cascas, cavacos e lodo orgânico). Também é estimado o potencial de geração de energia elétrica pela combustão dos resíduos de biomassa através do ciclo Rankine. A caracterização baseia-se em uma série de análises pelos quais é estudada a degradação térmica (análises térmicas - TGA e DSC), e determinada a composição elementar, imediata e estrutural, poder calorífico e massa específica. São caracterizadas também as cinzas determinando sua composição elementar. O material empregado é proveniente de um híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*. As biomassas estudadas apresentam-se apropriadas para ser empregadas como combustível em fornalhas industriais. Os resíduos florestais e os rejeitos de madeira da fábrica têm algumas desvantagens em relação a outras biomassas como a madeira. Estas desvantagens são o teor de cinzas, principalmente nas folhas e casca (3 a 5% b.s.), a elevada umidade (acima de 50% b.u.) e sua difícil manipulação. Porém, essas biomassas melhoram suas propriedades com o passar do tempo do material no campo, diminuindo sua umidade e reduzindo o teor de cinzas, cloro e potássio. A combustão do lodo pode ser energeticamente deficiente devido ao seu elevado teor de umidade e baixo poder calorífico. O potencial de geração de energia elétrica é elevado, desde que a produtividade dos resíduos é grande e seu poder calorífico similar à madeira original. Conclui-se que sem considerar as questões de logística, os resíduos de biomassas em questão têm grande potencial energético ainda não aproveitado.

*Palavras-chave:* Biomassa - Combustão, Recursos florestais, Celulose, Papel.

## Abstract

The pulp and paper industry is the major consumer of biomass fuels and feedstock, as a result it generates biomass waste, which represents a great amount of heat energy available. The production of pulp and paper requires large quantities of mechanical and heat energy. This energy is usually supplied by burning biomass in boilers, generating steam that is used as heat source and to generate electricity. Besides the waste generated in the industry, the paper and pulp production chain involves an important forestry activity, in which generally the wood is taken and the biomass residues are leaved at the forest. That represents between 15 and 25% of the tree dry mass. This research focuses on the solid residues generated at the forest (bark, branches, tips and leaves) as well as in the production of pulp and paper (fines, bark, organic sludge and chips), characterizing them as fuel. The objective is also estimate the electric potential of the combustion of biomass residues through the steam Rankine cycle. The characterization is based on a range of analysis, studding the thermal degradation (thermal analysis - TG and DSC), and determining the elemental and immediate composition, heating value, density and chemical structure. Also, the ash elemental composition is established. The material used is taken from an hybrid of *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*. The studied biomass is suitable to be used as fuel in industrial furnaces. The forestry residues and factory wood rejects have some disadvantages regarding to others biomass like wood. The main disadvantages are the ash content, especially in the leaves and bark (between 3 and 5% d.b.), high moisture (above 50% w.b.) and its handling difficult. However, the chemistry properties of the biomass improve as it remains at the forest for a period of time, decreasing its moisture and reducing the ash, chlorine and potassium contents. The organic sludge combustion could be energy deficient due to its high moisture and its low heating value. The electric potential is high, since the productivity of waste is large and its heating value is similar to the original wood. We conclude that without considering the logistics issues, the biomass waste has great energy potential, generally untapped.

*Keywords:* Biomass - Combustion, Forest resources, Cellulose, Paper.

## Lista de Figuras

2.1	Produção de polpa de celulose no Brasil (ABRAF, 2013) . . . . .	6
2.2	Matriz energética da indústria de papel e celulose no Brasil (BRACELPA, 2013e) .	11
2.3	Consumo final energético no Uruguai - setor industrial (MIEM, 2011) . . . . .	12
2.4	Exploração florestal no Uruguai. . . . .	17
2.5	Maquinaria para realizar a colheita mecanizada das toras. . . . .	19
2.6	Esquema geral dos componentes químicos da madeira (FENGEL; WEGENER, 1984). . . . .	28
2.7	Configurações da injeção do ar secundário (YIM; ROSENDAHL; KAER, 2008) . .	36
2.8	Fornecimento de ar e as diferentes zonas da combustão na fornalha de leito fixo (YIM; ROSENDAHL; KAER, 2008). . . . .	36
2.9	(A) Caldeira com grelha basculante; (B) Grelha mecânica ou caminhante; (C) Caldeira com grelha inclinada; (D) Grelha rotativa contracorrente (ELECTRONUCLEAR, 2008) . . . . .	39
2.10	Grelha mecânica vibrante (KITTO; STULTZ, 2005c) . . . . .	40
2.11	(a) Fornalha de leito fluidizado circulante; (b) Fornalha de leito fluidizado borbulhante (KHAN et al., 2009) . . . . .	42
2.12	Esquema das reações de fase sólida envolvendo Cl-espécies nas deposições (YIM; ROSENDAHL; KAER, 2008) . . . . .	48
2.13	Zonas das deposições nas caldeiras (KITTO; STULTZ, 2005b) . . . . .	48
2.14	Esquema das deposições da palha de trigo formadas na parte superior de uma sonda (YIM; ROSENDAHL; KAER, 2008) . . . . .	49
2.15	Principais caminhos do potássio, enxofre e cloro em uma caldeira de biomassa (KHAN et al., 2009) . . . . .	50
3.1	Fotografias da floresta e da disposição dos resíduos no campo. . . . .	54
3.2	Fotografias dos moinhos empregados na preparação das amostras. . . . .	55
3.3	Fotografias dos estágios de preparação de algumas das amostras. . . . .	55

3.4	Fotografia dos cadinhos após análise imediata. Cadinhos da parte superior: Cinzas da determinação do teor de cinzas; Cadinhos da parte inferior: Carvão da determinação do teor de voláteis. . . . .	60
3.5	Fotografia das amostras para realizar a análise elementar das cinzas - EDS. . . . .	62
3.6	Esquema do ciclo Rankine simples. . . . .	66
3.7	Esquema do ciclo Rankine com reaquecimento. . . . .	67
3.8	Diagrama Temperatura vs Entropia do ciclo da Figura 3.7. . . . .	68
3.9	Esquema do balanço térmico da caldeira. . . . .	69
4.1	Distribuição granulométrica das folhas de 32 dias. . . . .	77
4.2	Diagrama de classificação da fluidização de partículas (GELDART, 1973). . . . .	79
4.3	Diagrama de classificação que mostra as diferenças na composição de diferentes amostras de biomassa e carvão (JENKINS et al., 1998). . . . .	86
4.4	Análises térmicas dos cavacos. . . . .	90
4.5	Análises térmicas dos galhos do dia. . . . .	91
4.6	Análises térmicas das cascas do dia. . . . .	91
4.7	Análises térmicas das folhas do dia. . . . .	92
4.8	Análises térmicas do lodo orgânico. . . . .	93
4.9	Análises térmicas das cinzas das folhas. . . . .	95
A.1	Análises térmicas das folhas do dia. . . . .	118
A.2	Análises térmicas das cascas do dia. . . . .	118
A.3	Análises térmicas dos galhos do dia. . . . .	119
A.4	Análises térmicas dos cavacos. . . . .	119
A.5	Análises térmicas do lodo orgânico. . . . .	120
A.6	Análises térmicas das cinzas das folhas de 32 dias. . . . .	120
A.7	Análises térmicas das cinzas das cascas de 32 dias. . . . .	121
A.8	Análises térmicas das cinzas dos galhos de 32 dias. . . . .	121
A.9	Análises térmicas das cinzas dos cavacos. . . . .	122
A.10	Análises térmicas das cinzas do lodo orgânico. . . . .	122
A.11	Análises térmicas das folhas do dia (Versão 2). . . . .	123

A.12	Análises térmicas das cascas do dia (Versão 2).	124
A.13	Análises térmicas dos galhos do dia (Versão 2).	125
A.14	Análises térmicas dos cavacos (Versão 2).	126
A.15	Análises térmicas do lodo orgânico (Versão 2).	127
A.16	TGA comparativa das biomassas.	128
A.17	DTG comparativa das biomassas.	129
A.18	DSC comparativa das biomassas.	130
A.19	dDSC comparativa das biomassas.	131
A.20	Análises térmicas das cinzas das folhas de 32 dias (Versão 2).	132
A.21	Análises térmicas das cinzas das cascas de 32 dias (Versão 2).	133
A.22	Análises térmicas das cinzas dos galhos de 32 dias (Versão 2).	134
A.23	Análises térmicas das cinzas dos cavacos (Versão 2).	135
A.24	Análises térmicas das cinzas do lodo orgânico (Versão 2).	136
A.25	TGA comparativa das cinzas.	137
A.26	DTG comparativa das cinzas.	138
A.27	DSC comparativa das cinzas.	139
A.28	dDSC comparativa das cinzas.	140
B.1	Distribuição granulométrica das folhas e cascas.	142
B.2	Distribuição granulométrica dos galhos e cavacos.	143
B.3	Distribuição granulométrica das pontas, finos e casca + lascas.	144

## Lista de Tabelas

2.1	Rendimento em polpa sobre a madeira dos processos de polpação . . . . .	7
2.2	Demanda de energia na produção de polpa de celulose (por tonelada de celulose) (HOLMBERG; GUSTAVSSON, 2007) . . . . .	10
2.3	Área de Florestas Plantadas Total e para Celulose - Espécie e Região (1.000 ha) . .	14
2.4	Produtividade Florestal ( $m^3.ha^{-1}.ano^{-1}$ com casca) . . . . .	15
2.5	Consumo brasileiro de madeira em tora para uso industrial (1.000 $m^3$ ) . . . . .	16
2.6	Porcentagem em massa das frações da árvore de eucalipto (b.s.) . . . . .	20
2.7	Classificação das fornalhas para biomassa (SILVA-LORA; ZAMPIERI, 2008) . . .	33
2.8	Comparação entre as fornalhas de leito fixo e leito fluidizado. Adaptado de (YIM; ROSENDAHL; KAER, 2008) . . . . .	46
2.9	Exemplos de indústrias europeias de papel e celulose as quais queimam resíduos de biomassa (MONTE et al., 2009). . . . .	51
3.1	Amostras de biomassa . . . . .	54
3.2	Análises aplicadas para a caracterização das biomassas e suas cinzas. . . . .	57
3.3	Relações entre as massas das frações da árvore e a geração por hectare por ano. . .	64
3.4	Resíduos da produção de papel e celulose. . . . .	64
3.5	Parâmetros da combustão escolhidos . . . . .	71
4.1	Umidade <i>in natura</i> dos resíduos florestais (% , b.u.) . . . . .	74
4.2	Umidade <i>in natura</i> dos resíduos da fábrica (% , b.u.) . . . . .	74
4.3	Massa específica da biomassa seca. . . . .	76
4.4	Diâmetro médio de Sauter ( $\mu m$ ). . . . .	78
4.5	Composição Imediata média (% , b.s.) . . . . .	80
4.6	Composição estrutural (% , b.s.) . . . . .	82
4.7	Composição elementar das biomassas (b.s.) . . . . .	84
4.8	Poder calorífico ( $MJ.kg^{-1}$ ) . . . . .	87
4.9	Poder calorífico calculado a partir de correlações empíricas ( $MJ.kg^{-1}$ ) . . . . .	89

4.10	Comparação do teor de voláteis determinado a partir da TGA e da análise imediata (% massa, b.s.). . . . .	94
4.11	Análise elementar das cinzas (% massa). . . . .	96
4.12	Análise elementar das cinzas - Principais óxidos (% massa). . . . .	98
4.13	Índices de ocorrência de deposição de cinzas. . . . .	98
4.14	Dados e resultados da estequiometria e do balanço térmico da caldeira para os resíduos do campo. . . . .	100
4.15	Eficiência térmica da caldeira para os resíduos do campo (%). . . . .	101
4.16	Geração de energia e potência elétrica por hectare. . . . .	102
4.17	Potencial energético dos estados do Brasil a partir da utilização de 50% dos resíduos de campo. . . . .	104
4.18	Potencial energético dos resíduos da fabricação de papel e celulose. . . . .	105

## Nomeclatura

F.0d	Folhas do dia.
F.32d	Folhas de 32 dias no campo.
F.94d	Folhas de 94 dias no campo.
C.0d	Cascas do dia.
C.32d	Cascas de 32 dias no campo.
C.94d	Cascas de 94 dias no campo.
G.0d	Galhos do dia.
G.32d	Galhos de 32 dias no campo.
G.94d	Galhos de 94 dias no campo.
P.0d	Pontas do dia.
P.32d	Pontas de 32 dias no campo.
Cav.	Cavacos.
C+L	Cascas + Lascas.
Lodo	Lodo Orgânico.
$W_e$	Energia elétrica produzida por ano.
$\dot{W}_e$	É a potência elétrica.
$Q_{cald}$	Energia recuperada na caldeira por quilograma de combustível queimado.
$\eta_{ciclo}$	Eficiência térmica do ciclo termodinâmico.
$\eta_{ger}$	Eficiência do gerador elétrico.
$Sup$	Área plantada considerada para o cálculo.
$\dot{M}$	Quantidade de massa seca de cada resíduo gerada por hectare por ano.
$HTP$	Horas de trabalho da planta por ano.
$\rho_{basica}$	Massa específica básica da tora.
$\eta_{Frac}$	Quociente entre as massas secas do resíduo e da tora.
PCS	Poder calorífico superior.
PCI	Poder calorífico inferior.

$\rho_a$	Massa específica aparente.
$\rho_L$	Massa específica do leite.
$\bar{d}_p$	Diâmetro médio de Sauter.
$\eta_{cald}^{PCS}$	Eficiência da caldeira segundo o PCS.
$\eta_{cald}^{PCI}$	Eficiência da caldeira segundo o PCI.
$AI$	Índice alcalino.
$R_{b/a}$	Relação base-ácido.
$BAI$	Índice de aglomeração.
Prod. c.c	Produtividade de madeira com casca.
$W_e$	Energia elétrica.
$W_t$	Energia térmica.

# SUMÁRIO

<b>Resumo</b>	<b>xiii</b>
<b>Abstract</b>	<b>xv</b>
<b>Lista de figuras</b>	<b>xvii</b>
<b>Lista de tabelas</b>	<b>xxi</b>
<b>Nomeclatura</b>	<b>xxiii</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivos . . . . .	3
<b>2 REVISÃO DA LITERATURA</b>	<b>5</b>
2.1 Produção de papel e celulose . . . . .	5
2.1.1 Matéria prima . . . . .	5
2.1.2 Polpação . . . . .	6
2.1.3 Consumo energético . . . . .	10
2.2 Florestas de eucalipto . . . . .	12
2.2.1 Florestas no Brasil . . . . .	13
2.2.2 Florestas no Uruguai . . . . .	16
2.2.3 Colheita das toras . . . . .	18
2.2.4 Resíduos florestais . . . . .	19
2.3 Caracterização das biomassas . . . . .	23
2.3.1 Teor de umidade <i>in natura</i> . . . . .	24
2.3.2 Propriedades físicas . . . . .	25
2.3.3 Análise imediata . . . . .	26
2.3.4 Análise elementar . . . . .	26
2.3.5 Poder calorífico . . . . .	26

2.3.6	Composição estrutural . . . . .	27
2.3.7	Decomposição térmica . . . . .	29
2.3.8	Análise das cinzas . . . . .	31
2.4	Tecnologias da combustão da biomassa . . . . .	31
2.4.1	Classificação das fornalhas para a combustão de biomassa . . . . .	33
2.4.2	Fornalhas de leito fixo . . . . .	34
2.4.3	Fornalhas de leito fluidizado . . . . .	41
2.4.4	Outras fornalhas de queima em suspensão . . . . .	44
2.4.5	Eficiência das caldeiras . . . . .	44
2.4.6	Comparação entre as fornalhas de leito fixo e leito fluidizado . . . . .	45
2.4.7	Influência das cinzas . . . . .	45
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>53</b>
3.1	Amostragem . . . . .	53
3.1.1	Colheita de amostras . . . . .	53
3.1.2	Preparação das amostras . . . . .	54
3.2	Análises . . . . .	56
3.2.1	Massa específica . . . . .	56
3.2.2	Distribuição granulométrica . . . . .	58
3.2.3	Análise imediata . . . . .	59
3.2.4	Análise elementar . . . . .	59
3.2.5	Poder calorífico . . . . .	60
3.2.6	Composição estrutural . . . . .	60
3.2.7	Análises térmicas . . . . .	61
3.2.8	Análise elementar das cinzas . . . . .	61
3.3	Cálculo do Potencial Energético . . . . .	62
3.3.1	Cálculo da massa dos resíduos de biomassa . . . . .	63
3.3.2	Ciclo termodinâmico . . . . .	65
3.3.3	Eficiência e balanço térmico da caldeira . . . . .	67

<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>73</b>
4.1	Resultados das análises e discussão . . . . .	73
4.2	Potencial energético . . . . .	99
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES</b>	<b>107</b>
	<b>Apêndice A</b> Análises térmicas	<b>117</b>
	<b>Apêndice B</b> Distribuição granulométrica	<b>141</b>

# 1. INTRODUÇÃO

Do ponto de vista ambiental, a sustentabilidade do desenvolvimento depende, entre outras medidas, da redução das emissões de gases poluentes, da conservação do solo, da não contaminação das águas, da exploração racional dos recursos fósseis e dos recursos naturais renováveis. Entre as atividades humanas, a produção e o consumo de energia são das mais intensivas na utilização de recursos naturais. Por outro lado, também são das principais fontes de emissões de poluentes (COUTO; MÜLLER, 2008).

Atualmente, os combustíveis fósseis como o petróleo, carvão mineral e gás natural, representam a fonte de energia principal no mundo (aproximadamente 80%). Porém, a biomassa é vista como a fonte de energia mais promissora para mitigar a emissão dos gases de efeito estufa. Hoje a biomassa contribui entre 10 e 15% da demanda, sendo essa porcentagem maior nos países em desenvolvimento (20 a 30%) e menor nos países industrializados (9 a 14%) (KHAN et al., 2009). Além das emissões neutras de  $CO_2$ , a biomassa é relativamente abundante e uniforme no mundo todo, podendo fornecer entre 14 e 50% da energia consumida no mundo (PÉREZ et al., 2008).

Biomassa é o nome dado para qualquer matéria orgânica que é derivada das plantas. É difícil de conseguir uma definição aceita de forma geral. Uma possível definição é toda matéria orgânica não fóssil e biodegradável originária das plantas, animais e micro-organismos. Isso inclui produtos, subprodutos e resíduos agrícolas, florestais e industriais relacionadas, assim como resíduos orgânicos industriais e urbanos biodegradáveis e não fósseis. A biomassa também inclui os gases e líquidos gerados na decomposição de matéria orgânica. A biomassa envolve as espécies biológicas vivas ou que estiveram vivas recentemente, as quais podem ser empregadas como combustível ou na indústria química (BASU, 2010; SAIDUR et al., 2011).

Em comparação com outras fontes de energia renováveis, a biomassa tem poucos problemas para armazenar energia, pois, a biomassa é energia armazenada. Além disso, a biomassa é uma matéria-prima versátil que pode produzir biogás, combustíveis líquidos, carvão vegetal, energia térmica e elétrica. A biomassa é uma fonte de energia renovável já que suas fontes não são limitadas com o passar do tempo (SAIDUR et al., 2011).

No Brasil, em 2008, as fontes de energia renováveis representavam 43,8% da matriz ener-

gética, dos quais 14,6% correspondiam à energia hidráulica e 29,2% à energia de biomassa, sendo que 12,9% eram de origem florestal (lenha e carvão). A biomassa florestal representava a terceira fonte de energia da matriz brasileira na época (COUTO; MÜLLER, 2008).

A indústria de papel e celulose é a principal consumidora de biomassa como combustível e como matéria-prima no mundo, gerando resíduos de biomassa, sendo estes finos (serragem), casca + lascas, rejeitos de madeira (“overs”) e diferentes tipos de lodos (esgotos) com propriedades combustíveis, os quais representam uma grande quantidade de energia disponível. A produção de papel e celulose necessita de grandes quantidades de energia tanto mecânica quanto térmica. Esta energia usualmente é produzida através da queima de biomassa em caldeiras para gerar vapor a ser utilizado diretamente e para gerar eletricidade, e assim reduzir a quantidade de resíduos gerados neste tipo de atividade industrial. Portanto, este tipo de indústria pode ser autossuficiente energeticamente. Muitos dos desenvolvimentos e melhorias nas caldeiras de biomassa foram impulsionados pela indústria de papel e celulose. Outras opções como a pirólise, gaseificação, compostagem e reutilização como material de construção estão sendo utilizadas. Porém, pesquisas são necessárias para otimizar os processos (KITTO; STULTZ, 2005d; MONTE et al., 2009).

Além dos resíduos gerados na fábrica, a produção de papel e celulose tem associada uma grande atividade florestal, na qual são geradas outras biomassas as quais podem ser empregadas como combustíveis. Estas biomassas são as frações da árvore as quais não são empregadas para produzir polpa de celulose, como as cascas, folhas, galhos e pontas da árvore. Em massa seca, as frações não úteis, representam entre um 15 e 25% da massa da árvore. Este material geralmente fica no campo, sem ter um valor agregado e até atrapalhando na labores de novos cultivos. Porém, a colheita total deste material pode ter associada um impacto ambiental negativo na qualidade do solo. (PÉREZ et al., 2006).

O Brasil é o quarto maior produtor de celulose no mundo, com uma produção de 13,9 milhões de toneladas anuais, superado pelos Estados Unidos, China e Canadá. O crescimento anual dos últimos dez anos foi de 5,7%. Quanto à produção de papel, o Brasil encontra-se na nona posição do ranking mundial (ABRAF, 2013; BRACELPA, 2013d).

O papel e celulose são fabricados na maior parte a partir de madeira de eucalipto, mas podem ser empregados outros gêneros como o pinus. No Brasil, 85,8% é produzido a partir do eucalipto e 14,2% a partir do pinus. Esta tendência se conserva no resto de mundo. Além disso, 42% do

eucalipto consumido pelas indústrias brasileiras no ano 2012 foi para produzir papel e celulose (ABRAF, 2013).

Considerando que o eucalipto é o gênero mais plantado no mundo, e as fábricas de papel e celulose são as principais consumidoras deste tipo de florestas, a utilização dos resíduos florestais do eucalipto e dos resíduos de biomassa da produção de papel e celulose apresentam-se como uma fonte de energia atraente (CANNEL, 2004).

Este trabalho de pesquisa enfoca-se na caracterização como combustível dos resíduos sólidos gerados no campo e na produção de papel e celulose. Estes resíduos incluem cascas, galhos, pontas e folhas de eucalipto oriundos da exploração florestal, além de finos (serragem), cascas + lascas, lodo orgânico e cavacos provenientes da etapa industrial. Também é estimado o potencial de geração de energia elétrica pela combustão dos resíduos de biomassa através do ciclo Rankine. É de interesse do autor fazer um levantamento da situação atual do Uruguai quanto à produção de celulose e à geração e emprego destas biomassas residuais. Considera-se também que o Uruguai aumentou, e está em etapa de aumentar mais ainda, sua produção de celulose com fábricas equipadas com tecnologias das mais novas do mundo.

Primeiramente, na sequência do texto, são apresentados os objetivos do trabalho. O Capítulo 2, Revisão da Literatura, encontra-se dividido em três sub-capítulos, no primeiro é feita uma descrição do processo de fabricação da celulose, e da produção florestal associada, destacando sua relevância mundial e a grande quantidade de resíduos que são gerados nestas atividades industriais. Logo depois é feita uma pesquisa bibliográfica sobre as análises necessárias para caracterização das biomassas para uso energético e por último sobre as tecnologias atuais de combustão de biomassa. A metodologia de trabalho, a qual inclui a descrição das amostras e das análises realizadas, assim como os cálculos para determinar o potencial energético são apresentados no Capítulo 3. O Capítulo 4 contém os resultados das análises e dos cálculos, com uma discussão e comparação com dados da bibliografia. Por último, no Capítulo 5 são levantadas as conclusões do trabalho e feitas sugestões para trabalhos futuros.

## **1.1 Objetivos**

Este trabalho de pesquisa tem como objetivos caracterizar como combustível os resíduos sólidos florestais gerados no campo e na fábrica da cadeia produtiva de papel e celulose, e avaliar

o potencial de geração de energia elétrica destas biomassas através do ciclo Rankine.

Estes resíduos incluem cascas, galhos, pontas e folhas de eucalipto oriundos da exploração florestal, além de finos (serragem), cascas + lascas, lodo orgânico e cavacos provenientes da fabricação de celulose. As amostras analisadas provem de uma fábrica de papel e celulose e uma de suas florestas localizada no Estado de São Paulo, Brasil. A fábrica trabalha com um processo de polpação químico Kraft.

A caracterização como combustível baseia-se em uma série de análises pelos quais é estudada a degradação térmica (análises térmicas - TGA e DSC), e determinada a composição estrutural, elementar e imediata, poder calorífico, massa específica e distribuição granulométrica. São caracterizadas também as cinzas determinando sua composição elementar e seu comportamento sob o aquecimento (análises térmicas). Esta caracterização tem como finalidade subsidiar a seleção e o desenvolvimento dos equipamentos e processos de conversão térmica e aproveitamento energético.

Para realizar o cálculo do potencial energético é resolvida a estequiometria da combustão, simulado o ciclo termodinâmico para determinar sua eficiência térmica e feito o balanço térmico da caldeira para cada uma das biomassas pesquisadas. Segundo dados levantados da bibliografia são estipulados parâmetros do ciclo termodinâmico como a temperatura e pressão do vapor superaquecido e parâmetros da combustão como o excesso de ar e a eficiência de combustão para dois grandes grupos de fornalhas, as de leito fixo e as de leito fluidizado.

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 Produção de papel e celulose

O maior produtor mundial de polpa de celulose são os Estados Unidos com uma produção de 49,7 milhões de toneladas anuais, seguido pela China (19,5 milhões de  $t.ano^{-1}$ ), Canadá (18,3) e no quarto lugar o Brasil com 13,9 milhões de toneladas por ano. Na Figura 2.1 é apresentada a evolução histórica da produção brasileira de celulose na última década. Na produção de papel, o Brasil é o nono maior produtor do mundo com 10,1 milhões de toneladas por ano, sendo os maiores fabricantes a China e os Estados Unidos com quase 10 e 7,5 vezes a produção brasileira, respectivamente (ABRAF, 2013).

No ano 2000, o principal consumidor de papel no mundo eram os Estados Unidos com 31% do total, seguido da China (11%), Japão (10%), Alemanha (6%), Reino Unido (4%), França (3%), Itália (3%) e Canadá (2%) (KITTO; STULTZ, 2005a).

O consumo aparente per capita de papel, no ano 2010, teve uma média mundial de 57,0 kg. O maior consumidor foi a Finlândia com 280 kg per capita, seguido pela Alemanha e os Estados Unidos, ambos com 240 kg per capita. O Brasil teve um consumo abaixo da média, com 48,6 kg per capita (BRACELPA, 2013d).

#### 2.1.1 Matéria prima

A madeira utilizada para fazer polpa de celulose é classificada geralmente como madeira mole (softwood) ou madeira dura (hardwood), das quais são obtidas fibras longas ou fibras curtas, respectivamente (BRACELPA, 2013a).

**Fibra longa.** A celulose de fibra longa, originária de espécies coníferas como o pinus, tem comprimento entre 2 e 5 milímetros. É utilizada na fabricação de papéis que demandam mais resistência, como os de embalagens, e nas camadas internas do papel cartão, além do papel de jornal.

**Fibra curta.** A celulose de fibra curta, com 0,5 a 2 milímetros de comprimento, deriva principal-

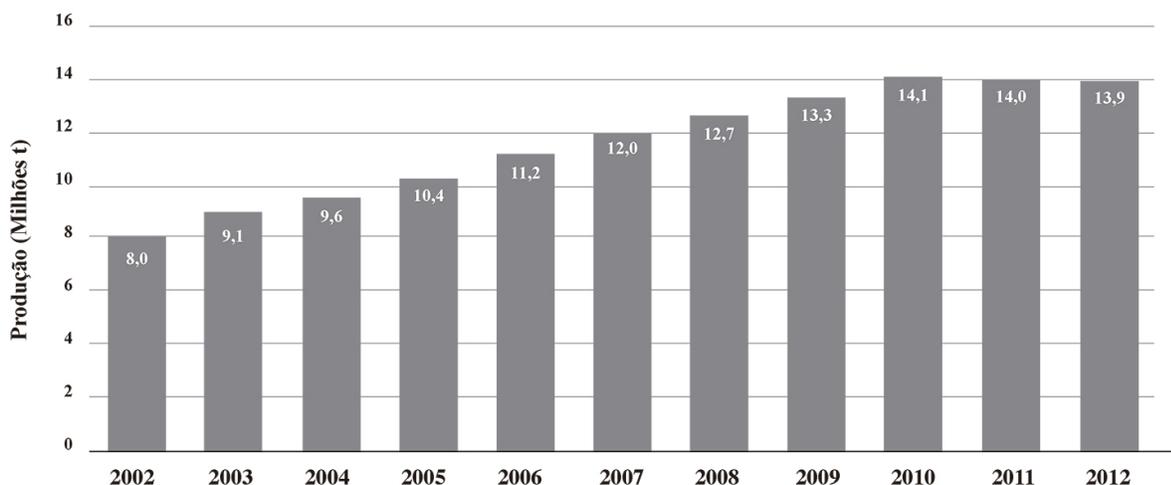


Figura 2.1: Produção de polpa de celulose no Brasil (ABRAF, 2013)

mente do eucalipto (folhosas). Essas fibras são ideais para a produção de papéis como os de imprimir e escrever e com fins sanitários (papel higiênico, papel toalha, guardanapos). As fibras do eucalipto também compõem papéis especiais, entre outros itens. Elas têm menor resistência, alta maciez, boas propriedades de impressão e boa absorção.

O eucalipto e o pinus são responsáveis por mais de 99% do volume de celulose produzido no Brasil, sendo 85% a partir de eucalipto e 14% de pinus. A celulose também pode ser obtida de outros tipos de plantas, não-madeiras, como bambu, babaçu, sisal e resíduos agrícolas (bagaço de cana-de-açúcar) (BRACELPA, 2013b; ABRAF, 2013).

### 2.1.2 Polpação

Pode-se definir o processo de polpação como sendo o processo de separação das fibras da madeira mediante a utilização de energia química e/ou mecânica (VIEGAS-ASSUMPCAO et al., 1998). Na Suécia, a relação entre a polpa produzida com processos químicos e mecânicos é de 70/30 (HOLMBERG; GUSTAVSSON, 2007). Porém, no Estados Unidos, 85% da produção de polpa é a partir de processos químicos, 6% semi-químicos e 9% mecânicos (KITTO; STULTZ, 2005a). Na Tabela 2.1 são apresentados os rendimentos de polpação dos diferentes tipos de processos, ou seja, a porcentagem em massa de polpa produzida em relação à massa de madeira que entra na usina.

Tabela 2.1: Rendimento em polpa sobre a madeira dos processos de polpação

Processo	Rendimento sobre Madeira (%)
Mecânico	95 - 98
Termomecânico e quimimecânico	85 - 95
Semiquímico	65 - 85
Químico de alto rendimento	50 - 65
Químico	40 - 50
Químico para polpa solúvel	30 - 40

Fonte: (VIEGAS-ASSUMPCAO et al., 1998)

### Polpação química

Existem vários métodos de fabricar polpa de celulose empregando produtos químicos, assim é separada a lignina da celulose e hemicelulose, os quais são mais apropriados para fabricar papel. Dentro dos processos de polpação química, o processo Kraft é o mais utilizado no mundo (mais de 80%), porém, existem outros métodos como por exemplo a polpa à soda e a polpa à sulfito (SHREVE; JR, 1977; VIEGAS-ASSUMPCAO et al., 1998).

**Polpa Kraft ou à sulfato.** É um processo alcalino, onde o agente ativo de cozimento são o hidróxido de sódio e o sulfeto de sódio. É responsável pela maior parte da polpa fabricada no mundo. As principais vantagens deste processo sobre os demais são (VIEGAS-ASSUMPCAO et al., 1998):

- grande flexibilidade com relação às espécies de madeira (qualquer espécie pode ser utilizada, mole ou dura, até mesmo madeira deteriorada);
- ciclos de cozimento mais curtos;
- produção de pastas de alta resistência;
- a recuperação do licor utilizado é economicamente viável.

As principais desvantagens são o alto custo de investimento na construção da fábrica, o problema de odor dos gases produzidos, baixo rendimento de polpação e alto custo de branqueamento (VIEGAS-ASSUMPCAO et al., 1998).

O processo começa descascando as toras, caso o descascamento não tenha sido feito no campo, as toras são lavadas para retirar a casca remanescente junto com lascas de madeira. Esta

casca e lascas (chamada neste trabalho de cascas + lascas) é um dos subprodutos que pode ser empregado como combustível, e um dos materiais pesquisados neste trabalho. Uma vez descascadas as toras, estas são trituradas em moinhos de facas gerando cavacos, os quais são peneirados (em peneiras rotatórias ou vibratórias) para separar os finos (serragem e cavacos são descartados por serem pequenos) e as rejeitos de madeira (“overs”) do produto desejado, que são os cavacos com dimensões determinadas. Os “overs” podem ser picadas novamente ou descartadas. Os finos e “overs” constituem outras biomassas com potencial energético e também são caracterizadas neste trabalho (SHREVE; JR, 1977).

Os cavacos são enviados aos digestores, onde é adicionado o licor branco de cozimento que contém essencialmente sulfito de sódio e soda cáustica, e liga-se o vapor de água. Pode ser usado um digestor estacionário ou rotatório. Mediante a alta temperatura, pressão e a ação dos produtos químicos, a lignina é dissolvida, obtendo assim as fibras de celulose separadas.

Logo após o cozimento, a pressão é abaixada e a carga é lançada num tanque de esgotamento. A polpa, depois da separação do licor de cozimento, é lavada.

O licor de cozimento usado (licor negro ou lixívia negra) é bombeado para estocagem para aguardar a recuperação das substâncias dissolvidas mediante evaporação. Esta recuperação dos produtos químicos é feita pela combustão da matéria orgânica dissolvida na caldeira de recuperação, na qual são produzidos vapor e energia elétrica consumidos no processo, além de eliminar parte dos efluentes com potencial poluidor.

A polpa lavada passa para a sala das peneiras, onde atravessa grades, calhas de sedimentação e peneiras, que separam quaisquer lascas de madeira não cozidas, após o que entra nos filtros e espessadores. A polpa espessada é em seguida branqueada. Após o branqueamento, a polpa é lavada e re-espessada, sendo preparada para formar folhas suficientemente secas para serem dobradas e agrupadas num fardo, ou então pode ser enviada para a produção de papel (SHREVE; JR, 1977).

### **Polpação mecânica**

Este processo não envolve tratamento químico da polpa. Principalmente são empregadas madeiras moles, as quais têm a vantagem de flutuar nas correntes da fábrica. No primeiro estágio do processo, a madeira é partida e descascada, caso tenha chegado à fábrica com casca. Em seguida, é feita a moagem em água, para remover o calor gerado pelo atrito e provocar a flutuação das fi-

bras. A madeira é moída de forma que as fibras não sejam cortadas e sim arrancadas rompendo as ligações entre fibras. A mistura de polpa e água proveniente do moinho é lançada num coletor que fica abaixo dos moinhos e passa por um crivo de estilhas. O material mais grosso fica retido, sendo lançado fora, e o material fino é lançado num poço, de onde é bombeado para as peneiras finais. Os finos que passam por estas peneiras são concentrados em espessadores, dando a polpa mecânica comercial. Os grossos das peneiras finas são tratados em refinadores e retornam às peneiras. As necessidades de energia são todas mecânicas e principalmente requeridas na moagem (SHREVE; JR, 1977). Como resultado, obtém-se um rendimento sobre madeira elevado, pois o material perdido é constituído, geralmente, de finos e de solúveis em água.

A polpa mecânica de madeira é usada, na maior parte dos casos, em tipos de papel e chapas mais baratos. O deterioramento que ocorre no papel feito com a polpa mecânica é devido à decomposição química das partes não celulósicas da madeira, a lignina, e com o passar do tempo os papéis vão ficando amarelados (SHREVE; JR, 1977).

### **Resíduos da produção**

Devido à grande diversidade de processos, são gerados diferentes tipos de resíduos sólidos e lodos. Os resíduos sólidos são gerados principalmente na polpação, nas unidades de branqueamento e no tratamento de esgotos. A quantidade e características destes resíduos depende do tipo de papel produzido, da matéria prima empregada e do processo (MONTE et al., 2009).

Os resíduos da polpação a partir de fibras virgens são finos (serragem) e “overs”, casca e resíduos de madeira gerados no manuseio (cascas + lascas), lodos orgânicos provenientes do tratamento do esgotos, chamados de lodos primário e biológico, os quais são geralmente misturados e concentrados até 20-40% de matéria seca. Por último, são gerados também lodos inorgânicos, os quais são normalmente depositados em aterro após desidratação e secagem (MONTE et al., 2009).

Para os fins deste trabalho, são de interesse os resíduos orgânicos gerados no processo de polpação química (Kraft). Estes resíduos são os finos e “overs” descartados no peneiramento dos cavacos, as cascas + lascas provenientes do descascamento e/ou da lavagem das toras e o lodo orgânico.

O valor energético dos resíduos, por tonelada de celulose, nos processos químicos varia entre 17 e 20  $GJ.t_{celulose}^{-1}$  para o licor negro e 4,3 a 4,8  $GJ.t_{celulose}^{-1}$  para as cascas e restos de madeira.

Na produção mecânica, a geração de resíduos é menor, 2,2 a 2,3  $GJ.t_{celulose}^{-1}$  (HOLMBERG; GUSTAVSSON, 2007).

### 2.1.3 Consumo energético

Tanto do processo produtivo da celulose quanto da exploração florestal, são gerados resíduos de biomassa. Grande parte da energia necessária para as indústrias de celulose e papel é suprida por estes resíduos, que vieram substituir o combustível fóssil, e ao mesmo tempo garantir a continuidade de abastecimento a baixo custo (COUTO et al., 1984).

O processo de polpação química é autossuficiente em energia, podendo cobrir tanto sua demanda de energia elétrica quanto o calor necessário do processo. Porém, os processos mecânicos precisam do fornecimento de energia externa. Tecnicamente, toda a energia empregada na fabricação de polpa e papel pode ser baseada na biomassa (HOLMBERG; GUSTAVSSON, 2007).

Nos processos químicos, o vapor pode ser gerado a partir da queima dos resíduos de biomassa como as cascas, os finos, os “overs” e principalmente o licor negro. A eletricidade é produzida com turbinas de contrapressão. Com sistemas de cogeração de energia elétrica e térmica, é possível alcançar rendimentos de até 80% em relação ao poder calorífico inferior, com uma relação de eletricidade/calor de 0,28 (HOLMBERG; GUSTAVSSON, 2007).

Na Tabela 2.2 é apresentada a demanda de energia, tanto de vapor quanto de energia elétrica, para produzir uma tonelada de celulose a partir de processos mecânicos e químicos. Os dados correspondem a fábricas da Suécia, onde o primeiro valor de cada item corresponde à média de todas as fábricas e o segundo ao consumo das que têm tecnologias mais novas (HOLMBERG; GUSTAVSSON, 2007).

Tabela 2.2: Demanda de energia na produção de polpa de celulose (por tonelada de celulose) (HOLMBERG; GUSTAVSSON, 2007)

	Vapor ( $GJ.t_{celulose}^{-1}$ )		Eletricidade ( $kWh.t_{celulose}^{-1}$ )	
	Média	Tec. Nova	Média	Tec. Nova
Processo Mecânico	0,56	0,17	3.179	2.444
Processo Químico	10,8	8,7	738	654

## As fábricas de celulose na matriz energética do Brasil

O setor industrial é o principal consumidor de energia no Brasil, com 31,5% da demanda total. As indústrias de papel e celulose, no ano 2012, tiveram um consumo de 10.066 *ktep*, o qual representou 4,0% da matriz energética total (11,3% do setor industrial) (MME, 2013).

Segundo dados de Bracelpa, hoje no Brasil a totalidade da matéria prima empregada para a produção de papel e celulose provem de florestas plantadas e 85% da energia consumida no setor é gerada a partir de biomassa, principalmente do licor negro e em menor escala outras biomassas como casca, cavacos e rejeitos de madeira entre outros. Na Figura 2.2 é apresentada a matriz energética da indústria de papel e celulose no Brasil, onde observa-se um grande crescimento das fontes de energia renováveis (BRACELPA, 2013e).

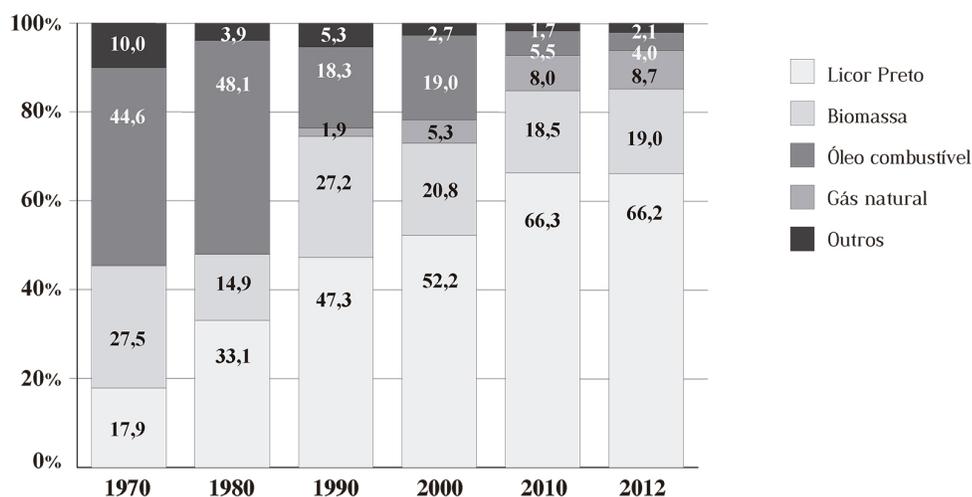


Figura 2.2: Matriz energética da indústria de papel e celulose no Brasil (BRACELPA, 2013e)

## As fábricas de celulose na matriz energética do Uruguai

Analisando a matriz energética do Uruguai, no ano 2011, a biomassa representava 32% da demanda total de energia (15% lenha e carvão vegetal; 17% resíduos de biomassa<sup>1</sup>). A demanda de biomassa como fonte energética é sobrepassada pela demanda dos derivados do petróleo com 44%. O setor que consome mais energia é o setor industrial, com 34% do total. Além disso, mais da

<sup>1</sup>Os resíduos de biomassa englobam principalmente o licor negro, porém, estão inclusos também os resíduos florestais e da serraria

metade (51%) da energia consumida no setor industrial é fornecida a partir de resíduos de biomassa, principalmente do licor negro. A lenha e o carvão vegetal também têm grande representação no setor industrial com 15% (MIEM, 2013).

Na Figura 2.3 é representada a evolução da demanda de energia no setor industrial, onde se destaca um grande aumento no consumo de resíduos de biomassa a partir do ano 2007 (MIEM, 2011). Isso aconteceu pelo fato de começar a operar uma fábrica de celulose com capacidade de produzir 1,1 milhões de toneladas de celulose por ano. No mês de outubro de 2013 foi aprovada uma ampliação da capacidade de produção desta fábrica até 1,3 milhões de  $t.ano^{-1}$ . Além desta fábrica, encontra-se em etapa de construção uma outra fábrica a qual vai produzir 1,3 milhões de toneladas anuais, fato que fará aumentar ainda mais o emprego de licor negro como fonte de energia no Uruguai. Como ponto de comparação, pode-se destacar que a maior fábrica de celulose do mundo encontra-se no Brasil (estado de Mato Grosso do Sul) e produz 1,5 milhões de toneladas por ano de celulose branqueada.

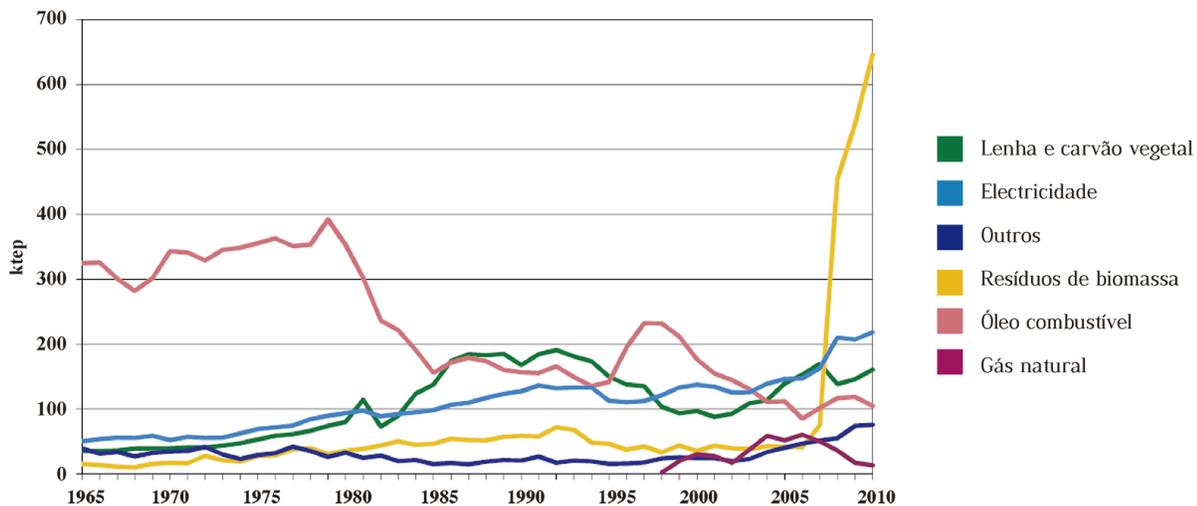


Figura 2.3: Consumo final energético no Uruguai - setor industrial (MIEM, 2011)

## 2.2 Florestas de eucalipto

O eucalipto é o gênero mais plantado no mundo, com mais de 10 milhões de hectares, destacando-se a China, Índia, Brasil, África do Sul, Chile e Portugal. A maior parcela é admi-

nistrada com curta rotação, destinada majoritariamente para polpa de celulose (CANNEL, 2004).

Originário da Austrália e da Indonésia, o eucalipto é hoje a principal fonte de matéria-prima para produzir papel. Pertence ao gênero *Eucalyptus*, que reúne mais de 600 diferentes espécies, o que dá uma grande flexibilidade quanto a adaptação a diferentes climas e tipos de solo (BRACELPA, 2013c).

Devido a que nas plantações de bosques é utilizada uma espécie adequada, plantada cuidadosamente, espaçada uniformemente e é feita uma colheita total, além dos avanços e desenvolvimento na genética, a produtividade das plantações geralmente são maiores que nas florestas naturais. A produtividade típica, de forma geral, pode ser nas seguintes faixas:  $3-20 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$  nas zonas temperadas,  $5-35 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$  nos climas mediterrâneos e  $5-50+ \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$  nas zonas tropicais e subtropicais (EVANS, 2004).

Nas florestas de alta rotatividade, com os avanços tecnológicos alcançados no campo da silvicultura, são observados altos índices de produtividade em florestas estabelecidas em espaçamento de  $3,0 \times 2,0 \text{ m}$  a  $3,0 \times 3,0 \text{ m}$ , ou seja, densidades entre 1100 e 1650 pés por hectare (COUTO; MÜLLER, 2008).

### **2.2.1 Florestas no Brasil**

Os primeiros eucaliptos chegaram ao Brasil como planta ornamental em 1825, no Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Em 1868, a espécie começou a ser plantada para a produção de lenha e formação de barreiras contra o vento. Em território brasileiro, o eucalipto encontrou ótimas condições de clima e solo para se desenvolver, com crescimento mais rápido que nos demais países e alto índice de produtividade. A utilização do eucalipto no segmento papelero data do início do século XX, mas sua produção massiva, só ocorreu por volta de 1957 (BRACELPA, 2013c).

O Brasil com uma superfície de 851 milhões de hectares, tem a maior extensão de florestas nativas do mundo com aproximadamente 477 milhões de *ha*, equivalente a 56% de sua área, e quase 7 milhões de *ha* de reflorestamento (0,8% da área). Das florestas plantadas, o gênero que tem maior cobertura é o eucalipto com 5.102 milhares *ha* (70,8%), seguido do pinus com 1.563 milhares *ha* (22,0%). Em menor escala são cultivadas florestas de Acácia Negra (2,1%), Seringueira (2,4%), Paricá (1,2%), Teca (0,9%), Araucária (0,2%) e Pópulus (0,1%) (ABRAF, 2013; ROSENGREN, 2009).

Na Tabela 2.3 é apresentada a área plantada com florestas de eucalipto e pinus nas diferentes regiões do Brasil, sendo as primeiras colunas correspondentes as superfícies totais e as duas últimas as superfícies destinadas a produção de celulose e papel. Destaca-se que mais de 32% da superfície de reflorestamento é empregada na indústria de celulose, dentro dos quais a grande maioria é eucalipto (81,2%) e em menor medida o pinus (18,4%). Da área plantada com eucalipto, 35% é destinada à celulose. Os estados com maior produção de florestas de eucalipto são Minas Gerais, São Paulo e Bahia, os quais concentram 60% da área plantada de eucalipto total. Na região sudeste encontra-se 53% da área plantada de eucalipto no Brasil (ABRAF, 2013).

Tabela 2.3: Área de Florestas Plantadas Total e para Celulose - Espécie e Região (1.000 *ha*)

ESTADO	Área plantada total		Área plantada para celulose	
	Eucalipto	Pinus	Eucalipto	Pinus
Amapá	50	0	12	0
Bahia	605	11	439	83
Espírito Santo	203	3	136	0
Maranhão	173	-	67	0
Mato Grosso	60	-	1	0
Mato Grosso do Sul	587	10	158	0
Minas Gerais	1.439	53	200	3
Pará	160	-	49	0
Paraná	198	620	112	148
Piauí	28	-	30	0
Rio Grande do Sul	285	165	189	11
Santa Catarina	107	539	17	125
São Paulo	1.042	145	371	34
<b>TOTAL</b>	<b>5.102</b>	<b>1.563</b>	<b>1.783</b>	<b>404</b>

Fonte: ABRAF, 2013 e Bracelpa, 2010

O Brasil destaca-se no cenário mundial com uma das mais altas taxas de produtividade na

silvicultura, atingindo entre 40 e 50  $m^3.ha^{-1}.ano^{-1}$ , produção até 10 vezes superior à observada em países de clima temperado (COUTO; MÜLLER, 2008). Na Tabela 2.4 são apresentadas as produtividades dos gêneros eucalipto e pinus destinados à produção de celulose nos principais estados produtores de florestas. Outros grandes produtores de eucalipto têm produtividades menores, por exemplo, China (30), Indonésia (25), Austrália (22), Chile (20), Nova Zelândia (19), Estados Unidos (15) e Portugal (12).

Tabela 2.4: Produtividade Florestal ( $m^3.ha^{-1}.ano^{-1}$  com casca)

ESTADO	Eucalipto	Pinus
Amapá	35,0	-
Bahia	42,2	-
Espírito Santo	40,3	-
Mato Grosso	49,3	-
Mato Grosso do Sul	40,1	-
Minas Gerais	39,1	27,6
Pará	27,0	-
Paraná	53,1	39,3
Rio Grande do Sul	22,9	34,2
Santa Catarina	35,4	35,5
São Paulo	46,0	28,9
Brasil	40,5	36,3

Fonte: Bracelpa, 2011

Outro dado relevante é o tempo de rotação, tanto as florestas destinadas para a produção de celulose quanto as florestas energética, são administradas em curta rotação. O eucalipto leva aproximadamente de 6 a 7 anos até ser colhido nas florestas que são empregadas na indústria de celulose, tempo que é um pouco menor (entre 4 e 7 anos) nas florestas com destino energético. Já o ciclo de cultivo de pinus leva, em média, 14 anos (COUTO; MÜLLER, 2008; BRACELPA, 2011).

Em 2012, o consumo brasileiro de madeira em tora proveniente de florestas plantadas foi de

182,4 milhões de  $m^3$ . O segmento de celulose e papel destacou-se como o principal consumidor, 35,2% do total, dos quais 85,8% foi produzido com eucalipto e 14,2% com pinus. Outros grandes consumidores de madeira de reflorestamento no Brasil são as empresas siderúrgicas, indústrias de madeira serrada, empresas de painéis de madeira reconstituída e a utilização com fins energéticos (Tabela 2.5) (ABRAF, 2013; BRAUNBECK; AES; GARCIA, 2008).

Tabela 2.5: Consumo brasileiro de madeira em tora para uso industrial (1.000  $m^3$ )

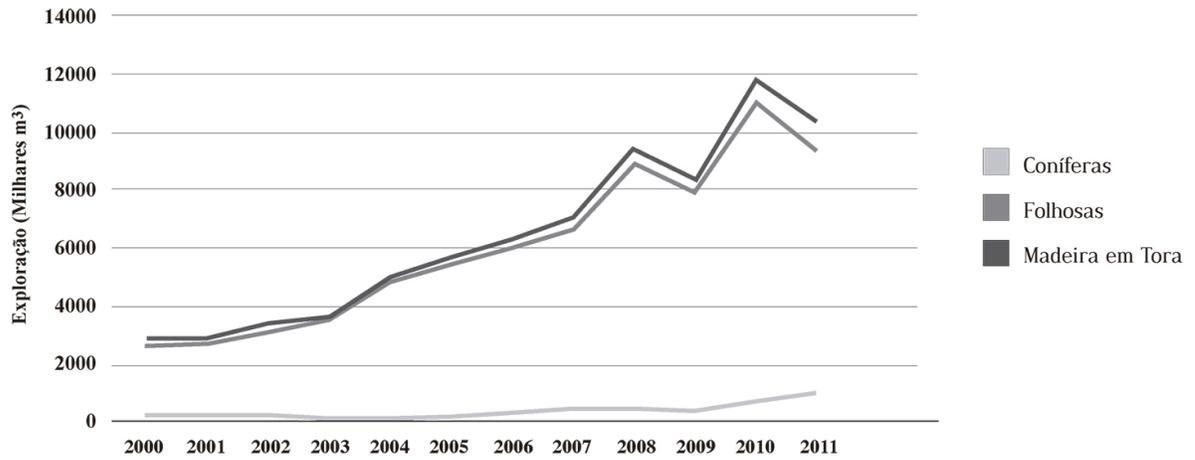
Segmento	Eucalipto	Pinus	Outros	Total
Papel e celulose	55.033	9.108	5	64.146
Painéis reconstituídos	5.580	7.252	159	12.991
Indústria madeireira	7.034	27.424	288	34.747
Carvão vegetal	23.144	-	-	23.144
Lenha industrial	37.067	3.829	3.786	44.682
Madeira tratada	1.650	-	-	1.650
Outros	1.062	31	-	1.093
<b>Total</b>	<b>130.571</b>	<b>47.645</b>	<b>4.238</b>	<b>182.454</b>

Fonte: ABRAF, 2012

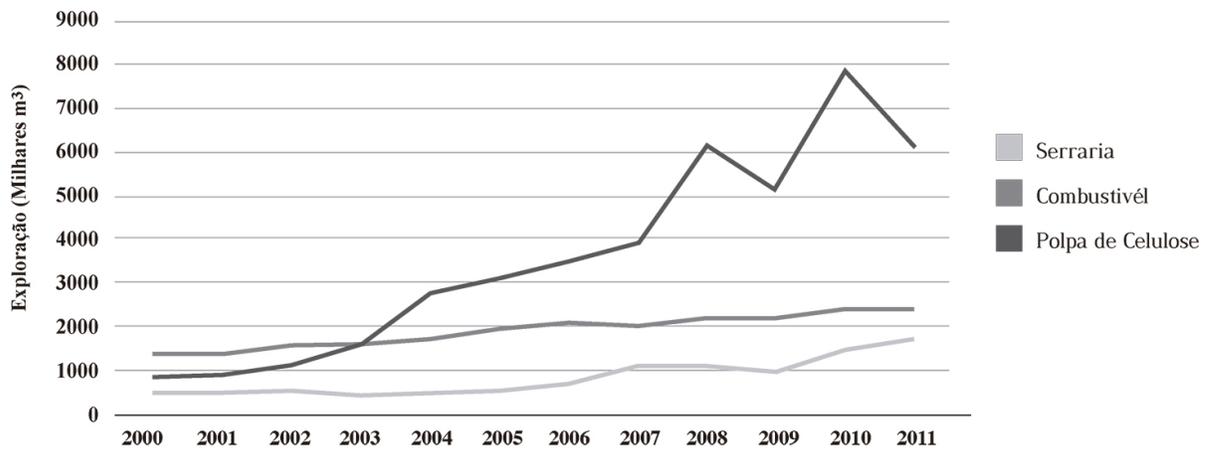
## 2.2.2 Florestas no Uruguai

O Uruguai, que tem uma superfície total de 17,6 milhões de hectares, somente 8,7% (1.545 milhares de  $ha$ ) encontra-se ocupado por florestas, das quais 849.960  $ha$  (55%) correspondem a florestas nativas e das florestas plantadas, 75,4% (523.867  $ha$ ) são folhosas (eucalipto) e 24,6% (171.229  $ha$ ) coníferas (pinus) (MGAP, 2013). Nos gráficos da Figura 2.4 são apresentadas a exploração de madeira em milhares de  $m^3$  segundo o tipo de madeira e segundo o destino, sendo estes, a produção de celulose, a utilização como combustível e o emprego na serraria, e os tipos de madeira as folhosas (eucalipto) e coníferas (pinus).

Da análise dos gráficos pode-se concluir que o eucalipto é o principal gênero consumido no Uruguai (Figura 2.4a) e com destino na produção de polpa de celulose (Figura 2.4b). O grande



(a) Tipo de Madeira



(b) Destino da Exploração

Figura 2.4: Exploração florestal no Uruguai.

aumento no consumo de madeira com destino no segmento de celulose constatado principalmente a partir do ano 2007, é devido ao começo da operação da fábrica de celulose mencionada anteriormente, a qual produz 1,1 milhões de toneladas de celulose por ano.

No Uruguai, a produtividade do eucalipto para polpa é de  $25 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$  na média, com uma rotação florestal variando entre 8 e 15 anos, sendo a média de 10 anos. A perspectiva de aumento da produtividade para os próximos anos é de chegar até  $35 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$  (BRACELPA, 2013d).

Em função de sua grande plasticidade ambiental, altos índices de produtividade e características energéticas (densidade da madeira e poder calorífico), o gênero eucalipto também é o mais utilizado para implantação de florestas com fins energéticos (COUTO; MÜLLER, 2008).

O uso convencional do eucalipto é na indústria de papel e celulose devido ao elevado teor de celulose. Assim, é empregada a fração útil (madeira, tora), deixando na floresta o resto da árvore (galhos, folhas, casca, lascas e pontas), o qual pode ser utilizado como combustível. Geralmente os resíduos representam entre 15 e 25% em base seca da biomassa da árvore (PÉREZ et al., 2006). Considerando que o eucalipto é o gênero mais plantado no mundo, fato que também ocorre tanto no Brasil quanto no Uruguai, a utilização dos resíduos florestais do eucalipto apresenta-se como uma fonte de energia atraente (CANNEL, 2004).

### **2.2.3 Colheita das toras**

A primeira etapa da colheita florestal é o corte, sendo composto pela derrubada, desgalhamento, traçamento e empilhamento das toras. Na operação de corte são comumente empregados meios manuais, semi-mecanizados ou mecanizados. Nos corte manual utiliza-se o machado e no semi-mecanizado a motosserra. A colheita mecanizada é realizada utilizando diversas maquinarias, as quais podem ser freqüentemente enquadradas em dois grandes grupos, derrubador-acumulador (“feller-buncher”, Figura 2.5a) e colhedor florestal (“harvester”, Figura 2.5b) (BRAUNBECK; AES; GARCIA, 2008).

O corte manual é caracterizado pelo uso de mão de obra pouco qualificada, de força física e de equipamentos não motorizados. Sua principal vantagem é o baixo custo de aquisição e manutenção dos equipamentos, com a desvantagem, porém, de exigir um grande esforço físico e tem baixo rendimento individual. O método da motosserra tem a capacidade de derrubar, desgalhar e traçar.

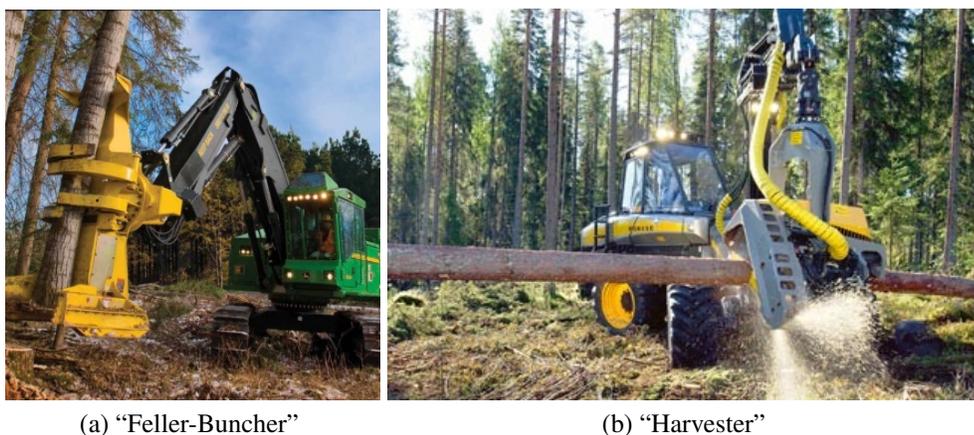


Figura 2.5: Maquinaria para realizar a colheita mecanizada das toras.

Proporciona um rendimento individual elevado, exige investimento inicial baixo, pouca mão de obra e, além disso, pode ser utilizado em áreas de difícil acesso (BRAUNBECK; AES; GARCIA, 2008).

Para o corte mecanizado existem maquinarias capazes de derrubar, acumular e empilhar os pés (feller-buncher) e outras que cortam, derrubam, desgalham, descascam e traçam em uma única operação (harvester) (BRAUNBECK; AES; GARCIA, 2008). Dependendo da logística de colheita adotada e a maquinaria empregada, a casca é retirada no campo ou levada junto com a tora e retirada na indústria.

Logo após o corte e acondicionamento da parte útil da árvore, a tora, deve ser retirada do campo e carregada em caminhões para ser levada para a fábrica. A operação de extração e carregamento é geralmente feita com meios mecânicos como tratores.

Independentemente do destino final da madeira explorada, a tora é a fração útil e de interesse na exploração florestal, assim é deixado no campo os galhos, a casca e as folhas na condição de resíduo.

#### 2.2.4 Resíduos florestais

Na utilização da biomassa residual, geralmente é necessário realizar uma série de operações prévias de transformação física e condicionamento. As principais etapas de transformação são a trituração, secagem natural e/ou forçada, moagem, peneiramento e densificado (ORTÍZ L., 2003).

## Estimativa da quantidade dos resíduos

Existem diversas pesquisas (BALBOA et al., 2003; PÉREZ-CRUZADO et al., 2009; ANTÓNIO et al., 2007) tentando equacionar a massa das diferentes frações das árvores a partir de variáveis facilmente quantificáveis como diâmetro nominal, altura, área basal, altura dominante, diâmetro da copa, altura da base da copa e comprimento da copa. A partir dos resultados destas pesquisas, dos dados empregados para realizar as aproximações e outros dados na bibliografia (BRITO et al., 1979; COUTO et al., 1984), pode-se estimar que para florestas de eucalipto destinadas à produção de celulose e/ou energia, a tora representa entre 71 e 83% (em massa seca) do total, a casca entre 5 e 12% e a copa (galhos e folhas) entre 11 e 18%. Em geral, mais de 20% da biomassa é deixada no campo como resíduo. Na Tabela 2.6 são detalhadas as porcentagens das frações da árvore segundo as pesquisas antes mencionadas. Nota-se que estas pesquisas não são exclusivamente de florestas destinadas à produção de celulose. Porém, os cálculos feitos a partir das equações foram considerando dimensões típicas deste tipo de floresta.

Tabela 2.6: Porcentagem em massa das frações da árvore de eucalipto (b.s.)

	Madeira	Casca	Copa	G. Gros.	G. Finos	G. Peq.	Folhas	G. Secos	Referência
E. globulus	82,2	7,4	10,4	5,4	2,1	0,9	1,9	-	(BALBOA et al., 2003)
E. globulus	82,3	7,4	10,4	5,4	2,1	0,9	2,0	-	(BALBOA et al., 2003)*
E. nitens	72,9	10,0	17,1	2,7	2,1	1,5	4,3	6,4	(PÉREZ-CRUZADO et al., 2009)
E. nitens	71,0	10,4	18,7	5,7	1,9	1,8	4,5	4,8	(PÉREZ-CRUZADO et al., 2009)*
E. globulus	71,0	10,4	18,6	5,7	1,9	1,8	4,5	4,8	(ANTÓNIO et al., 2007)
E. saligna	82,9	5,2	11,9	-	-	-	-	-	(BRITO et al., 1979)
E. saligna	72,3	12,4	15,3	-	-	-	-	-	(COUTO et al., 1984)
E. globulus	81,1	7,4	11,5	-	8,4	-	2,0	-	(PÉREZ et al., 2006)
E. nitens	79,7	7,6	12,7	-	10,3	-	2,2	-	(PÉREZ et al., 2006)

(\*) Calculado a partir de equações

Com os desenvolvimentos na área florestal, intenta-se maximizar a fração útil da árvore, reduzindo assim a massa de casca e copa.

É por causa desta grande parcela da árvore não empregada e geralmente deixada no campo, que este trabalho tem como objetivo caracterizar a biomassa residual como combustível, visando sua combustão em caldeira e dando um valor agregado a este material.

## **Colheita dos restos da exploração**

A maior limitante que afeta a manipulação e aproveitamento da biomassa florestal é sua baixa densidade à granel, o que dificulta e encarece o transporte. Por essa razão, as tecnologias de colheita dos resíduos baseiam-se em reduzir a granulometria do material mediante a trituração em moinhos de facas, ou comprimindo-lo até formar unidades compactas de maior densidade (INFRANTE; VEIRAS, 2003).

Um aspecto de crucial importância na colheita dos restos do corte é a integração das operações prévias de aproveitamento. A disposição dos resíduos tem grande influência nos rendimentos da colheita dos mesmos. Para isso podem-se diferenciar três situações:

- Situação 1: Restos do corte dispostos de forma dispersa pelo campo.
- Situação 2: Restos do corte agrupados em pequenas pilhas durante a colheita da madeira.
- Situação 3: Restos do corte agrupados em pilhas ao lado da trilha.

Para realizar a colheita dos resíduos florestais, as tecnologias podem ser divididas em duas categorias, nas quais o material pode ser compactado ou triturado. O rendimento da colheita é da ordem de 50 - 60% com pouco risco de arraste de pedras. Porém, com uma boa gestão dos restos, sendo agrupados durante o aproveitamento das toras, o rendimento pode melhorar até valores de 70 ou 80% (INFRANTE; VEIRAS, 2003).

**Impacto ambiental da colheita dos resíduos do campo.** Os restos do corte desempenham diferentes funções que asseguram a sustentabilidade das florestas. Destaca-se que os resíduos florestais a) proporcionam uma eficaz proteção frente à erosão, preservando o solo e a qualidade das águas, b) durante sua decomposição devolve grande parcela dos nutrientes acumulados na plantação, c) mantém (e incrementa) o conteúdo de matéria orgânica e carbono no solo, d) reduz a evaporação e o período de seca, e) reduz o risco de compactação pela maquinaria e impacto da chuva. No entanto, o impacto da retirada da biomassa vai depender das quantidade e frações coletadas, da espécie florestal, das condições do solo e das medidas de proteção empregadas (BALBOA et al., 2003).

A quantidade de nutrientes presentes nas diferentes frações descem na ordem: folhas >> casca > galhos >> madeira (BALBOA et al., 2003). Isso é constatado também pelo teor de cinzas, onde as folhas e casca são as frações com maior conteúdo de cinzas (PÉREZ et al., 2006).

Os dados obtidos no trabalho de Balboa et al. (2003), sugerem uma instabilidade nutricional, então deve assegurar-se a restituição dos elementos extraídos durante o aproveitamento florestal. A qual pode ser por meio de uma boa gestão dos resíduos e/ou utilização de fertilizantes. Também pode-se reduzir a densidade dos cultivos. No caso que a biomassa é utilizada com fins energéticos, as cinzas podem ser empregadas para restituir os nutrientes do solo (BALBOA et al., 2003).

## **Secagem**

Normalmente a biomassa residual das florestas tem um teor de umidade elevado (em torno de 50% em base úmida), o que gera uma serie de problemas no condicionamento para sua utilização com fins energéticos (ORTÍZ L., 2003). Outras pesquisas (COUTO et al., 1984; BRITO et al., 1979) revelam dados mais precisos de umidade, onde o teor de umidade da copa (galhos e folhas) no momento do corte é 52 ~ 53% e da casca entre 64 e 66% em base úmida.

Para reduzir o teor de umidade do material, podem ser empregados métodos de secagem natural ou forçada. A secagem natural baseia-se em aproveitar as condições ambientes favoráveis para a desidratação dos resíduos, onde podem ser atingidos teores de umidade de até 20%. No caso dos resíduos florestais a secagem pode ser feita em pilhas diretamente no campo ou após a trituração (ORTÍZ L., 2003).

Os resíduos florestais muito úmidos, com a finalidade de ser secados naturalmente, as vezes são armazenados por períodos de mais de um ano antes de serem utilizados (dependendo do clima da região). Os problemas maiores no armazenamento destes materiais é a geração de emissões gasosas e a perda de biomassa. A perda da biomassa seca é devida à decomposição, o que reduz o poder calorífico da biomassa (HE et al., 2012).

Durante o armazenamento dos resíduos da madeira, produz-se uma série de processos termogênicos devidos à ação das células vivas na madeira, à atividade biológica de micro-organismos (bactérias e fungos) e a fenômenos de oxidação química e hidrólise ácida dos componentes da celulose. Ocorre uma liberação de calor na pilha, a qual é iniciada fundamentalmente pela respiração das células vivas e o desenvolvimento de bactérias. A temperatura que pode alcançar a pilha de-

pende da temperatura ambiente, as precipitações, tamanho e compactação da pilha, e conteúdo e distribuição da casca e elementos finos. Sob algumas condições determinadas podem produzir-se fenômenos de carbonização e ignição espontânea na pilha. Este fenômeno tem maior probabilidade de acontecer em pilhas grandes com maior conteúdo de cascas e elementos finos (ORTÍZ L., 2003).

Quando a umidade conseguida com a secagem natural não é suficiente ou não se tem as condições necessárias para realizá-la, é necessário apelar à secagem forçada, onde a secagem pode ser feita em secadores direto e indiretos, sendo os mais populares os secadores de tambor rotativo ou trommel (ORTÍZ L., 2003).

### **Densificação**

O emprego energético da biomassa florestal residual tem uma serie de desvantagens em relação a outros combustíveis, como sua baixa densidade e dificuldade para sua manipulação. Uma das possibilidades de transformação física é a compactação para gerar produtos densificados com maior densidade energética, e com propriedades e geometria homogêneas. Isto permite a automatização dos sistemas de alimentação e combustão, além de permitir a redução dos gastos de transporte e armazenamento (ORTÍZ L., 2003). As duas tecnologias de compactação mais utilizadas são a produção de briquetes e pellets.

Os briquetes são elementos geralmente de forma cilíndrica, com diâmetros entre 5 e 10 cm, com uma densidade entre 700 e 1.400  $kg.m^{-3}$  dependendo da tecnologia empregada. Os pellets são elementos densificados também de forma cilíndrica, mas com diâmetros normalmente entre 6 e 12 mm e comprimento de 10 a 30 mm. A densidade dos pellets acostuma ser entre 1.000 e 1.200  $kg.m^{-3}$ , mas a densidade aparente na distribuição a granel é da ordem de 800  $kg.m^{-3}$ . Tanto para produzir briquetes quanto pellets, a umidade tem que ser 10% (b.u.) aproximadamente, ou seja, é necessário realizar uma secagem forçada. Além disso, o material deve ser moído até granulometria da ordem de 0,5 a 1,0  $mm$  (ORTÍZ L., 2003).

### **2.3 Caracterização das biomassas**

A identificação e caracterização das propriedades físicas, químicas, térmicas e fluidodinâmicas das partículas de um combustível sólido é o primeiro, e o mais importante, passo na pesquisa de

aplicações desse combustível, assim são determinadas as propriedades, a qualidade, as aplicações potenciais e o impacto ambiental relacionado com qualquer combustível (SAIDUR et al., 2011). As principais análises empregadas na caracterização de biomassas como combustível a ser empregado em caldeiras são:

- Teor de umidade *in natura*;
- Determinação de propriedades físicas;
- Análise imediata;
- Análise elementar;
- Determinação do poder calorífico;
- Análise da composição estrutural;
- Termogravimetria (TGA), sob atmosfera inerte e oxidante;
- Calorimetria espectral diferencial (DSC), sob atmosfera inerte e oxidante;
- Análise das cinzas: análise elementar e análises térmicas(TGA e DSC).

As características e análises de diversas biomassas são encontradas na literatura, tais como os dados apresentados por (ALMEIDA; BRITO; PERRÉ, 2010; BIZZO et al., 2014; BRITO et al., 2008; CORTEZ; LORA; GÓMEZ, 2008; GARCÍA et al., 2013; GOMIDE et al., 2005; HEIDARI et al., 2013; JENKINS et al., 1998; KUMAR et al., 2011; MUSINGUZI et al., 2012; PÉREZ et al., 2006; MASIÁ et al., 2007). Estes dados são apresentados no Capítulo 4 em comparação aos obtidos neste trabalho.

### **2.3.1 Teor de umidade *in natura***

O teor de umidade da biomassa pode variar numa grande faixa desde 10 até 80%. O conteúdo de água influencia na combustão e no volume de gás produzido por unidade de energia. O poder calorífico inferior diminui com o aumento da umidade. Quando o teor de umidade é muito elevado, podem ser encontrados problemas durante a queima, na ignição e redução da temperatura de combustão, o que afeta a qualidade da combustão. Além disso, caso a umidade seja muito elevada, é necessário uma quantidade maior de combustível e assim são gerados maiores quantidades de

gases, o que deriva no aumento das dimensões dos equipamentos. A presença de água no combustível afeta a primeira etapa da combustão (devolatilização) e a qualidade e propriedades dos gases produzidos nesta etapa (KHAN et al., 2009).

### 2.3.2 Propriedades físicas

As principais propriedades físicas consideradas para materiais particulados são aquelas devidas a seu estado de agregação granular, as quais podemos citar a massa específica (aparente e do leito), a porosidade, esfericidade, a distribuição de tamanhos das partículas e a superfície específica, as quais dependem do método de preparação do combustível. Estas propriedades têm influência direta nas diferentes tecnologias de combustão, nos sistemas de alimentação das caldeiras, nos pretratamentos como a secagem, densificação e armazenagem. Além disso, têm importância durante os cálculos fluidodinâmicos e da cinética da combustão nos reatores de leito fluidizado como por exemplo as questões de arraste e segregação de partículas, e as emissões de poeira (CORTEZ; LORA; GÓMEZ, 2008; KHAN et al., 2009).

A massa específica é um parâmetro importante desde que afeta diretamente a qualidade do combustível. Quanto maior seja a densidade de um combustível, maior é a concentração de energia por unidade de volume e seu consumo vai ser mais lento (KUMAR et al., 2011).

O material particulado geralmente encontra-se presente na forma de uma mistura de partículas com diferentes granulometrias ou tamanhos. Portanto, é preciso determinar um diâmetro médio que seja representativo. O diâmetro médio de Sauter é considerado como aquele que representa melhor a interação entre a partícula e o gás em sistemas fluidizados, sendo o mais utilizado na área de fluidização por levar em consideração tanto o volume quanto a área superficial das partículas (CORTEZ; LORA; GÓMEZ, 2008).

Uma vez determinadas as massas específicas e os diâmetros médios das partículas, é possível classificá-las segundo os grupos de Geldart (1973). Assim, pode-se estimar o comportamento do material quando fluidizado. Para realizar a estimativa é assumindo ar de massa específica  $1,2 \text{ kg.m}^{-3}$  como fluido da fluidização.

### 2.3.3 Análise imediata

Na análise imediata são determinadas as porcentagens de matéria volátil, carbono fixo, umidade e teor de cinzas do combustível. Esta análise é bem importante para o estudo do fenômeno da combustão da biomassa. Elevado conteúdo de voláteis é vantajoso, o poder calorífico aumenta quanto maior é o conteúdo de carbono fixo e matéria volátil. A existência de cinzas na biomassa pode causar problemas na ignição e combustão, além de ter associados problemas de deposições e corrosão (SAIDUR et al., 2011).

As biomassas geralmente têm grande conteúdo de voláteis, estes quando volatilizados produzem principalmente hidrocarbonetos, monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrogênio, umidade e alcatrão. A produção depende da temperatura e taxa de aquecimento. Devido ao grande conteúdo de voláteis, as biomassas são fáceis de entrar em ignição mesmo a baixas temperaturas (KHAN et al., 2009).

### 2.3.4 Análise elementar

A análise elementar de uma amostra de biomassa determina o conteúdo em porcentagem da massa de componentes químicos como carbono (*C*), hidrogênio (*H*), oxigênio (*O*), nitrogênio (*N*), enxofre (*S*) e cloro (*Cl*). É a característica técnica mais importante do combustível e constitui a base para análise dos processos de combustão, tais como cálculo dos volumes de ar, gases, entalpia, estudo do impacto ambiental e desgaste do equipamento. Também é possível estimar o poder calorífico do combustível empregando equações empíricas a partir da análise elementar (CORTEZ; LORA; GÓMEZ, 2008; SAIDUR et al., 2011).

### 2.3.5 Poder calorífico

O poder calorífico pode ser definido como a quantidade de energia liberada na forma de calor durante a combustão completa da unidade de massa do combustível ( $kJ.kg^{-1}$ ). É numericamente igual à entalpia de formação do combustível, mas sem o sinal negativo. O poder calorífico superior (PCS), é o calor da combustão calculado assumindo que toda a água dos produtos foi condensada a líquido. Assim é liberada a maior quantidade de energia, daí sua denominação de “superior”. O poder calorífico inferior (PCI), corresponde ao caso onde a água dos produtos de combustão não foi

condensada. A diferença entre PCS e PCI é a energia requerida para evaporar a umidade presente no combustível e a água de formação obtida a partir da oxidação do hidrogênio do combustível (TURNS, 2000).

O carbono e o hidrogênio aumentam o poder calorífico, enquanto que o oxigênio o diminui. A poder calorífico da lignina é maior do que da celulose e hemicelulose (KHAN et al., 2009).

Existem diversas relações empíricas, baseadas em análises estatísticas, que tentam prever o poder calorífico a partir de resultados de outras análises como a composição imediata e elemental. Cortez et al. (2008) apresenta duas formulas (2.1 e 2.2) de Jenkins, nas quais empregando o conteúdo de carbono e cinzas em base seca, é calculado o poder calorífico superior. Além destas, é apresentada a formula de Mendeliev (2.3), a qual determina o poder calorífico inferior em base úmida a partir do teor de carbono, hidrogênio, oxigênio, enxofre e umidade da biomassa. A partir do PCI, calcula-se o PCS com a equação 2.4, onde  $h_{fg0}$  é a entalpia de vaporização da água a 25°C, ou seja,  $2441,71 \text{ kJ.kg}^{-1}$ .

$$PCS (MJ.kg^{-1}) = 2,3381 + 0,351 \times C^s \quad (2.1)$$

$$PCS (MJ.kg^{-1}) = 20,180 - 0,203 \times A^s \quad (2.2)$$

$$PCI (MJ.kg_{umido}^{-1}) = 0,339 \times C^u + 0,103 \times H^u - 0,109 \times (O^u - S^u) - 24 \times W^u \quad (2.3)$$

$$PCS (MJ.kg^{-1}) = PCI + 9 \times H^s \times h_{fg0} \quad (2.4)$$

Onde:

- $C, H, O, S, A, W$  são os teores de carbono, hidrogênio, oxigênio, enxofre, cinzas e umidade respectivamente
- O superescrito “s” indica base seca e o “u” indica base úmida.

### 2.3.6 Composição estrutural

A composição estrutural de biomassas provenientes de madeiras é caracterizada pela presença de componentes fundamentais macromoleculares e componentes acidentais de baixa massa molar, Figura 2.6.

A biomassa é constituída principalmente por celulose, hemicelulose, lignina e em menor medida por lípidos, proteínas, açúcares simples, amidos, inorgânicos e água. A concentração de

cada um dos componentes varia dependendo da espécie. A combinação de celulose, hemicelulose e lignina é chamada de lignocelulose, dentro dos quais a celulose prevalece sobre os outros. A celulose e hemicelulose são macromoléculas construídas com diferentes açúcares e a lignina é um polímero aromático irregular (KHAN et al., 2009; SAIDUR et al., 2011).

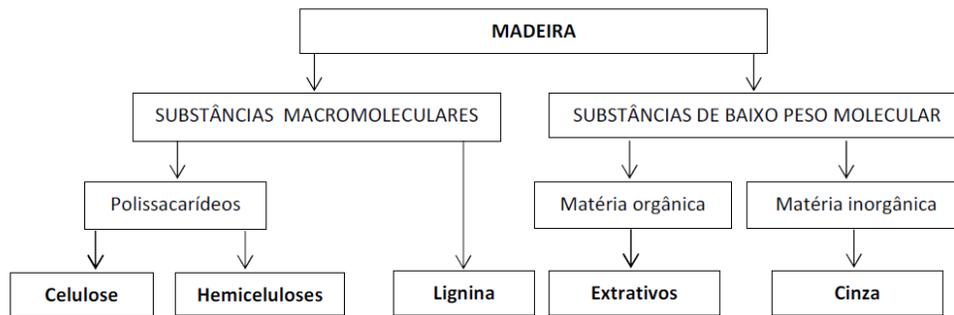


Figura 2.6: Esquema geral dos componentes químicos da madeira (FENGEL; WEGENER, 1984).

**Celulose.** A celulose é o componente predominante, sendo aproximadamente a metade da madeira (na faixa de 40 a 50%), tanto de coníferas quanto de folhosas. Pode ser brevemente caracterizada como um polímero linear de alto peso molecular e alta cristalinidade, constituído exclusivamente de  $\beta$ -D-glucose. Devido a suas propriedades químicas e físicas, além da sua estrutura supra molecular, a celulose é o principal componente da parede celular dos vegetais (FENGEL; WEGENER, 1984).

**Hemicelulose (polioses).** A hemicelulose está constituída por substâncias que formam uma matriz envolvendo a celulose, apresenta-se na faixa de 10 a 30% da massa seca da madeira e diferem da celulose pela presença da vários açúcares na sua composição, por apresentar cadeias mais curtas, com menores massas molares, e também pela presença de ramificações na cadeia. Geralmente é composta por polímeros constituídos por monossacarídeos de 5 átomos de carbono (pentoses) (FENGEL; WEGENER, 1984).

**Lignina.** São as substâncias incrustantes, que preenchem os espaços vazios na parede celular, constituem de 20 a 25% aproximadamente da massa seca nas folhosas. Sua composição química, baseada em unidades fenilpropânicas, e sua estrutura macromolecular diferem significativamente

da apresentada pelos outros dois componentes macromoleculares: celulose e hemicelulose. A lignina é um composto amorfo e ramificado, existente nos vegetais lenhosos, cuja função é dar rigidez à parede celular, agindo como um agente de endurecimento e uma barreira à degradação enzimática da parede celular (FENGEL; WEGENER, 1984).

**Substâncias de baixo peso molecular.** Junto com os componentes da parede celular existem numerosas substâncias que são chamadas de materiais acidentais ou estranhos da madeira que geralmente constituem até 10% de sua composição. Estes materiais são responsáveis muitas vezes por certas propriedades da madeira como: odor, sabor, cor, etc. Uma classificação pode ser feita dividindo-se estas substâncias em material orgânico comumente chamado de extrativos e inorgânicos obtido como cinzas. Os teores de extrativos, como terpenos, resinas, ácidos graxos, taninos, pigmentos e carboidratos, estão entre 2 e 5% em massa (FENGEL; WEGENER, 1984).

O análise da estrutura da biomassa é importante no desenvolvimento de processos de produção de outros combustíveis e produtos químicos, e no estudo de fenômenos de combustão (SAIDUR et al., 2011).

### **2.3.7 Decomposição térmica**

A decomposição térmica de uma substância é estudada por meio de análises térmicas, as quais podem ser feitas sob atmosferas oxidante e/ou inerte, simulando a combustão e a pirólise, respectivamente. Resultando assim numa ferramenta muito útil para projetar e otimizar reatores de combustão, pirólise e gaseificação. O conhecimento das características determinadas com as análises térmicas é importante para estimar a estabilidade da chama e da combustão, a formação de poluentes, etc. As análises térmicas mais empregadas são a termogravimetria, a calorimetria espectral diferencial e a análise térmica diferencial (MORTARI; ÁVILA; CRNKOVIC, 2011; STENSENG et al., 2001).

#### **Termogravimetria (TGA)**

A termogravimetria é a análise térmica mais utilizada, esta é baseada na medição da perda de massa de um material em função da temperatura, a qual pode ser fixa ou variar segundo uma taxa de aquecimento constante. Geralmente é traçada uma curva com a perda de massa (ou a

porcentagem) no eixo das ordenadas e a temperatura no eixo das abscissas. As curvas da derivada primeira da termogravimetria (DTG) da como resultados picos os quais evidenciam a perda de massa, aperfeiçoam a resolução e são mais facilmente comparadas a outras medidas.

A partir da TGA podem ser levantados aspectos dos processos térmicos como por exemplo temperatura de ignição, faixas e picos de temperaturas importantes, temperatura da máxima taxa de volatilização, teores de resíduos finais, temperatura final de secagem, pode ser estudada a cinética da combustão e determinada a energia de ativação, análise da reatividade do material.

Além disso, com a TGA sob atmosfera inerte e oxidante pode ser determinada a composição imediata do combustível. Tomando a temperatura de 105°C como o ponto da secagem total da biomassa (temperatura empregada na análise imediata) pode ser determinada a umidade da amostra. Considerando a porcentagem de massa residual que fica a temperatura final da TGA (acima de 600°C) sob atmosfera oxidante e inerte como a massa de cinzas e carbono fixo + cinzas, respectivamente, calcula-se os teores de voláteis, carbono fixo e cinzas.

### **Calorimetria espectral diferencial (DSC)**

No aquecimento, algumas modificações físicas e químicas não têm associado uma modificação na massa, então estas não são identificadas pela termogravimetria, mas sim pela calorimetria espectral diferencial. DSC é a técnica na qual o fluxo de calor entre uma amostra e uma substância termicamente inerte é medida em função da temperatura enquanto as duas substâncias são submetidas a uma programação controlada de temperatura. O princípio do método é medir o fluxo de calor da amostra associada a mudanças físicas e químicas durante o aquecimento enquanto tanto a amostra quanto a substância de referência encontram-se à mesma temperatura.

Com a DSC podem ser determinadas e quantificadas a ocorrência de reações exotérmicas e/ou endotérmicas e a variação da capacidade calorífica, entre outras.

### **Análise térmica diferencial (DTA)**

A análise térmica diferencial é uma técnica na qual é quantificada informação similar à DSC, porém, de um jeito diferente. Na DTA há dois cadinhos, um com a amostra e o outro com o material de referência, os quais são submetidos a uma programação controlada de temperatura. Só que a variável quantificada é a diferença de temperatura entre os dois matérias quando ocorrem reações

endotérmicas ou exotérmicas na amostra. Esta análise é menos precisa do que a DSC, porém, é preferida para trabalhar a altas temperaturas porque a radiação pode influenciar a medição na DSC, fato que não acontece na DTA.

### 2.3.8 Análise das cinzas

As cinzas são a parte inorgânica (mineral) do combustível que resta após a combustão completa. Os principais elementos inertes que constituem as cinzas são *Si*, *Al*, *Ti*, *Fe*, *Ca*, *Mg*, *Na*, *K*, *S* e *P* na forma de óxidos. O conteúdo de cinzas tem uma influencia negativa nos processos de termo-conversão da biomassa, como a formação de deposições e a corrosão, os quais são detalhados na seção 2.4.7 (KHAN et al., 2009).

Para estimar a ocorrência de deposições são calculados três índices, o índice alcalino, a relação base-ácido ( $R_{b/a}$ ) e o índice de aglomeração ( $BAI$ ) com as equações 2.5, 2.6 e 2.7 respectivamente (VAMVUKA; ZODGRAFOS, 2004).

$$AI[kg.GJ^{-1}] = \frac{K_2O + Na_2O}{PCS} \quad (2.5)$$

$$R_{b/a} = \frac{\%(Fe_2O_3 + CaO + MgO + K_2O + Na_2O)}{\%(SiO_2 + TiO_2 + Al_2O_3)} \quad (2.6)$$

$$BAI = \frac{\%(Fe_2O_3)}{\%(K_2O + Na_2O)} \quad (2.7)$$

Quando o índice alcalino se encontra na faixa de 0,17 e 0,34  $kg.GJ^{-1}$  existe possibilidade de ocorrência de *fouling* e/ou *slagging*. Caso o  $AI$  seja maior do que 0,34  $kg.GJ^{-1}$  é virtualmente certa a ocorrência de *fouling* e/ou *slagging*. A relação base-ácido faz referência à concentração de cada composto nas cinzas. Quanto maior seja  $R_{b/a}$ , maior é a tendência de ocorrer *fouling*. Em relação ao índice de aglomeração, este fenômeno aparece quando o  $BAI$  é menor que 0,15.

## 2.4 Tecnologias da combustão da biomassa

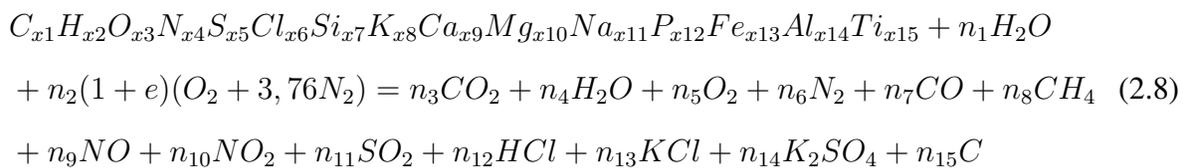
Existem vários métodos para converter a biomassa em uma forma de energia utilizável. Entre os principais encontram-se a combustão direta, a pirólise e a gaseificação. A utilização de métodos

de conversão bioquímica como a fermentação e a digestão são preferidos quando a biomassa tem grande teor de umidade (SAIDUR et al., 2011).

Segundo os objetivos marcados neste trabalho, é de interesse aprofundar unicamente nas tecnologias de combustão da biomassa, e assim empregar alguns dados levantados na bibliografia para a avaliação do potencial energético das biomassas analisadas.

A combustão da biomassa é um processo complexo constituído por reações homogêneas e heterogêneas consecutivas. As etapas essenciais da combustão de biomassa incluem a secagem, devolatilização, gaseificação, combustão do carbono fixo e as reações da fase gasosa. A composição e as características físico-químicas do combustível são fatores determinantes em cada uma das etapas, assim como condições do processo (temperatura, pressão, taxa de aquecimento, excesso de ar, etc.) (KHAN et al., 2009).

O conhecimento das características do combustível e como elas influenciam no processo de combustão, são fatores importantes para o projeto e controle dos sistemas de combustão. A reação global de combustão pode ser representada pela equação 2.8 (JENKINS et al., 1998).



As aplicações da biomassa na indústria abrangem uma ampla faixa de possibilidades, como por exemplo nas operações de secagem, produção de água quente, óleo térmico ou a geração de vapor. Para gerar vapor, a biomassa pode ser utilizada em caldeiras tanto flamotubulares quanto aquotubulares, dependendo da quantidade e parâmetros do vapor desejado (pressão e temperatura). As do tipo flamotubulares são utilizadas principalmente quando a pressão de vapor necessária não é maior do que  $20 \text{ kg.cm}^{-2}$  em operações pequenas e medianas. Estas são relativamente baratas. As aquotubulares são utilizadas em usinas maiores e geralmente para geração de energia elétrica (MASERA; AGUILLÓN; GAMINO, 2005).

A combustão de madeira e resíduos florestais em fornalhas de caldeiras é uma prática bem difundida. Geralmente as caldeiras são projetadas prevendo a possibilidade da queima de diferentes combustíveis de biomassa, o que inclui a lenha, o bagaço e variados resíduos agrícolas (MASERA; AGUILLÓN; GAMINO, 2005).

### 2.4.1 Classificação das fornalhas para a combustão de biomassa

Fornalha é a denominação genérica que se dá para o local onde se queima o combustível e onde os produtos da combustão são originados. É formada por duas partes distintas:

1. O aparelho de combustão
2. A câmara de combustão

O aparelho de combustão compreende um conjunto de componentes que oferecem as condições necessárias para a queima de combustível. A câmara de combustão é representada por um volume adequadamente dimensionado onde se desenvolve a chama e se completa a combustão, além de propiciar a proteção e os suportes necessários para o aparelho de combustão (ELECTRO-NUCLEAR, 2008).

As fornalhas podem ser classificadas de duas maneiras: a primeira, dependendo da maneira com que é realizada a combustão (em camada - leito fixo e em suspensão); e a segunda, atendendo às características construtivas da mesma. Na Tabela 2.7 são apresentados os diferentes tipos de fornalhas para biomassa (SILVA-LORA; ZAMPIERI, 2008).

Tabela 2.7: Classificação das fornalhas para biomassa (SILVA-LORA; ZAMPIERI, 2008)

Em Camada ou Leito Fixo	Em Suspensão
Celulares	Ciclônica
Grelha Estacionária Horizontal	Leito Fluidizado Borbulhante
Grelha Estacionária Inclinada	
Grelha Móvel Mecânica	Leito Fluidizado Circulante
Grelha Móvel Rotativa	
Grelha Móvel Vibrante	Queima em Suspensão

Os dois tipos de fornalhas mais empregadas para a combustão de biomassa são as de grelha (leito fixo) e as de leito fluidizado. As duas têm boa flexibilidade quanto ao combustível e podem trabalhar tanto com biomassa quanto em co-combustão com carvão mineral. As fornalhas de leito fluidizado são a melhor tecnologia para queimar combustíveis de baixa qualidade, com grande

conteúdo de cinzas e baixo poder calorífico. As fornalhas de queima em suspensão e a ciclônica são geralmente utilizadas em co-combustão de pellets de biomassa moída com carvão pulverizado ou gás natural. Além disso, as fornalhas de queima em suspensão são mais sensíveis à mudanças na qualidade do combustível, e requerem maior preparação e manuseio da biomassa (YIM; ROSENDAHL; KAER, 2008; SAIDUR et al., 2011).

A seleção do tipo de fornalha a ser utilizada para uma determinada aplicação industrial deve levar em conta o tipo e grau de preparação prévia da biomassa, quantidade e parâmetros (pressão e temperatura) do vapor a ser produzido e disponibilidade de capital (SILVA-LORA; ZAMPIERI, 2008).

#### **2.4.2 Fornalhas de leito fixo**

A combustão em grelhas foi o primeiro sistema de combustão utilizado para queimar combustíveis sólidos. A capacidade das caldeiras com fornalhas de grelha encontra-se na faixa de 4 a 300  $MW_e$  em plantas de cogeração de energia elétrica e térmica (YIM; ROSENDAHL; KAER, 2008).

As caldeiras modernas basicamente estão constituídas por quatro componentes: sistema de alimentação da biomassa; a grelha; o sistema de ar secundário; e o sistema de descarga das cinzas (YIM; ROSENDAHL; KAER, 2008).

#### **Aspectos da combustão em fornalha de leito fixo**

Na combustão em leito fixo, a espessura da camada altera o mecanismo da queima. Quando se tem uma camada grossa, existe uma zona de redução onde o carbono reage com o  $CO_2$  produto da combustão, formando  $CO$ , assim é produzida uma chama pela queima dos voláteis e do  $CO$  acima da camada. A combustão em camada fina é caracterizada pela ausência da zona de redução, o que faz a chama ser produto apenas da queima dos voláteis (SILVA-LORA; ZAMPIERI, 2008).

A grelha, a qual é situada na parte inferior da câmara de combustão, atende duas funções principalmente: transporta o combustível longitudinalmente, e distribui o ar primário que entra por baixo da grelha. O ar primário desempenha um papel muito importante na eficiência e na combustão completa da biomassa. O excesso de ar é normalmente 25% ou superior e a tendência

da relação entre o ar primário e o secundário é de 40/60 nas caldeiras modernas, em lugar de 80/20 que era empregado nas caldeiras mais antigas (YIM; ROSENDAHL; KAER, 2008).

A distribuição do ar primário e o movimento da grelha afetam a mistura e a conversão da biomassa no leito. A biomassa que está no fundo do leito encontra-se exposta ao ar primário preaquecido, enquanto a parte de cima do leito está dentro da câmara de combustão exposta à radiação. O leito consiste em uma enorme quantidade de partículas sólidas empilhadas sobre a grelha com uma determinada porosidade. O leito é aquecido pela sua parte superior pela radiação da chama e as paredes refratárias até atingir a ignição no topo do leito. A propagação da frente de ignição é muito importante porque determina a liberação dos voláteis e afeta a estabilidade da combustão. Logo após a ignição, a frente de reação avança na direção contrária à direção do ar primário. Quando a frente de reação atinge a superfície da grelha, uma segunda frente de reação propaga-se para cima queimando o carvão gerado anteriormente (YIM; ROSENDAHL; KAER, 2008).

As propriedades do combustível (teor de umidade, poder calorífico e tamanho das partículas) e as condições de operação (incluindo a vazão de ar primário) têm uma influencia significativa no comportamento da combustão no leito (YIM; ROSENDAHL; KAER, 2008).

O sistema de ar secundário é um dos elementos mais importantes para otimizar a combustão dos gases acima da camada de material sólido, para obter uma combustão completa e reduzir as emissões. Contribuem na Redução da formação de  $NO_X$  mediante a redução da temperatura de chama. O sistema de ar secundário é um dos jeitos mais flexíveis para modernizar caldeiras velhas (YIM; ROSENDAHL; KAER, 2008).

O ar secundário prolonga o tempo de residência do combustível no reator, distribui a temperatura mais uniformemente, e conduz a uma queima mais eficiente. Na Figura 2.7 são apresentados diferentes sistemas de injeção do ar secundário os quais geram zonas de recirculação e fluxos rotacionais. Os estágios na combustão de biomassa em leito fixo são apresentados na Figura 2.8 (YIM; ROSENDAHL; KAER, 2008).

### **Descrição e características das fornalhas de leito fixo**

**Fornalhas celulares:** Nesse tipo de fornalha, o combustível é queimado em uma pilha (monte) numa câmara de tijolos refratários com admissão de ar por todas as direções através de bocais

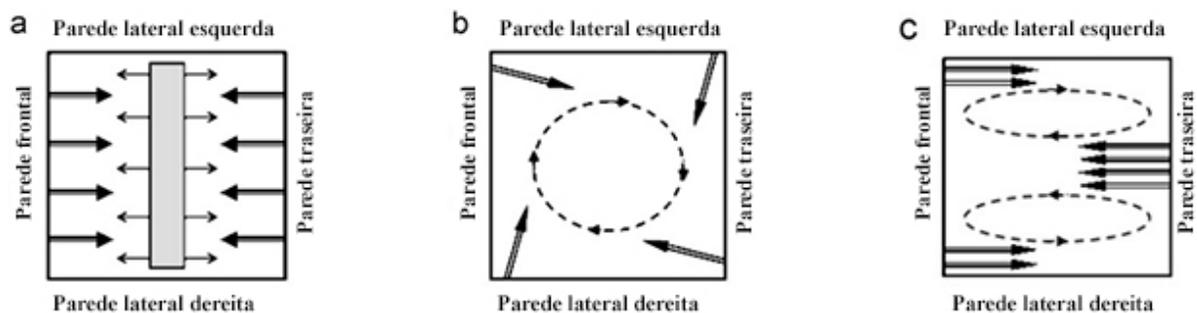


Figura 2.7: Configurações da injeção do ar secundário (YIM; ROSENDAHL; KAER, 2008)

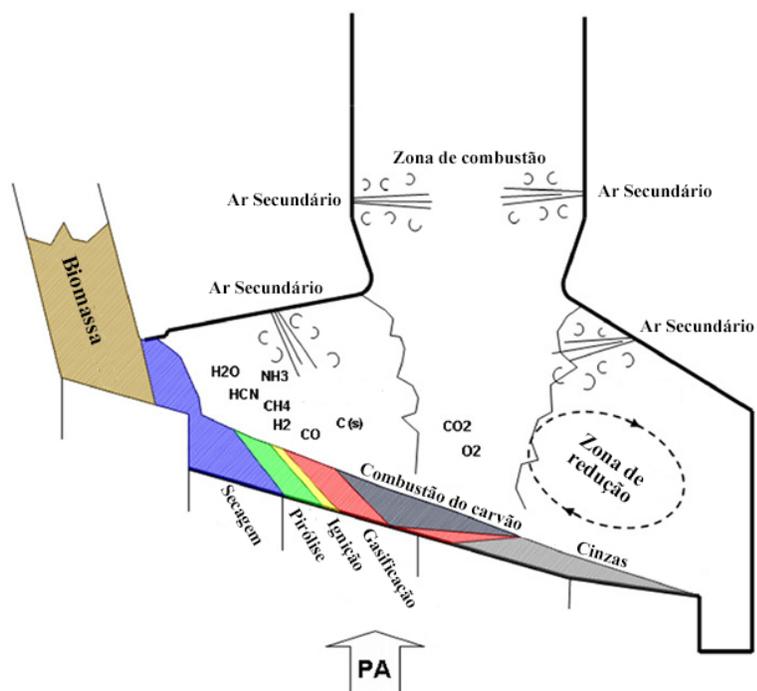


Figura 2.8: Fornecimento de ar e as diferentes zonas da combustão na fornalha de leito fixo (YIM; ROSENDAHL; KAER, 2008).

na parede da câmara. É típico de caldeiras antigas, sendo os tipos mais difundidos a fornalha de ferradura e a fornalha “ward”. Outra versão de fornalha celular, que ainda é fabricada, é a fornalha “dutch oven”, a qual permite queimar biomassa com umidade até 65%, devido à possibilidade de injetar ar a alta temperatura. A capacidade máxima das caldeiras que utilizam esse tipo de fornalha é de  $45 \text{ t.h}^{-1}$  de vapor (SILVA-LORA; ZAMPIERI, 2008).

**Fornalhas de grelha estacionária horizontal:** A grelha estacionária horizontal pode ser de alimentação inferior ou superior. A de alimentação superior é mais conhecida como grelha basculante (“spreader stocker furnace”) e a alimentação do combustível pode ser feita por distribuidores mecânicos ou pneumáticos. São caracterizadas pela simplicidade de operação e manutenção, porém tem como desvantagens a dificuldade de manter uma espessura uniforme da camada de combustível, ocasionando instabilidade na combustão e não são sistemas recomendados para combustão de biomassa de granulometria fina, como a serragem ou o bagaço das usinas modernas. É possível queimar combustíveis com umidade entre 5 e 60%. A tensão térmica da superfície da grelha ( $Q_A$ ) é  $0,47 \text{ MW.m}^{-2}$ , e a fornalha tem uma capacidade de até 9 MW. Na Figura 2.9A é apresentada uma caldeira aquotubular com grelha basculante (SILVA-LORA; ZAMPIERI, 2008).

**Fornalha de grelha estacionária inclinada:** Nas fornalhas de grelha estacionária inclinada (2.9C), a inclinação da grelha ( $37^\circ$  a  $55^\circ$ ) condiciona a espessura e a velocidade de deslocamento da camada de combustível e é escolhida de acordo com as características do combustível a ser utilizado. Nos projetos modernos, a grelha é apoiada nos tubos evaporadores do fundo da fornalha e possui um sistema de limpeza com jatos de vapor para a retirada das cinzas. As principais vantagens são que não possui partes móveis, permite temperaturas de preaquecimento do ar da ordem de  $315$  a  $480^\circ\text{C}$  sem causar danos à grelha, geralmente a distribuição do ar é homogênea em toda a área da grelha e permite uma umidade máxima de 65%. Como desvantagens apresenta um difícil controle da combustão e o risco de existência de avalanches de combustível. É recomendada uma tensão térmica ( $Q_A$ ) na faixa de  $1,40$  a  $3,0 \text{ MW.m}^{-2}$ , e a tensão volumétrica ( $Q_V$ ) na faixa de  $0,2$  a  $0,35 \text{ MW.m}^{-3}$ . A capacidade das caldeira que operam com esse tipo de fornalha está na faixa de  $15$  a  $140 \text{ t.h}^{-1}$  de vapor (SILVA-LORA; ZAMPIERI, 2008; YIM; ROSENDAHL; KAER, 2008).

**Fornalha de grelha mecânica:** Também conhecida como grelha caminhante (Figura 2.9B), possui componentes móveis, com a finalidade de movimentar o combustível pela grelha de acordo com os diferentes estágios da combustão, e pode chegar a agitar e virar o combustível, o que gera uma boa combustão do carvão. São sistemas complexos e caros, recomendados para combustíveis de difícil combustão e alta umidade. A inclinação varia entre 5 e 15°, a umidade máxima pode ser de 60 a 65%. A tensão térmica da grelha ( $Q_A$ ) pode ser entre 1,2 a 1,8  $MW.m^{-2}$  e a capacidade das caldeiras de 15 a 120  $t.h^{-1}$  de vapor (SILVA-LORA; ZAMPIERI, 2008; YIM; ROSENDAHL; KAER, 2008).

**Fornalha de grelha rotativa:** São compostas por um sistema de alimentação e uma esteira mecânica (Figura 2.9D), e podem operar concorrente ou contracorrente. Comparadas com outros tipos de fornalhas, apresentam as seguintes vantagens:

- Eliminação contínua das cinzas sem necessidade de paradas para limpeza.
- Possibilidade de regulação da velocidade de deslocamento e da espessura da camada de combustível sobre a grelha.
- Em caso de necessidade, ao apagar-se a fornalha, pode-se acelerar a velocidade da grelha e retirar o combustível.

Para combustão de madeira, turfa e bagaço geralmente a capacidade da caldeira não passa de 200  $t.h^{-1}$  de vapor. Devido à complexidade e ao alto custo das grelhas rotativas, recomenda-se utilizá-las para aplicações acima de 100  $t.h^{-1}$ . A temperatura do ar primário não deve exceder 230 a 290°C, o qual representa entre 25 e 50% do ar total. O excesso de ar para fornalhas de grelhas rotativas a contracorrente é de 40%, sendo maior nas concorrente, 55%. A umidade máxima admissível do combustível é da ordem de 55%. As tensões térmicas superficial e volumétrica da grelha estão na faixa de 1,39 a 2,09  $MW.m^{-2}$  e de 0,15 a 0,55  $MW.m^{-3}$  respectivamente. Comparado com as grelhas estacionárias inclinadas, a rotativa tem um melhor controle e melhor eficiência da combustão do carvão. Porém, tem maior quantidade de partes moveis, as quais estão expostas ao calor, o que aumenta os custos de manutenção (KITTO; STULTZ, 2005d; SILVA-LORA; ZAMPIERI, 2008; YIM; ROSENDAHL; KAER, 2008).

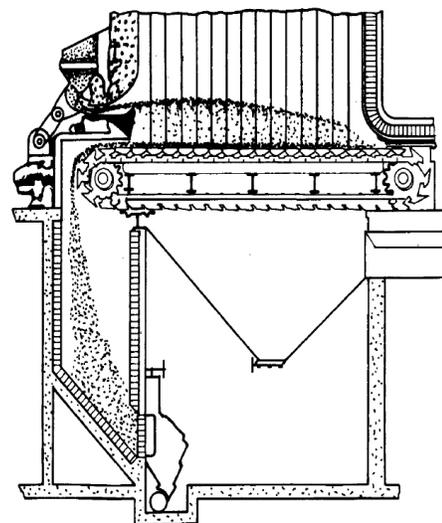
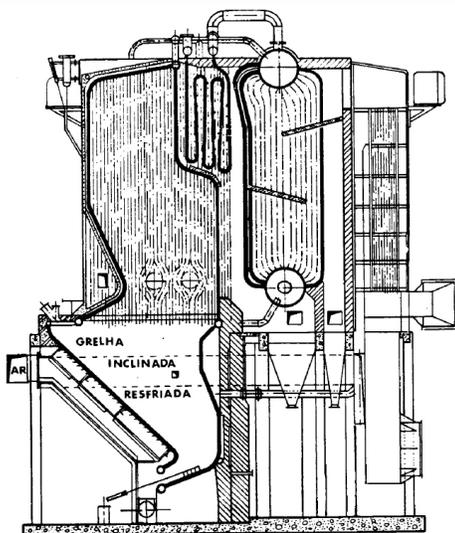
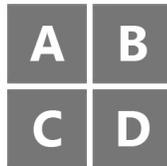
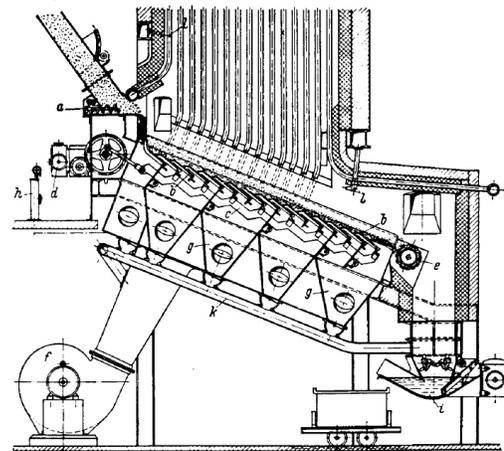
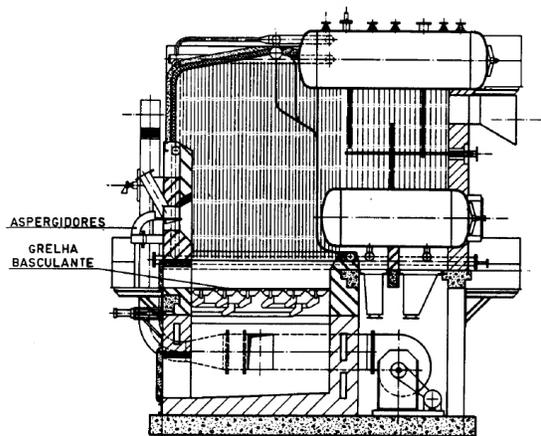


Figura 2.9: (A) Caldeira com grelha basculante; (B) Grelha mecânica ou caminhante; (C) Caldeira com grelha inclinada; (D) Grelha rotativa contracorrente (ELECTRONUCLEAR, 2008)

**Fornalhas de grelha vibrante:** As grelhas vibrantes (Figura 2.10) são as que geralmente têm maior vida útil e disponibilidade<sup>2</sup> do que o resto das grelhas com partes móveis. A grelha é feita com tubulações, as quais podem ser resfriadas com água ou ar. Quando são resfriadas com água, a grelha é parte do corpo de pressão da caldeira. Assim, a temperatura do ar primário pode ser elevada (acima de 350°C), pode ser empregada uma grande porcentagem de ar secundário e uma camada de combustível relativamente fina. Caso a grelha seja resfriada com ar, a temperatura do ar primário pode atingir cerca de 290°C no máximo. Com um movimento de agitação intermitente espalha uniformemente o combustível e remove as cinzas. A vibração ocorre a alta frequência e baixa amplitude durante 2% do tempo. Uma seqüência comum é de seis ciclos por segundo durante dois segundos a cada dois minutos. Este tipo de grelha têm menor quantidade de partes móveis do que nas outras grelhas móveis, o que reduz a manutenção e aumenta a vida útil (KITTO; STULTZ, 2005d; YIM; ROSENDAHL; KAER, 2008).

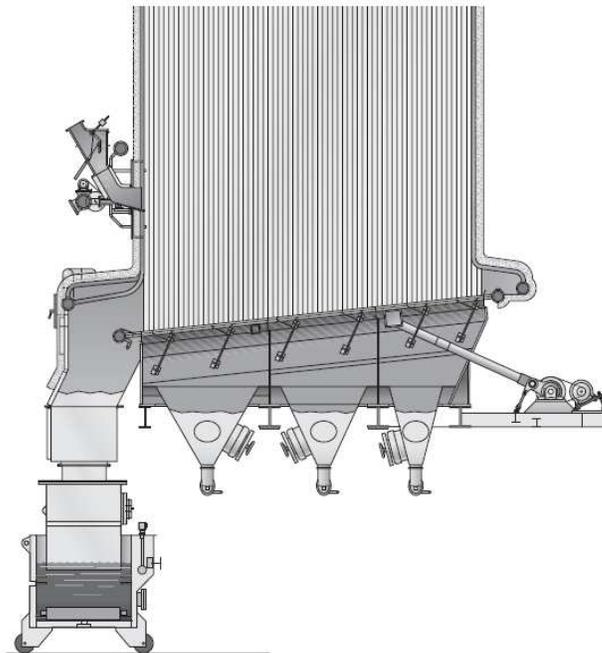


Figura 2.10: Grelha mecânica vibrante (KITTO; STULTZ, 2005c)

---

<sup>2</sup>Disponibilidade de um equipamento: É a parcela do tempo que o equipamento pode ser utilizado

### 2.4.3 Fornalhas de leito fluidizado

Na combustão em suspensão é possível assumir que as partículas durante sua trajetória dentro da fornalhas queimam de maneira isolada umas das outras, passando consecutivamente pelos seguintes estágios: aquecimento, secagem, emissão e combustão dos voláteis, e combustão do carbono fixo. Nas fornalhas de leito fluidizado, um leito inicialmente estacionário de partículas sólidas (geralmente areia), é levado a um estado fluidizado pelo ar primário, o qual é fornecido pela placa distribuidora (SILVA-LORA; ZAMPIERI, 2008; KHAN et al., 2009).

Para garantir uma combustão completa, é preciso recircular os gases quentes para a zona de introdução do combustível ou pre-aquecer o ar primário para garantir a secagem rápida, emissão e ignição dos voláteis. Além disso, deve-se procurar a circulação múltipla das partículas a fim de garantir o tempo de permanência necessário para a combustão das partículas maiores. É introduzido ar secundário no topo do leito para garantir a combustão da fase gasosa e as vezes ar terciário acima do leito. A combustão ocorre a uma temperatura de 730-900°C, a qual é controlada pelos tubos trocadores de calor, sendo consideravelmente menor que a temperatura nas fornalhas de leito fixo (1200°C aprox.). As fornalhas de leito fluidizado podem ser subdivididas em dois grupos de acordo com o tipo de leito e o regime de fluidização: leito fluidizado borbulhante e circulante (SILVA-LORA; ZAMPIERI, 2008; KHAN et al., 2009).

**Fornalhas de leito fluidizado borbulhante:** Na fornalha de leito fluidizado borbulhante (ou convencional), Figura 2.11b, o combustível é queimado num leito de altura definida, utilizando ar pre-aquecido com os gases de escape. A velocidade do ar encontra-se na faixa de 1,2 a 3,7 m/s. A pressão de trabalho pode ser a atmosférica ou a pressão elevada. A fornalha é formada principalmente pela placa distribuidora pela qual é soprado o ar de fluidização, tubulações de água ou vapor (trocadores de calor) imersos no leito que extraem calor diretamente do leito e tubulações acima do leito, na zona da combustão dos gases. A caldeira é constituída por um sistema de alimentação do combustível, a placa distribuidora, os trocadores de calor no leito e acima dele e um sistema de manipulação das cinzas (SAIDUR et al., 2011).

**Fornalhas de leito fluidizado circulante:** Na fornalha de leito fluidizado circulante (Figura 2.11a), as velocidades do ar encontram-se na faixa de 3,7 a 9 m/s, o que provoca o arraste das

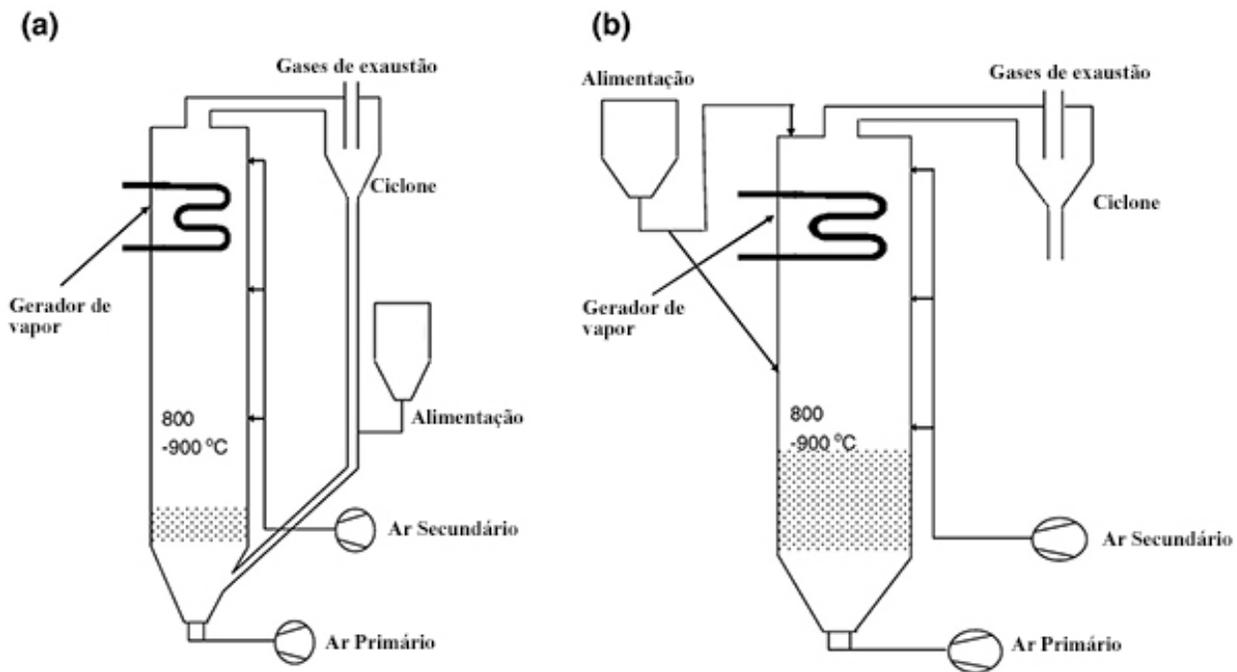


Figura 2.11: (a) Fornalha de leito fluidizado circulante; (b) Fornalha de leito fluidizado borbulhante (KHAN et al., 2009)

partículas menores do combustível. O ar primário (o ar de fluidização) representa entre 60 e 70% do total, sendo o restante ar secundário injetado na parte superior da fornalha. As partículas menores ( $<450 \mu m$ ) são arrastadas e um conjunto de separadores ciclônicos situados na saída da fornalha reintegra as mesmas no leito para que a combustão seja concluída. Geralmente as fornalhas de leito fluidizado circulante têm maior eficiência que as de leito borbulhante pelo fato de ter maiores velocidades de fluidização (SAIDUR et al., 2011; KHAN et al., 2009).

O emprego de caldeiras equipadas com leito fluidizado circulante é uma boa opção quando são caldeiras de média a grande capacidade, o controle das emissões de enxofre e  $NO_x$  são importantes e a qualidade do combustível é baixa ou tem grandes flutuações.

### Vantagens e desvantagens das fornalhas de leito fluidizado

As principais vantagens das fornalhas de leito fluidizado são (KHAN et al., 2009; SAIDUR et al., 2011):

- A elevada eficiência, com uma eficiência da combustão<sup>3</sup> de 95% independentemente do con-

<sup>3</sup>Eficiência de Combustão: Relação entre o calor liberado na combustão e a energia armazenada no combustível

teúdo de cinzas e uma eficiência total da caldeira<sup>4</sup> de  $84 \pm 2\%$ .

- Menor tamanho, pelo elevado coeficiente de troca de calor entre o leito e as superfícies, estas são menores e assim a caldeira é menor.
- Elevada superfície de troca entre o gás e as partículas.
- Distribuição uniforme da temperatura.
- Flexibilidade do combustível, podendo trabalhar com uma grande variedade de combustíveis, com diferentes tamanhos, formas, conteúdo de umidade e poder calorífico.
- Combustão estável a baixa temperatura ( $850^{\circ}\text{C}$  aprox.).
- Capacidade de queimar combustíveis pobres, com poder calorífico baixo e grande conteúdo de cinzas.
- Controle da poluição, pela baixa temperatura de combustão é eliminada a formação de  $\text{NO}_x$  e a formação de  $\text{SO}_2$  pode ser controlada através da adição de calcário dolomítico.
- Facilidade para extrair as cinzas.
- Menor excesso de ar e maior  $\text{CO}_2$  no gás. O conteúdo de  $\text{CO}_2$  encontra-se entre 14 e 15% do gás e a fornalha pode trabalhar com excesso de ar entre 20 e 25%.
- Rápida resposta a mudanças na demanda de vapor.
- Elevada disponibilidade pelo fato de não ter partes moveis na zona de combustão o que reduz a manutenção.

Como desvantagens destaca-se a necessidade de utilizar sistemas muito eficientes de separação do sólido (vários ciclones e precipitadores eletrostáticos), a elevada erosão devida à grande velocidade das partículas (especialmente nos leitos fluidizados circulantes), o elevado arraste de pó e a formação de aglomerados dentro do leito que podem provocar uma parada abrupta (KHAN et al., 2009).

---

<sup>4</sup>Eficiência de Caldeira: Relação entre o calor absorvido pelo fluido de trabalho e a energia armazenada no combustível

#### **2.4.4 Outras fornalhas de queima em suspensão**

##### **Fornalhas ciclônicas**

Este tipo de fornalha pode ser posicionado de maneira vertical, horizontal ou inclinada. O ar secundário é injetado tangencialmente a alta velocidade (90 a 100 m/s), criando um vórtex dentro da fornalha, que permite a circulação múltipla das partículas do combustível e sua combustão total. A máxima umidade do combustível é de 65% e caracteriza-se por um excesso de ar baixo (1,08 a 1,1). A alta velocidade dos gases acarreta uma perda de carga hidrodinâmica considerável, o que constitui a principal desvantagem do sistema. Adicionalmente, a alta temperatura existente no interior da câmara de combustão provoca um aumento da concentração dos óxidos de nitrogênio nos produtos da combustão (SILVA-LORA; ZAMPIERI, 2008).

A fornalha ciclônica é apropriada para queimar qualquer tipo de biomassa sólida e líquida, desde que possa ser transportada pneumaticamente. Então a faixa de tamanhos de partículas deve estar entre 0,1 e 20 mm. A câmara torsional pode ser utilizada para queimar os gases gerados em um gaseificador, ou uma mistura de gases e partículas sólidas (BERKES, 2010).

##### **Fornalha de queima em suspensão**

Nesses sistemas, o combustível é alimentada por queimadores. Caracterizam-se por não possuírem grelhas ou por serem estas de dimensões pequenas. Permitem a queima de combustíveis de granulometria fina, previamente triturados. São sistemas caros, porém são recomendados para caldeiras de alta capacidade, de 180 a 550  $t.h^{-1}$  de vapor. O teor de umidade da biomassa deve ser menor do que 15% e as partículas não devem ser maiores que 6 ou 7 mm (SILVA-LORA; ZAMPIERI, 2008).

#### **2.4.5 Eficiência das caldeiras**

A eficiência de combustão define-se como a relação (quociente) entre a energia liberada na combustão e a energia armazenada no combustível. Diferencia-se da eficiência da caldeira, a qual é o quociente entre a energia absorvido pelo fluido de trabalho e a energia armazenada no combustível. A eficiência da combustão em fornalhas de leito fluidizado é acima de 95%, sendo maior nos leitos fluidizados circulantes (até 99%) do que nos borbulhantes pelo fato de ter uma mistura

melhor do leito e que geralmente o tamanho das partículas é menor. A eficiência das caldeiras de leito fluidizado varia na faixa de 75 e 92% em relação ao PCS. Esta eficiência está influenciada pelas características do combustível, principalmente pelo teor de umidade, o qual tem um impacto negativo significativo. Outros aspectos que reduzem a eficiência das caldeiras é a perda de calor por radiação e convecção, a temperatura dos gases de exaustão, o calor sensível dos resíduos (ex. cinzas), e a capacidade e os parâmetros do vapor desejado. Quanto maior é a capacidade da caldeira (“scale up”), maior é a eficiência (GUNGOR, 2010; KOORNNEEF; JUNGINGER; FAAIJ, 2007; SAIDUR et al., 2011; SOUZA-SANTOS; CHAVEZ, 2012).

A eficiência das caldeiras com fornalhas de leito fixo geralmente têm eficiências menores do que as de leito fluidizado. Mohon Roy et al. (2013) apresenta resultados de eficiências na faixa de 70 a 75% segundo o PCS, queimando pellets de madeira numa fornalha piloto. A eficiência em caldeiras com grelha móvel é da ordem de 76% baseado no poder calorífico inferior (ZHANG et al., 2010).

#### **2.4.6 Comparação entre as fornalhas de leito fixo e leito fluidizado**

Na Tabela 2.8 é feita uma comparação de alguns aspectos importantes da combustão e operação de caldeiras com fornalhas de leito fixo e de leito fluidizado empregadas na combustão de biomassas.

#### **2.4.7 Influência das cinzas**

Os metais alcalinos e alcalinos-terrosos em combinação com outros elementos como o silício e o enxofre e com a presença de cloro, são responsáveis pela maioria das reações indesejáveis nas fornalhas e caldeiras (JENKINS et al., 1998).

Os problemas de deposição e corrosão são uma das questões mais importantes na hora de projetar e operar um sistema de combustão. O material particulado gerado na combustão de combustíveis sólidos pode depositar-se nas paredes da fornalha ou nas tubulações dos trocadores de calor, o que reduz a troca de calor e pode causar problemas de corrosão. As fornalhas de biomassa geralmente têm maiores problemas de deposição e corrosão que as que queimam carvão mineral (YIM; ROSENDAHL; KAER, 2008).

Tabela 2.8: Comparação entre as fornalhas de leito fixo e leito fluidizado. Adaptado de (YIM; ROSENDAHL; KAER, 2008)

	Fornalha de Leito Fixo	Fornalha de Leito Fluidizado
Flexibilidade do combustível	Pode queimar combustíveis heterogêneos com tamanho de partícula grande e elevada umidade (até 65%). Comparativamente, a grelha necessita mais ajustes para trabalhar com um determinado combustível do que as fornalhas de leito fluidizado.	Pode queimar uma grande faixa de combustíveis com diferentes tamanhos, formas, umidade (até 65%) e poderes caloríficos.
Mistura dos sólidos e intensidade da combustão no leito	Mistura média nas grelhas rotativas e boa para as grelhas vibrantes e caminantes. Inestabilidades na combustão do leito são muito comuns.	Mistura de sólidos (material inerte do leito e o combustível sólido) muito intensa, levando a distribuições de temperatura muito uniformes e elevada intensidade de combustão.
Aglomerção do leito	O sistema de combustão na grelha é insensível à aglomeração do leito.	Muito sensível à aglomeração do leito porque pode ocasionar a desfluidização e uma parada não programada. O problema pode ser mitigado com o emprego de aditivos ou materiais inertes especiais no leito. Não existem problemas na combustão de cavacos e resíduos de madeira, casca de arroz e fibra de palmeira.
Desgaste dos componentes da fornalha	Pouco	Elevado desgaste dos componentes da fornalha devido à alta velocidade dos sólidos.
Emissões	Pode atingir emissões de $NO_x$ baixas utilizando sistemas de ar secundário avançados.	Emissões de $NO_x$ muito baixas nas fornalhas de leito fluidizado circulante, principalmente pela circulação do carvão. No leito fluidizado borbulhante, o controle de $NO_x$ é mais difícil, requerendo sistemas de ar sofisticados ou as vezes redução não catalítica seletiva.
Cinzas volantes	Os gases de combustão têm arraste de pó muito baixo. As cinzas têm altos níveis de carbono parcialmente queimado.	O arraste de sólidos no leito fluidizado circulante é até cem vezes maior do que no leito fixo porque os materiais do leito seguem aos gases de combustão. São necessários equipamentos de separação dos sólidos. Boa queima das cinzas volantes.
Operação a carga parcial	A operação a carga parcial pode ser boa.	A operação a carga parcial requer tecnologia especial.
Custo da inversão	De médio a baixo	Elevado para as fornalhas de leito fluidizado circulante. O leito fluidizado borbulhante é menos caro que o leito circulante.
Custo de operação e manutenção	Médio nas grelhas rotativas e muito baixo nas grelhas vibrantes	O custo de operação no leito circulante é elevado devido à grande queda de pressão ao longo do leito e o custo de manutenção é elevado pelo grande desgaste (erosão).

A deposição das cinzas é causado em parte pelas propriedades do combustível, mas também pelos parâmetros de operação e projeto da fornalha (YIM; ROSENDAHL; KAER, 2008).

As biomassas geralmente têm grandes conteúdos de  $K$  e  $Na$ , os quais têm baixo ponto de fusão, conseqüentemente poderiam aumentar a tendência das deposições. Porém, as misturas de metais presentes nas cinzas não têm um ponto de fusão determinado, eles derretem gradualmente em uma faixa de temperaturas onde a diferença entre a temperatura inicial e final da fusão pode ser de centenas de graus. É assumido que as partículas não aderem na superfície a temperatura menores que a temperatura pegajosa ( $T_{15}$ : 15% de material fundido) (YIM; ROSENDAHL; KAER, 2008).

Os resíduos florestais de eucalipto apresentam grande teor de cinzas comparados com outras biomassas, principalmente a casca e as folhas (5 a 7% em base seca), sendo menor nos galhos (1 a 3,5% em base seca) (PÉREZ et al., 2006).

### **Mecanismo de formação das deposições e a corrosão a alta temperatura**

De um modo geral, tanto o material inorgânico (alcalinos) volátil quanto as partículas de material inerte não volátil contribuem na formação de deposições nos trocadores de calor. A corrosão é gerada a partir de gases de Cl-espécies, reações em fase sólida de Cl-espécies nas deposições, reações de Cl-espécies fundidas e enxofre fundido. Qual dos mecanismos é o dominante vai depender da temperatura da combustão, da temperatura das tubulações e a presença de elementos como metais alcalinos, enxofre, silício e alumínio. Na Figura 2.12 é esquematizado um mecanismo de corrosão com enxofre. A fase fundida aumenta a taxa de corrosão porque as reações químicas são mais rápidas na fase líquida (YIM; ROSENDAHL; KAER, 2008).

**Formação das deposições:** Na combustão de um combustível, somente uma pequena parcela das cinzas vai causar problemas de deposição. O processo da deposição e a estrutura desta é variável e depende de vários fatores como a composição, tamanho e forma das partículas, das temperaturas da partícula e da superfície do tubo e a velocidade do gás entre outras. Devido as diferenças nos mecanismos de deposição, podem ser definidas dois tipos de deposições, o *slagging* e o *fouling* (KITTO; STULTZ, 2005b).

O *slagging* é a formação de deposições fundidas (ou parcialmente fundidas) e novamente solidificadas nas paredes da fornalha e outras superfícies expostas à radiação (Figura 2.13). O

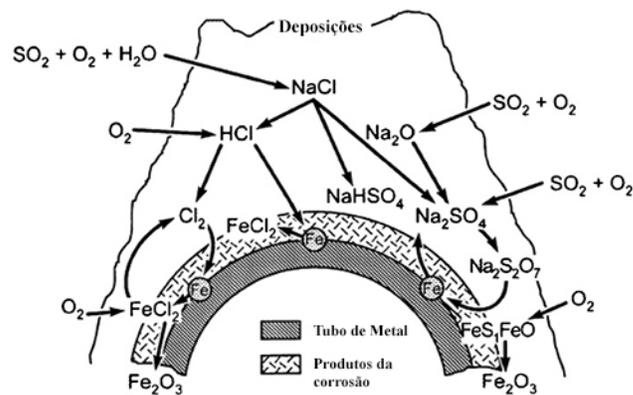


Figura 2.12: Esquema das reações de fase sólida envolvendo Cl-espécies nas deposições (YIM; ROSENDAHL; KAER, 2008)

slagging pode-se estender até a zona convectiva da caldeira se a temperatura dos gases é muito elevada (KITTO; STULTZ, 2005b).

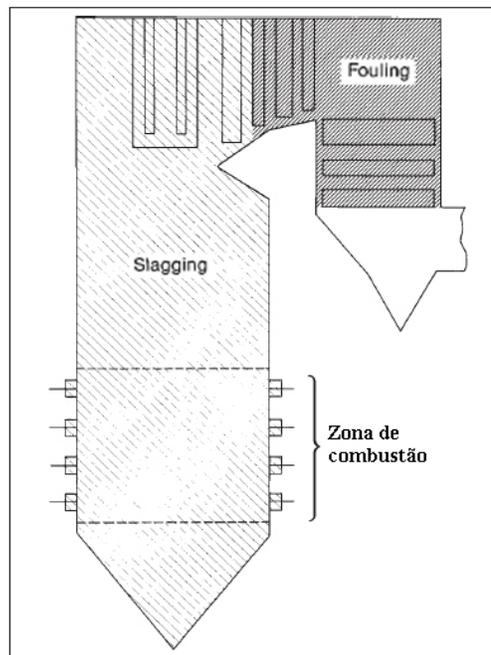


Figura 2.13: Zonas das deposições nas caldeiras (KITTO; STULTZ, 2005b)

A formação de escória dificilmente ocorre nas superfícies limpas. O mecanismo começa com a sedimentação das partículas de cinzas finas ou com a acumulação gradual de partículas com baixo ponto de fusão. Quando a espessura da deposição aumenta, a temperatura da superfície exterior aumenta, atingindo a temperatura de fusão e gerando uma superfície pegajosa o que acelera

o processo de formação de deposições. A camada cresce até que a escória começa a fluir ou fica o suficientemente pesada para cair (KITTO; STULTZ, 2005b).

*Fouling* é definido como a formação de deposições a alta temperatura nas superfícies convectivas que não estão expostas à radiação direta (Figura 2.13). Geralmente, o fouling é causado pela vaporização dos elementos inorgânicos voláteis. Primeiramente, os vapores inorgânicos e as partículas mais finas chegam até as tubulações na condição pegajosa e são solidificadas pela menor temperatura do tubo, gerando assim as primeiras deposições. Logo depois, as cinzas volantes e os sais condensáveis contribuem nas deposições, principalmente na parte superior dos tubos, formando uma matriz que adere as partículas das cinzas umas com as outras (Figura 2.14). As deposições são um pouco porosas, o que faz elas boas isolantes, reduzindo o coeficiente de troca de calor (KITTO; STULTZ, 2005b; YIM; ROSENDAHL; KAER, 2008).

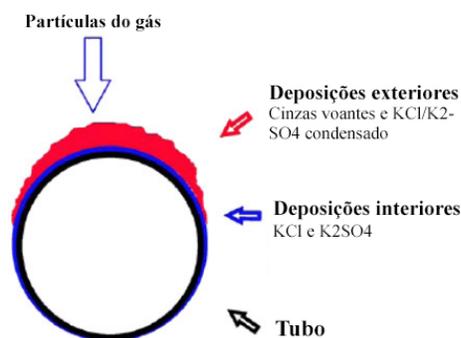


Figura 2.14: Esquema das deposições da palha de trigo formadas na parte superior de uma sonda (YIM; ROSENDAHL; KAER, 2008)

Os compostos alcalinos, potássio e sódio, são muito influentes nas deposições, principalmente pela sua baixa temperatura de fusão, a qual pode ser menor que 700°C, gerando uma superfície de fácil aderência. Os metais alcalinos na biomassa estão presentes como compostos orgânicos ou nos sais e logo são liberados na fase gasosa na combustão. Materiais como *Mg* e *Ca* incrementam a temperatura de fusão (KHAN et al., 2009).

**Corrosão a alta temperatura:** O mecanismo de corrosão com cloro é baseado na reação do *Cl* gasoso com *Fe* e *Cr*, gerando cloretos de metais voláteis. A presença de enxofre, silício e metais alcalinos também têm influência na corrosão. A corrosão é desprezível quando a temperatura do vapor é de 450°C ( $T_{metal} \cong 480^\circ\text{C}$ ), mas é significativa quando a temperatura do metal é maior que

520°C. A baixas temperaturas, a sulfatação na fase sólida é lenta e o metal sofre somente oxidação geral. Quando o conjunto  $KCl/K_2SO_4/Fe$  fica fundido, o  $KCl$  sulfata rapidamente causando uma oxidação acelerada e corrosão interna. Outras pesquisas indicam que não é necessária uma sulfatação para a corrosão com cloro nos superaquecedores, sendo suficiente a presença de  $KCl$  puro em uma atmosfera de gás de  $SO_2$  (KHAN et al., 2009; YIM; ROSENDAHL; KAER, 2008; MICHELSEN et al., 1998).

Na Figura 2.15 é esquematiza, de forma geral, os compostos químicos do potássio, enxofre e cloro nas diferentes superfícies das caldeiras de biomassa (KHAN et al., 2009).

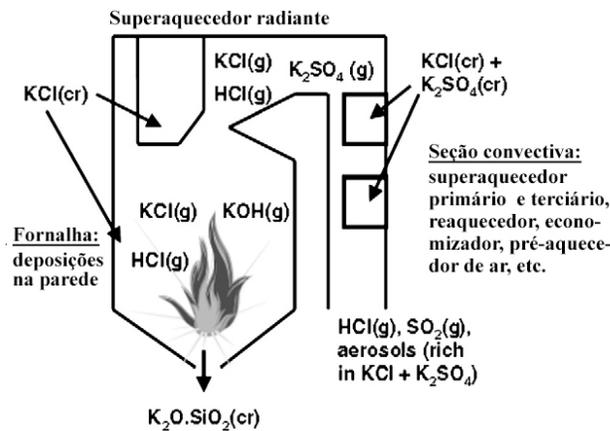


Figura 2.15: Principais caminhos do potássio, enxofre e cloro em uma caldeira de biomassa (KHAN et al., 2009)

### Limitação da temperatura do vapor superaquecido

Há diversas fábricas de papel e celulose que queimam os resíduos da produção, além do licor negro, material cuja combustão em caldeiras de recuperação já é amplamente difundido no mundo todo. Na Tabela 2.9 apresenta-se uma lista de fábricas as quais utilizam os resíduos como combustível para gerar vapor e energia elétrica. As fornalhas de leito fluidizado são as que têm maior sucesso na combustão de resíduos com elevado teor de cinzas e umidade, assim este tipo de fornalha é o mais difundido para reduzir a quantidade de resíduos da indústria e ao mesmo tempo a dependência com combustíveis fósseis (MONTE et al., 2009).

Segundo os parâmetros do vapor apresentados na Tabela 2.9, é possível empregar as biomassa residuais para gerar vapor superaquecido a 535°C e 115 bar.

Tabela 2.9: Exemplos de indústrias europeias de papel e celulose as quais queimam resíduos de biomassa (MONTE et al., 2009).

Fábrica	Ano	Combustível	Capacidade
Cartiere Burgo Verzuolo, Itália	2001	Lodo e resíduos de madeira	27 $MW_{th}$ ; 29 $ton.h^{-1}$ vapor; 86 bar; 490°C
Cartiere Burgo Mantova, Itália	1999	Lodo (43% cinzas, 55% umidade - b.s.)	13,5 $MW_{th}$ vapor superaquecido a 3,2 $MW_e$ turbo/gerador
Jamsankosken Voima Oy, Finlândia	2002	Casca, cavacos, lodo e óleo	185 $MW_{th}$ ; 252 $ton.h^{-1}$ vapor; 107 bar; 535°C
Katrinefors Kraftvarme, Suécia	2002	Lodo e resíduos de madeira	36 $MW_{th}$ ; 47 $ton.h^{-1}$ vapor; 80 bar; 480°C
Aanevoima Oy, Finlândia	2002	Casca, resíduos de madeira, lodo e óleo	157 $MW_{th}$ ; 217 $ton.h^{-1}$ vapor; 105 bar; 535°C
Vamy Oy/Vattenfall Oy, Finlândia	2001	Casca, lodo, resíduos de madeira e gás natural	88 $MW_{th}$ ; 130 $ton.h^{-1}$ vapor; 115 bar; 525°C
Modo Paper AB Husum, Suécia	2000	Casca, lodo e óleo	87 $MW_{th}$ ; 112 $ton.h^{-1}$ vapor; 60 bar; 450°C
Sodra Cell AB Monstera, Suécia	2000	Casca, lodo e óleo	105 $MW_{th}$ ; 133 $ton.h^{-1}$ vapor; 61 bar; 480°C
Elektrocieplowni Ostroleka, Polónia	1997	Casca e lodo	35 $MW_{th}$ ; 47 $ton.h^{-1}$ vapor; 40 bar; 450°C
Metsa-Serla Oy Simpele, Finlândia	1997	Casca, lodo e óleo	113 $MW_{th}$ ; 144 $ton.h^{-1}$ vapor; 115 bar; 525°C
Oy Metsa-Botnia Kaskinen, Finlândia	1997	Casca, lodo e óleo	96 $MW_{th}$ ; 126 $ton.h^{-1}$ vapor; 85 bar; 500°C



### 3. METODOLOGIA

#### 3.1 Amostragem

##### 3.1.1 Colheita de amostras

O material analisado constitui-se de amostras de resíduos sólidos gerados no campo e na produção de celulose. Este material provém de uma floresta do gênero *Eucalyptus* espécie *Urograndis*, plantada no Estado de São Paulo (latitude S 28° e altitude de 760 m) e resíduos de uma fábrica de papel e celulose (polpação Kraft) que produz 670.000  $t.ano^{-1}$  de celulose e 370.000  $t.ano^{-1}$  de papel. Estes resíduos são as frações da árvore não empregadas na polpação, os quais incluem cascas, galhos, pontas e folhas de eucalipto oriundos da exploração florestal, além de finos (serragem), cascas + lascas, lodo orgânico e cavacos<sup>1</sup> provenientes da fabricação de celulose (Tabela 3.1). Não foram coletadas amostras de “overs”, porém suas propriedades deveriam ser iguais às dos cavacos, desde que pertencem à mesma fração da árvore (tora). Dentro dos resíduos de campo, foram coletadas amostras de três etapas diferentes: amostras geradas no dia da visita; amostras que estiveram no solo durante 32 dias e amostras com 94 dias no campo. O plantio foi realizado no ano 2007 com um espaçamento de 3,20 x 2,50 m (densidade 1250  $pes.ha^{-1}$ ) e coletada aos 6 anos de idade. A produtividade desta floresta foi de 55  $m^3.ha^{-1}.ano^{-1}$  com casca.

A colheita das amostras foi feita procurando material que fosse representativo do total, este foi armazenado em sacolas plásticas devidamente fechadas para evitar perda de umidade até a hora de manipular o material no laboratório. Pelo método de colheita empregado pela empresa, utilizando o método mecanizado com “harvester”, os resíduos ficam espalhados no campo, o que foi definido como a *Situação 1* na seção 2.2.4. Na Figura 3.1 são apresentadas fotografias da floresta e da disposição do material no campo.

---

<sup>1</sup>Os cavacos não são resíduo da polpação, porém a empresa fornecedora do material utiliza parte dos cavacos (matéria prima para a fabricação da polpa de celulose) como combustível para gerar vapor a ser empregado no processo.

Tabela 3.1: Amostras de biomassa

<b>Campo</b>	<b>Fábrica</b>
Cascas	Cascas + Lascas
Galhos	Finos (Serragem)
Pontas	Lodo Orgânico
Folhas	Cavacos



(a) Floresta

(b) Resíduos do dia

(c) Resíduos 32 dias

(d) Resíduos 94 dias

Figura 3.1: Fotografias da floresta e da disposição dos resíduos no campo.

### 3.1.2 Preparação das amostras

A preparação das amostras foi feita segundo a norma ASTM Standard - E1757. As amostras foram divididas segundo a classificação da Tabela 3.1 em casca, pontas (de 2 a 6 *cm* de diâmetro), galhos (diâmetro menor que 2 *cm*) e folhas para os resíduos do campo e em cascas + lascas, finos (serragem), lodo orgânico<sup>2</sup> e cavacos para as biomassas provenientes da fábrica. Primeiramente, as amostras foram secadas em uma estufa a 60°C até atingir massa constante a fim de determinar o teor de umidade com que elas foram coletadas (*in natura*). Para homogeneizar as amostras, estas foram trituradas em moinho de facas em duas etapas, uma primeira nas instalações da FEM - Unicamp (Figura 3.2a), e uma segunda etapa no IAC (Instituto Agrônômico de Campinas) (Figura 3.2b) até atingir uma granulometria apropriada para fazer as análises. A primeira etapa de moagem não foi necessária para todas as amostras, passando diretamente à segunda no caso das amostras de folhas e do lodo orgânico. O material moído mostrava-se suficientemente homogêneo, não sendo necessário realizar quarteamento para selecionar as amostras.

Fotografias dos diferentes estágios de preparação das amostras são apresentadas na Figura 3.3,

<sup>2</sup>Efluente dos digestores da polpação

onde identifica-se como “M0”, “M1” e “M2” aos estágios sem moer, com a primeira etapa de moída e o estado final das amostras respectivamente.

Foram preparadas cinzas de cada uma das biomassas antes mencionadas a 575°C em mufla EDG 3P-S até atingir massa constante.

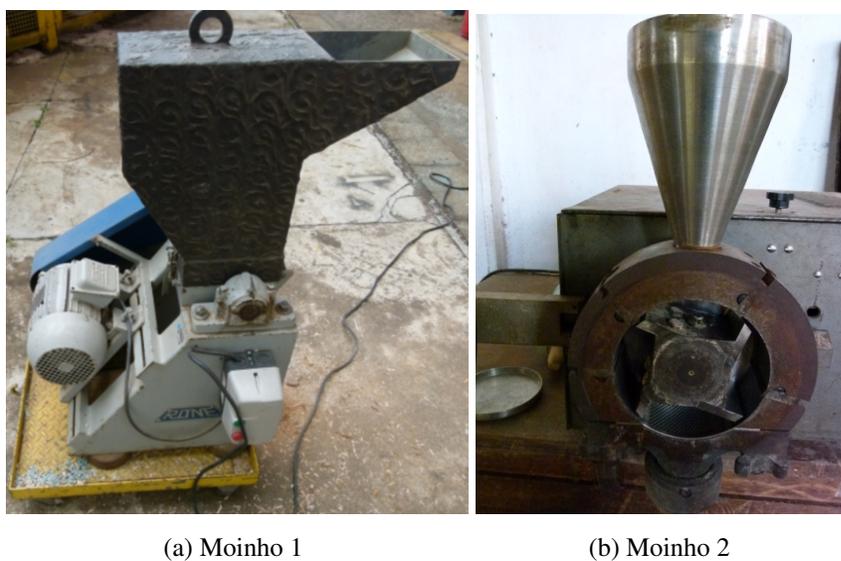


Figura 3.2: Fotografias dos moinhos empregados na preparação das amostras.



Figura 3.3: Fotografias dos estágios de preparação de algumas das amostras.

## 3.2 Análises

Uma série de análises foram realizadas para estudar as características destas biomassas e suas cinzas. Estas análises, as normas e/ou métodos empregados e os laboratório onde foram realizados apresentam-se na Tabela 3.2.

As análises descritas neste capítulo foram realizadas em 15 amostras de biomassa e em suas 15 respectivas cinzas. Especificamente estas 15 amostras são as 4 da fábrica (cavacos, finos, cascas + lascas e o lodo orgânico) e 11 da floresta, 4 da colheita do dia (folhas, casca, galhos e pontas), 4 das mesmas frações que estiveram 32 dias no campo e 3 que ficaram 94 dias no campo (folhas, casca e galhos). Nota-se a falta da amostra de pontas para os resíduos de 94 dias.

### 3.2.1 Massa específica

**Massa específica aparente.** A picnometria foi empregada para determinar a massa específica aparente das biomassas estudadas. Na análise, realizada no Laboratório de Combustíveis - FEM - Unicamp, foram utilizados três picnômetros de 25 ml de capacidade, uma balança analítica (OHAUS, resolução de  $\pm 1$  mg) e água destilada como fluido de trabalho. A massa específica aparente ( $\rho_a$ ) é calculada a partir da massa ( $m_s$ ) e do volume do sólido incluindo seus poros ( $V_s$ ), empregando a equação 3.1. Medindo a massa do picnômetro enchido com água e subtraindo a massa do picnômetro, é calculada a massa de água que entra no picnômetro. Conhecendo a temperatura da água e empregando a equação 3.2, é determinado o volume exato do picnômetro. Colocando uma massa conhecida ( $m_s$ , na faixa de 0,5 a 2 g) de partículas no picnômetro e enchendo novamente com a água, pode ser calculado o volume de água deslocado, o que é o volume do sólido ( $V_s$ ). Três repetições foram realizadas e assim calculada a média e o desvio padrão. Como foi empregado o material úmido, ou seja, em equilíbrio com o ambiente, para determinar a massa específica da biomassa seca foi empregado o resultado de umidade determinada na análise imediata.

$$\rho_a = \frac{m_s}{V_s} \quad (3.1)$$

$$\rho_{agua}(kg/m^3) = 1002,3 - 0,1321 \times T(C) - 0,00308 \times T(C)^2 \quad (3.2)$$

Tabela 3.2: Análises aplicadas para a caracterização das biomassas e suas cinzas.

Análise	Norma e/ou método aplicado	Laboratório
<i>Massa específica</i>		
Aparente Do leito (bulk)	Picnometria Empacotamento livre	
Distribuição granu- lométrica	Peneiramento	Laboratório de Combustíveis - Faculdade de Engenharia Mecânica - Unicamp
<i>Análise imediata</i>		
Umidade	ASTM E871	
Cinzas	ASTM D1102 (575°C)	
Voláteis	ASTM E872	
Carbono Fixo	Por diferença	
<i>Análise elementar</i>		
<i>C e H</i>	ASTM E777	
<i>N</i>	ASTM E778	
<i>S</i>	ASTM E775	
<i>Cl</i>	ASTM E776	
<i>O</i>	Por diferença	
Poder calorífico	NBR 8633	Laboratório de Celulose e Papel - Departamento de Engenharia Florestal - Universidade Federal de Viçosa
<i>Composição Estru- tural</i>		
Celulose Hemicelulose	HPLC-PAD	
Lignina	TAPPI UM 250 TAPPI 222 om-98	
Extrativos	TAPPI 264 cm-97	
<i>Análises térmicas</i>		
Termogravimetria Calorimetria espec- tral diferencial	SDT Q600	CTBE - CNPEM
Análise elementar das cinzas	EDS	Laboratório LME - LNNano - CNPEM

**Massa específica do leito.** A massa específica do leito do material moído foi determinada a partir da medição do volume do leito ( $V_L$ ) empacotado livremente e da massa das partículas inseridas no leito ( $m_L$ ), empregando a equação 3.3. O recipiente empregado foi uma proveta de vidro graduada de 250 ml de capacidade com um diâmetro de 35 mm aproximadamente<sup>3</sup> e uma balança OHAUS EXPLORER com resolução de 0,1 g. Para o cálculo da massa específica do leito foram feitas 5 repetições e a partir dos resultados delas foi calculada a média e o desvio padrão. Da mesma forma que para a massa específica aparente, foi empregado o resultado da análise imediata para a determinação em base seca.

$$\rho_L = \frac{m_L}{V_L} \quad (3.3)$$

### 3.2.2 Distribuição granulométrica

A determinação do diâmetro médio de Sauter ( $\bar{d}_p$ ) foi feita no Laboratório de Combustíveis - FEM - Unicamp pelo método de peneiramento. Este calcula-se a partir da equação 3.4, na qual ( $x_i$ ) é a fração retida em cada peneira  $i$  e ( $d_{pi}$ ) é o diâmetro da partícula retida na peneira  $i$  (considerado igual à média entre a abertura da própria peneira e a abertura da peneira imediatamente superior). Na análise foram empregadas 10 peneiras de aberturas entre Tyler 24 (707  $\mu m$ ) e 325 (45  $\mu m$ ) segundo a designação Tyler; uma balança analítica OHAUS GA200 (resolução de  $\pm 1$  mg) e sistema vibratório Produtest. As peneiras são empilhadas ficando a peneira com maior granulometria no topo e a menor na base. A amostra, devidamente homogeneizada, é colocada na peneira do topo e o conjunto de peneiras é posto a vibrar por 15 min. Como foram utilizadas 10 peneiras, estas foram divididas em dois grupos, fazendo primeiro uma passada com as 5 peneiras maiores e logo depois com as de aberturas menores. Logo depois é pesada a massa retida em cada peneira, dado o qual é empregado para o cálculo do diâmetro médio de Sauter.

$$\bar{d}_p = \frac{1}{\sum \frac{x_i}{d_{pi}}} \quad (3.4)$$

Quando uma distribuição apresenta dois picos, deve-se calcular dois diâmetros separadamente e depois fazer o cálculo em conjunto.

---

<sup>3</sup>Seria recomendável empregar uma proveta de diâmetro maior (20 cm aprox.) para evitar ou minimizar o efeito da parede.

### 3.2.3 Análise imediata

A análise imediata, na qual é determinada a quantidade em porcentagem de massa de umidade, voláteis, carbono fixo e teor de cinzas, foi realizada, pelo autor, sob as normas (ASTM-E871, ; ASTM-E872, ; ASTM-D1102, ) no Laboratório de Combustíveis - FEM - Unicamp. O equipamento empregado para o aquecimento das amostras foi uma mufla marca EDG e modelo 3P-S. Para medir a massa o laboratório está equipado com uma balança analítica (OHAUS, resolução de  $\pm 1 \text{ mg}$ ). Na análise das diferentes amostras foram empregados 6 (seis) cadinhos com aproximadamente 2g de material cada um. Após a secagem das 6 amostras, 3 foram empregadas para a determinação de cinzas e as outras 3 para a determinação dos voláteis utilizando tampas de metal. A partir dessas medidas (6 para a umidade, 3 para a cinzas e 3 para os voláteis) foram calculadas a média e o desvio padrão.

Algumas observações foram levantadas durante a realização da análise:

- Foram observadas, em algumas ocasiões, cinzas volantes durante a execução da determinação dos voláteis.
- A modo de prova, foi realizada a determinação dos voláteis a temperaturas menores (750 e 850°C) da estipulada pela norma (950°C), observando maior presença de cinzas na superfície da amostra quanto maior é a temperatura (Figura 3.4), principalmente nas amostras com alto teor de cinzas. Além disso, foi identificada uma diferença na massa, ou seja, uma diferença na quantidade de voláteis. Isto sugere a ocorrência de combustão parcial do carbono fixo na temperatura estabelecida pela norma.
- Para gerar as cinzas deve-se evitar a ocorrência de chama, o que pode ocasionar arraste mecânico de material. Para isso, recomenda-se manter a temperatura entre 200 e 250°C durante 30 min e logo depois aumentá-la até a temperatura final (575°C).

### 3.2.4 Análise elementar

A determinação do carbono (*C*), hidrogênio (*H*), nitrogênio (*N*) e enxofre (*S*) foi medida diretamente em amostra seca por meio de analisador Elementar CHNO, equipamentos CHN TruSpec Micro; S - TruSpec S; O - TruSpec O que promove a combustão da amostra. Todas estas análises



Figura 3.4: Fotografia dos cadinhos após análise imediata. Cadinhos da parte superior: Cinzas da determinação do teor de cinzas; Cadinhos da parte inferior: Carvão da determinação do teor de voláteis.

foram feitas no Laboratório de Celulose e Papel do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa - MG sob as normas (ASTM-E775, ; ASTM-E776, ; ASTM-E777, ; ASTM-E778, ).

### 3.2.5 Poder calorífico

O poder calorífico das biomassas foi obtido pelo método da bomba calorimétrica no Laboratório de Celulose e Papel do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa - MG. A análise foi realizada sob a norma (NBR-8633, ) com uma bomba calorimétrica marca PARR e modelo 6300.

### 3.2.6 Composição estrutural

A determinação da celulose, hemicelulose, lignina e extrativos foi realizada no Laboratório de Celulose e Papel do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa. Inicialmente, sob a norma TAPPI 264 cm-97, são quantificados os extrativos através da dissolução de resinas, ácidos graxos e ceras com uma solução de etanol/tolueno (1:2 molar). Ato seguido é realizada a dissolução de taninos, gomas, açúcares, amidos e corantes primeiramente com etanol seguido de água quente.

Realizou-se a hidrólise da holocelulose com ácido sulfúrico e então foram analisados os

carboidratos totais através de HPLC-PAD com determinação das quantidade de glicanas, glucanas, xilanas, galactanas, mananas e arabinanas formadas pela hidrólise do material celulósico também previamente livre de extrativos.

O teor de lignina é determinado a partir da amostra livre de extrativos. A análise é realizada em duas etapas, uma segundo a norma TAPPI UM 250 dissolvendo-se parte da lignina em solução de ácido sulfúrico com quantificação da lignina por espectrofotometria e outra pela norma TAPPI 222 om-98 para lignina insolúvel em ácido sulfúrico, determinada por gravimetria do material não solubilizado (TAPPI... , a, b, c).

### **3.2.7 Análises térmicas**

As análises térmicas foram realizadas no Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol (CTBE) - Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais (CNPEM), o qual encontra-se equipado com um analisador SDT Q600. Este equipamento faz a termogravimetria (TGA) simultaneamente com a calorimetria espectral diferencial (DSC). As amostras utilizadas foram de  $10,5 \pm 0,5$  mg e foi empregada uma taxa de aquecimento de  $10$  K/min. As amostras foram analisadas sob atmosfera inerte (nitrogênio) com um fluxo de  $100,0$  ml/min, numa faixa de temperaturas desde o ambiente até  $900^\circ\text{C}$  para as biomassas e de  $500$  até  $1200$  para as cinzas. Foram empregados cadinhos de alumina e platina. Por questões de tempo, não foi possível realizar as análises térmicas em todas as amostras empregadas neste trabalho. Assim, foram analisadas 5 biomassas e 5 cinzas, sendo estas as folhas, cascas, galhos, cavacos e o lodo orgânico e suas respectivas cinzas.

### **3.2.8 Análise elementar das cinzas**

A análise da composição elementar das cinzas foi realizada através de microanálise de energia dispersiva (EDS em inglês) pela detecção de raios-X característicos para cada elemento, variando conforme seu número atômico, emitidos pela amostra quando excitada por um feixe eletrônico. Conforme a intensidade de cada emissão característica pode-se inferir a composição de tal material. Esta análise foi realizada pelo Laboratório de Microscopia Eletrônica (LME) - Laboratório Nacional de Nanotecnologia (LNNano) - CNPEM, com o equipamento FEI Inspect F50 - High Resolution SEM com sistema XEDS de alta sensibilidade e velocidade, o qual tem uma incerteza

na medição de  $\pm 1,5\%$ . Na figura 3.5 é mostrada uma fotografia de algumas amostras prontas para ser analisadas.



Figura 3.5: Fotografia das amostras para realizar a análise elementar das cinzas - EDS.

### 3.3 Cálculo do Potencial Energético

Além da caracterização das biomassas como combustível, o outro objetivo do trabalho é estimar o potencial energético que poderia ser produzido a partir da queima destas biomassas e o emprego da energia num ciclo de Rankine. Assim, com equações simples (3.5 e 3.6), empregando resultados das análises e dados da bibliografia, estima-se quanta energia elétrica poderia ser gerada e o potencial energético empregando os resíduos florestais e industriais da produção de celulose em uma região específica.

$$W_e = Q_{cald} \times \dot{M} \times Sup \times \eta_{ciclo} \times \eta_{ger} \quad (3.5)$$

$$\dot{W}_e = \frac{W_e}{3600 \times HTP} \quad (3.6)$$

Onde:

- $W_e$  ( $MJ.ano^{-1}$ ) é a energia elétrica produzida por ano.
- $\dot{W}_e$  ( $MW$ ) é a potência elétrica.
- $Q_{cald}$  ( $MJ.kg^{-1}$ ) é a energia recuperada na caldeira por quilograma de combustível queimado, o seja, a energia absorvida pelo fluido de trabalho do ciclo, o vapor de água.
- $\eta_{ciclo}$  é a eficiência térmica do ciclo termodinâmico. Este é determinado a partir da simulação do ciclo.

- $\eta_{ger}$  é a eficiência do gerador elétrico, a qual foi considerada em 98%.
- $Sup$  (ha) é a área plantada considerada para o cálculo.
- $\dot{M}$  ( $kg \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}$ ) é a quantidade de massa seca de cada resíduo gerada por hectare por ano.
- 3600 ( $s \cdot h^{-1}$ ) é um fator de conversão de unidades.
- $HTP$  ( $h \cdot ano^{-1}$ ) são as horas de trabalho da planta por ano. Considerando um fator de utilização dos equipamentos de 85% e trabalhando 24 horas por dia, a planta trabalharia 7446  $h \cdot ano^{-1}$ .

### 3.3.1 Cálculo da massa dos resíduos de biomassa

A quantidade de massa de resíduos gerados no campo calcula-se a partir da produtividade das toras da floresta ( $m^3 \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}$ ); massa específica básica da tora ( $kg \cdot m^{-3}$ ); e o quociente entre as massas secas do resíduo e da tora ( $kg_{frac} \cdot kg_{Tora}^{-1}$ ), equação 3.7:

$$\dot{M} = Prod_{Tora} \times \rho_{basica} \times \eta_{frac} \quad (3.7)$$

Para o cálculo utiliza-se a massa específica básica da tora, por que é quem relaciona a massa seca da amostra com o volume *in natura* da madeira, ou seja, como amostra são empregados discos de madeira saturados de água para a medição do volume e logo secados em estufa para determinar a massa. Como a massa específica básica da tora não foi uma das medições realizadas neste trabalho, são empregados dados da bibliografia. Gomide et al. (2005) estudaram as características de 10 amostras diferentes de eucalipto no Brasil destinados à produção de papel e celulose. Pela semelhança das amostras empregadas por estes pesquisadores e as empregadas neste trabalhos, a média dos resultados deles é utilizada como massa específica básica para o cálculo do potencial energético, sendo este valor  $490 kg \cdot m^{-3}$ . Quando a floresta de eucalipto tem como destino a produção de energia, tenta-se obter madeiras com maior densidade básica. Assim, podem ser atingidos valores na faixa de 500 a  $730 kg \cdot m^{-3}$  (COUTO; MÜLLER, 2008).

A partir da Tabela 2.6 pode-se estimar as porcentagem médias (de massa seca) para cada fração da árvore, e a partir dessas porcentagens calcula-se a relação entre a massa da tora e a massa de cada fração. Estes dois dados são apresentados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Relações entre as massas das frações da árvore e a geração por hectare por ano.

Fração	Massa seca* (%)	Relação com a tora (%)	Massa seca** ( $t.ha^{-1}.ano^{-1}$ )
Tora	76,4	100	24,1
Cascas	9,0	11,4	2,8
Galhos	6,2	8,1	2,0
Pontas	5,0	6,5	1,6
Folhas	3,4	4,5	1,1

(\*) Referência: Ver Seção 2.2.4.

(\*\*) Calculado a partir da produtividade de  $55 m^3.ha^{-1}.ano^{-1}$ .

Tabela 3.4: Resíduos da produção de papel e celulose.

Resíduo	Geração ( $t.ano^{-1}$ - b.u.)
Finos	34.000
Cascas + Lascas	30.000
Lodo orgânico	48.000
“Overs ”	6.000

Dados fornecidos pelo pessoal da Empresa (2012).

A produtividade das florestas de onde foram coletadas as amostras foi de  $55 m^3.ha^{-1}.ano^{-1}$  de madeira com casca, então sem casca fica em  $49 m^3.ha^{-1}.ano^{-1}$  (considerando 9% de casca). Considerando a massa específica básica de  $490 kg.m^{-3}$ , calcula-se a geração de cada fração da árvore em massa seca por hectare por ano, a qual se encontra na Tabela 3.3.

Empregando os dados da Tabela 2.4, onde são apresentadas as produtividades das florestas de eucalipto para celulose nos diferentes estados do Brasil, podem ser calculadas a geração de resíduos florestais por hectare segundo cada estado.

Na Tabela 2.3 são apresentadas as superfícies plantadas com eucalipto no Brasil, tanto para a produção de celulose quanto as plantações em geral. Estes dados são empregados para estimar o potencial energético de cada estado.

A fábrica que forneceu o material de pesquisa, produz em média  $670.000 t.ano^{-1}$  de celulose e  $370.000 t.ano^{-1}$  de papel. Na produção tem uma geração de resíduos apresentados na Tabela 3.4.

### 3.3.2 Ciclo termodinâmico

O ciclo termodinâmico adotado é o ciclo Rankine utilizando água como fluido de trabalho. A eficiência do ciclo depende de vários fatores como os parâmetros do vapor gerado (pressão e temperatura), pressão de condensação na saída da turbina, eficiências isentrópicas da turbina e da bomba, e se o ciclo é simples ou com reaquecimento e/ou regenerativo. Existem também outras irreversibilidades como as perdas de pressão nas tubulações e nos equipamentos, e as perdas mecânicas na turbina e na bomba. As variáveis que dependem do tipo da fornalha e do combustível são a pressão e temperatura do vapor superaquecido.

Como foi observado na Tabela 2.9, pode ser atingida uma pressão de 115 bar e uma temperatura 535°C empregando as biomassas residuais da produção de polpa de celulose. Porém, estes valores podem ser muito ambiciosos, conseqüentemente para determinar a eficiência do ciclo são considerados valores menores.

Empregando o software *Cycle Tempo* de simulação de ciclos termodinâmicos, e sob hipóteses razoáveis, foi calculada a eficiência do ciclo utilizada para o cálculo do potencial energético.

Hipóteses adotadas na simulação do ciclo:

- Eficiência isentrópica e mecânica da turbina de 85 e 98% respectivamente.
- Eficiência isentrópica e mecânica da bomba de 70 e 90% respectivamente.
- Título do vapor à saída da turbina de 95% aproximadamente. Caso o título seja menor pode ocasionar erosão nas pás da turbina pela presença de gotículas de água.
- Pressão de condensado de 20 *kPa*. Assim, a temperatura do condensado é de 60°C, temperatura possível de conseguir no condensador trocando calor com uma fonte fria de até 40°C.
- Perda de pressão de 2% em cada trecho de tubulação entre equipamentos.

Com estas hipóteses foram simulados diversos ciclos com diferentes temperaturas e pressões de vapor na procura de um ciclo medianamente realista e possível de conseguir com os combustíveis pesquisados e tentando maximizar a eficiência.

Primeiramente, considerando um ciclo simples sem reaquecimento nem regeneração, Figura 3.6, e com um limite na temperatura de 480°C, determinou-se que a pressão máxima admissível é de 3,5 *MPa* com uma eficiência do ciclo de 27,0%. Caso a pressão seja aumentada, o

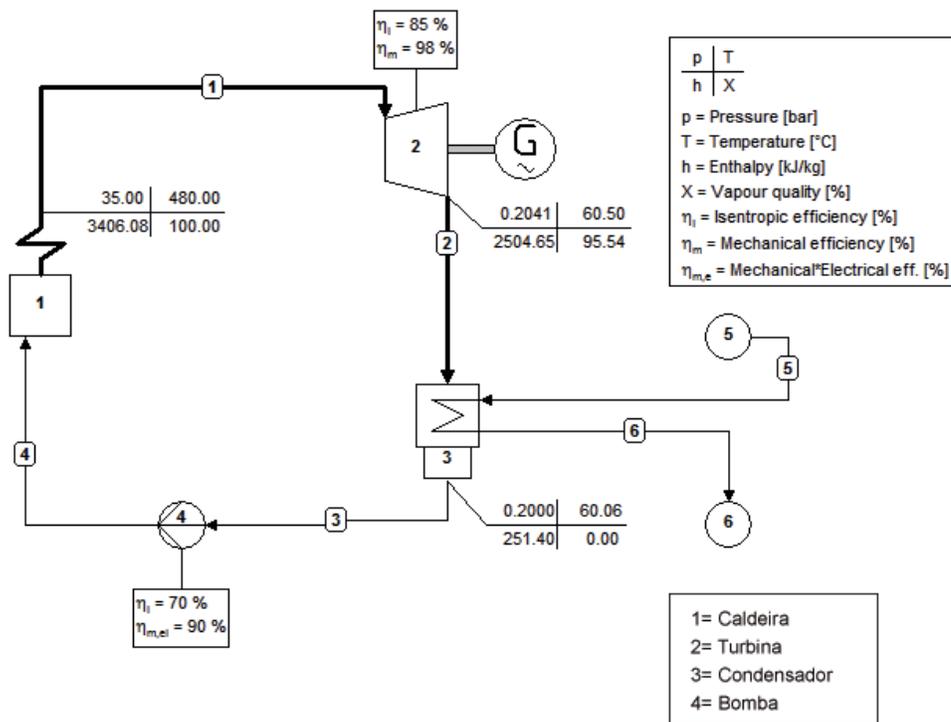


Figura 3.6: Esquema do ciclo Rankine simples.

título do vapor na saída da turbina se reduz, ficando abaixo de 95%. Para cumprir com as hipóteses e empregar pressões maiores, 6,0 MPa por exemplo, é necessária uma temperatura de vapor de pelo menos 550°C, fato que não é possível atingir pelos problemas associados a corrosão a alta temperatura.

Limitando a temperatura em 480°C, e na procura de um ciclo com maiores pressões do que 3,5 MPa, deve-se empregar um ciclo com reaquecimento. Assim, considerando a segunda expansão desde 480°C e 3,5 MPa, e a primeira expansão desde 480°C e uma queda de pressão até 30%, ou seja, a pressão do vapor na entrada da segunda turbina é 30% da primeira, a pressão inicial deve ser de 11,5 MPa, valor que foi o máximo determinado nos exemplos de caldeiras similares na bibliografia. Note-se que o ciclo simulado tenta ser conservador em relação à temperatura, podendo chegar até 535°C. Então, empregando um ciclo Rankine com reaquecimento, onde a temperatura e a pressão iniciais são 480°C e 11,5 MPa respectivamente, a temperatura e pressão na segunda etapa são de 480°C e 3,5 MPa, e levando em contas as hipóteses mencionadas anteriormente, obtém-se uma eficiência de 33,1%. Nas Figuras 3.7 e 3.8 são apresentados um esquema e o diagrama T-s do

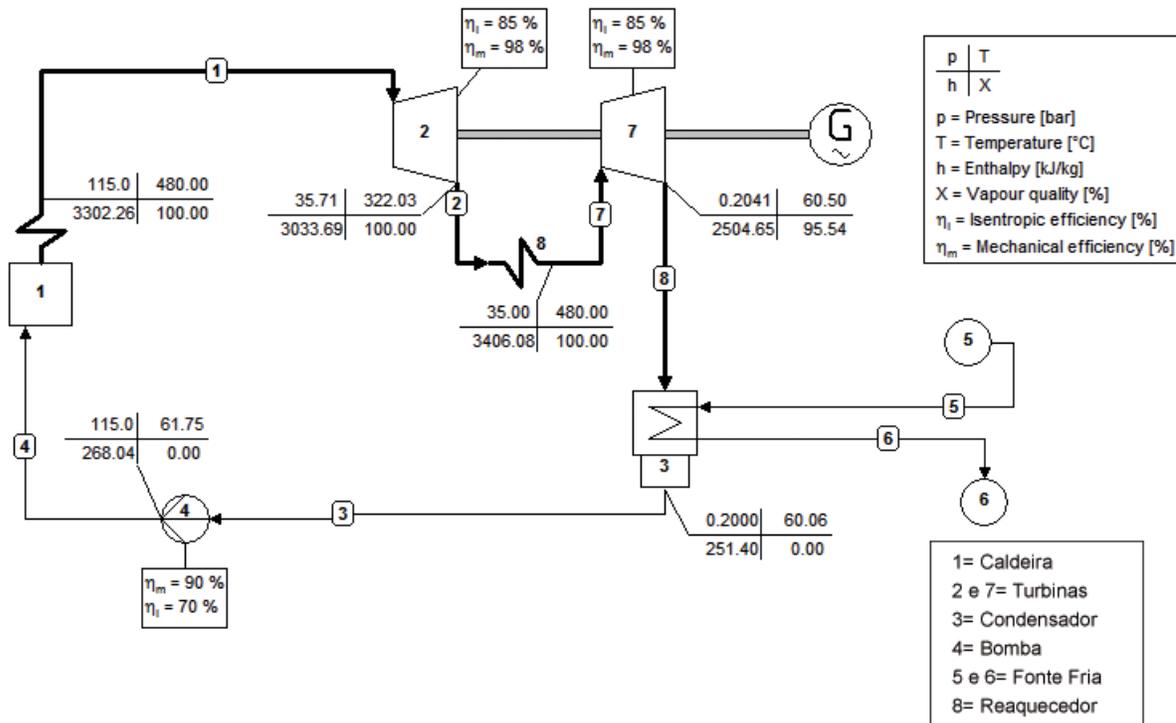


Figura 3.7: Esquema do ciclo Rankine com reaquecimento.

ciclo respectivamente. Este ciclo poderia ser otimizado, por exemplo se fosse regenerativo, porém excede os objetivos do trabalho aprofundar na simulação do ciclo termodinâmico.

### 3.3.3 Eficiência e balanço térmico da caldeira

A eficiência, ou rendimento, da caldeira pode ser definida como o quociente entre a energia útil ( $Q_{cald}$ ), e o energia disponível no combustível. Esta eficiência pode ser calculada com o PCS ou PCI segundo as equações 3.8 e 3.9.

$$\eta_{cald}^{PCS} = \frac{Q_{cald} (MJ.kg_{fuel}^{-1} seco)}{PCS (MJ.kg_{fuel}^{-1} seco)} \quad (3.8)$$

$$\eta_{cald}^{PCI} = \frac{Q_{cald} (MJ.kg_{fuel}^{-1} umedo)}{PCI (MJ.kg_{fuel}^{-1} umedo)} \quad (3.9)$$

A energia útil é a energia transferida à substância de trabalho, o vapor de água, e calcula-se com a equação 3.10 ou a partir do balanço térmico da caldeira.

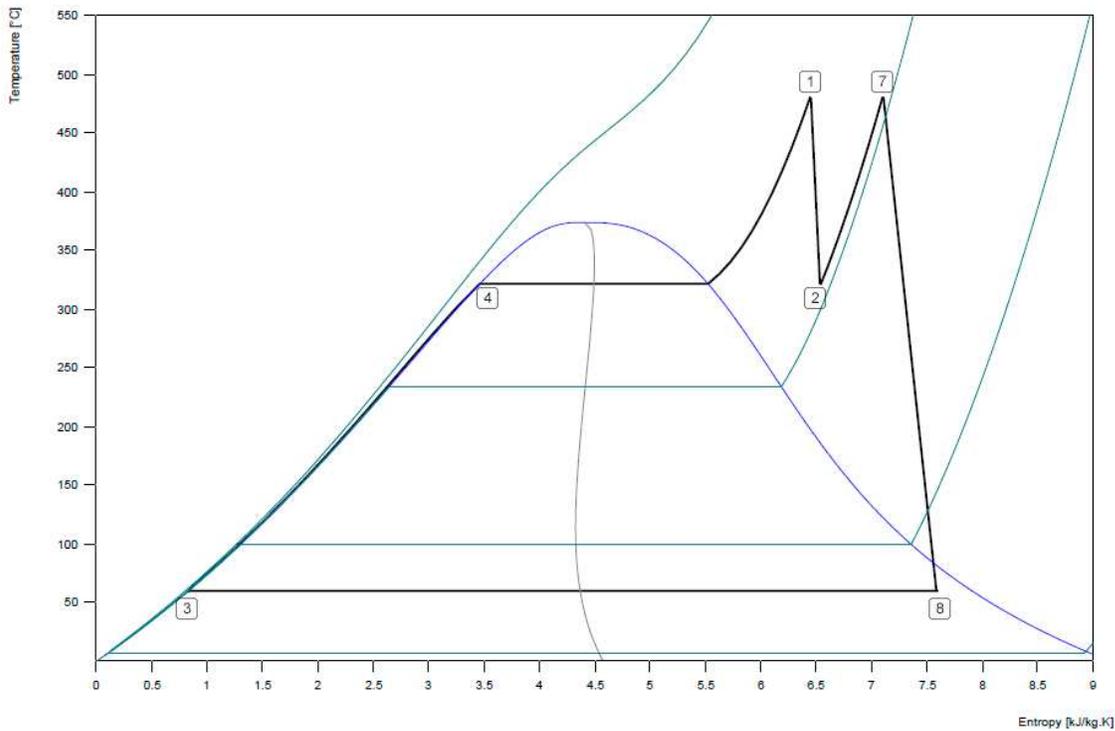


Figura 3.8: Diagrama Temperatura vs Entropia do ciclo da Figura 3.7.

$$Q_{cald} = \frac{\dot{m}_{v.s.}}{\dot{m}_{fuel}} (h_{v.s.} - h_{a.a.}) \quad (3.10)$$

Onde:

- $\dot{m}_{v.s.}$  ( $kg.s^{-1}$ ) é o fluxo de vapor superaquecido.
- $\dot{m}_{fuel}$  ( $kg.s^{-1}$ ) é o fluxo mássico de combustível seco.
- $h_{v.s.}$  ( $kJ.kg^{-1}$ ) é a entalpia do vapor superaquecido.
- $h_{a.a.}$  ( $kJ.kg^{-1}$ ) é a entalpia da água de alimentação da caldeira.

Para realizar o balanço térmico, ou energético, da caldeira são consideradas uma série de perdas energéticas. Estas perdas são:

- Perdas ao meio ambiente pela transferência de calor das paredes externas da caldeira (convecção e radiação).
- Perdas pela combustão incompleta, devido à presença nos gases de combustão de  $CO$ ,  $H_2$ ,  $CH_4$  e outros; e partículas de combustível nos gases e nas cinzas.

- Perdas de calor pela entalpia dos gases de saída da caldeira.

Na Figura 3.9 é apresentado o esquema de uma caldeira aquotubular, onde temos como entradas ao volume de controle a biomassa (composta pela fração seca e a umidade), o ar úmido e a água de alimentação (retorno de condensado). Nas saídas temos o vapor superaquecido, os gases de exaustão (gases de combustão, umidade do combustíveis e umidade do ar) e as perdas pela transferência de calor ao ambiente. Assim, o balanço térmico fica segundo a equação 3.11.

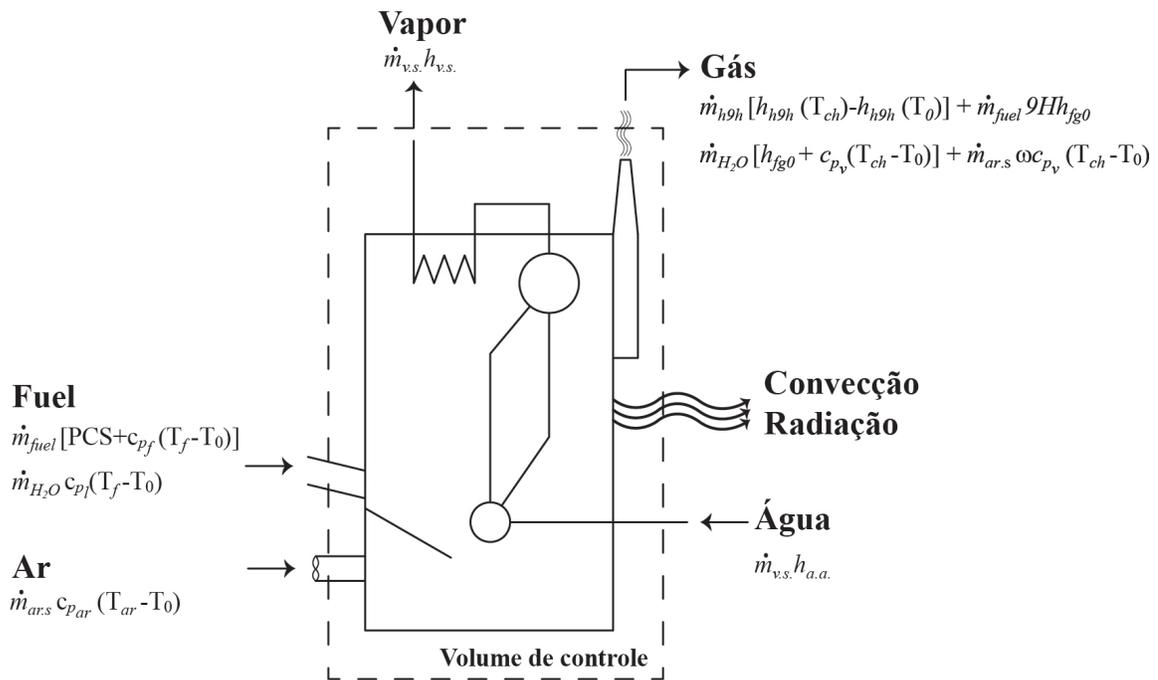


Figura 3.9: Esquema do balanço térmico da caldeira.

$$\begin{aligned}
 & \dot{m}_{fuel} [PCS + c_{p_f} (T_f - T_0)] + \dot{m}_{H_2O} c_{p_l} (T_f - T_0) + \dot{m}_{ar.s} c_{p_{ar}} (T_{ar} - T_0) + \\
 & + \dot{m}_{v.s.} h_{a.a.} = \dot{m}_{v.s.} h_{v.s.} + \dot{m}_{h9h} [h_{h9h} (T_{ch}) - h_{h9h} (T_0)] + \dot{m}_{fuel} 9H h_{fg0} + \\
 & + \dot{m}_{H_2O} [h_{fg0} + c_{p_v} (T_{ch} - T_0)] + \dot{m}_{ar.s} \omega c_{p_v} (T_{ch} - T_0) + \dot{m}_{fuel} PCS (1 - \eta_{comb} \times \eta_{T.C.})
 \end{aligned} \quad (3.11)$$

Onde:

- $\dot{m}_{fuel}$ ;  $\dot{m}_{H_2O}$ ;  $\dot{m}_{ar.s.}$ ;  $\dot{m}_{v.s.}$ ;  $\dot{m}_{h9h}$  são os fluxos mássicos do combustível seco, da umidade

do combustível, do ar seco de combustão, do vapor superaquecido e dos gases de combustão semi-umidos<sup>4</sup>, ( $kg.s^{-1}$ ).

- $h_{a.a.}$ ;  $h_{v.s.}$  são as entalpia da água de alimentação da caldeira e do vapor superaquecido, ( $kJ.kg^{-1}$ ).
- $PCS$  é o poder calorífico superior do combustível, ( $kJ.kg^{-1}$ ).
- $h_{h9h}$  é a entalpia dos gases avaliada à temperatura de saída dos gases ( $T_{ch}$ ) e à temperatura de referência ( $T_0=25^\circ C$ ), ( $kJ.kg^{-1}$ ).
- $c_{pf}$ ;  $c_{pv}$ ;  $c_{pl}$ ;  $c_{par}$  são os calores específicos do combustível, do vapor de água, da água líquida e do ar respectivamente, ( $kJ.kg^{-1}.K^{-1}$ ).
- $\omega$  é o conteúdo de umidade no ar, ( $kg_{agua}.kg_{ar\ seco}^{-1}$ ).
- $H$  é a quantidade de hidrogênio no combustível, ( $kg_{hidrogenio}.kg_{fuel}^{-1}$ ).
- $h_{fg0}$  é a entalpia de vaporização da água à temperatura de referência, ( $kJ.kg^{-1}$ ).
- $T_f$  e  $T_{ar}$  são as temperatura do combustível e do ar na entrada do volume de controle.
- $\eta_{comb}$  é a eficiência da combustão.
- $\eta_{T.C.}$  é a eficiência em relação as perdas pela transferência de calor ao ambiente.

Para simplificar o cálculo são feitas algumas hipóteses:

- Ar sem umidade ou seco ( $\omega = 0 kg_{agua}.kg_{ar\ seco}^{-1}$ );
- As temperaturas de entrada do combustível e a do ar iguais à temperatura de referência ( $T_f = T_{ar} = T_0$ );

Além disso, todos os fluxos mássicos são divididos pelo fluxo mássico do combustível seco, sendo  $G_x$  o fluxo do item  $x$  por quilograma de combustível seco. Com essa considerações e reagrupando os termos, o balanço energético da caldeira fica segundo a equação 3.12

$$G_{v.s.}(h_{v.s.} - h_{a.a.}) = PCS \times \eta_{comb} \times \eta_{T.C.} - G_{h9h}[h_{h9h}(T_{ch}) - h_{h9h}(T_0)] - \quad (3.12)$$

$$9Hh_{fg0} - (H_2O)_f[h_{fg0} + c_{pv}(T_{ch} - T_0)] = Q_{cald} \quad (3.13)$$

<sup>4</sup>Gases gerados na combustão considerando unicamente a água gerada na combustão.

O objetivo do balanço energético é determinar a energia útil  $Q_{cald}$  para ser empregada na equação 3.5 no cálculo da energia elétrica que pode ser produzida. O cálculo é realizado para dois esquemas diferentes, os quais tentam exemplificar dois grandes grupos de fornalhas, as de leito fixo e de leito fluidizado. Baseado nos dados da bibliografia (Seção 2.4.1) são fixados os valores aproximados da eficiência de combustão e do excesso de ar empregado na combustão segundo o tipo de fornalhas (Tabela 3.5). Outras hipóteses tomadas para resolver o balanço térmico da caldeira são:

- A temperatura de saída dos gases ( $T_{ch}$ ) estima-se em 180°C para os dois tipos de fornalha.
- O teor de umidade em 25% em base seca. Considera-se que este teor de umidade pode ser atingido com secagem natural.
- Perdas de energia pela convecção e radiação das paredes da caldeira estimadas em 2% do PCS do combustível.

Tabela 3.5: Parâmetros da combustão escolhidos

Fornalha	Excesso de ar (%)	$\eta_{comb}$ (%)
Leito Fixo	40	92
Leito Fluidizado	25	98

Referência: Ver Seção 2.4.1

Empregando a composição elementar das biomassas e o excesso de ar correspondente, é resolvida a estequiometria da combustão com a ajuda do programa *CEAgui (Chemical Equilibrium with Applications)* da NASA. Assim são determinadas a composição dos gases de combustão, sua entalpia e o fluxo mássico deles ( $G_{hgh}$ ). Com estes resultados e o balanço térmico determina-se o  $Q_{cald}$  e a eficiência da caldeira, logo depois empregando as equações 3.5 e 3.6 calcula-se a energia e a potência de geração de cada fração da árvore e resíduo da fábrica.



## 4. RESULTADOS

### 4.1 Resultados das análises e discussão

A seguir são apresentados os resultados das análises realizadas às amostras e dados comparativos da bibliografia, com a finalidade de avaliar e discutir sobre o emprego destas biomassas como combustível.

#### **Umidade *in natura***

Na primeira etapa da preparação das amostras, logo da colheita, estas foram secadas em uma estufa a 60°C e determinado o teor de umidade *in natura*. Embora para obter uma secagem total a temperatura deve ser de pelo menos 100°C, foi optado por fazer o teste a 60°C para ter certeza de que até esta temperatura nenhum outro componente da biomassa iria ser volatilizado.

Na Tabela 4.1 são apresentadas as porcentagens de umidade em base úmida das amostras coletadas da floresta. Destaca-se, como era de esperar, o elevado teor de umidade dos resíduos gerados no dia da colheita das toras. A casca foi quem apresentou maior conteúdo de umidade com 61,7%. As folhas, galhos e pontas tinham 48,4%, 40,4% e 50,0% de umidade, respectivamente. Estes resultados são da ordem dos constatados na bibliografia, onde o teor de umidade da copa de eucalipto (galhos e folhas) no momento do corte é 52~53% e da casca entre 64 e 66% em base úmida (BRITO et al., 1979; COUTO et al., 1984).

O elevado teor de umidade gera uma série de problemas no condicionamento para utilização das biomassas com fins energéticos (ORTÍZ L., 2003). Porém, segundo se pode observar na Tabela 4.1, o teor de umidade reduz-se rapidamente com o passar dos dias. Segundo as amostras coletadas e os resultados obtidos, com 32 dias à intempérie, as biomassas já tinham atingido uma umidade bem menor, na faixa de 5 a 8%, a qual se manteve quase constante ao longo do tempo.

A secagem natural depende de vários fatores, entre os quais se destacam as condições ambientais e climáticas como a temperatura ambiente e as precipitações, e as condições do material, ou seja, se ele encontra-se espalhado ou em pilhas, o tamanho e a compactação do material, conteúdo e distribuição de cascas e elementos finos. A umidade atingida pelo material de pesquisa é noto-

Tabela 4.1: Umidade *in natura* dos resíduos florestais (% , b.u.)

	Do Dia	32 Dias	94 Dias
Folhas	48,4	5,8	7,9
Casca	61,7	4,5	7,2
Galhos	40,4	8,5	8,0
Pontas	50,0	8,2	-

riamente menor que os dados obtidos na bibliografia, onde é estimado que dificilmente podem ser alcançadas umidades menores do que 20% (b.u.) com a secagem natural (ORTÍZ L., 2003). Outras pesquisas fazem referencia a que nas toras as vezes são necessários períodos de tempo maiores do que um ano antes de poder empregar a biomassa (HE et al., 2012). O fato de ter alcançado um teor de umidade de menos de 8% em um mês pode estar vinculado com a forma de disposição do material no campo, espalhado. Também deve-se notar que a amostragem foi realizada no mês de agosto, mês seco no Estado de São Paulo. Porém, desde que foram estudadas amostras localizadas na mesma região e sob as mesmas condições ambientais, não podem ser levantadas conclusões da dependência da secagem com as condições ambientais.

Quanto aos resíduos de biomassa gerados na fábrica, Tabela 4.2, o único que tem um teor de umidade independente das condições ambientais é o lodo orgânico, o qual provem de um tratamento de esgotos, levando a concentração de sólidos até a faixa de 20 a 40%. Ou seja, o teor de umidade de 80% (determinado na análise) é o valor normal, mas ela deve ser reduzida para o aproveitamento energético do resíduos.

Tabela 4.2: Umidade *in natura* dos resíduos da fábrica (% , b.u.)

Cavacos	Finos	Casca + Lascas	Lodo orgânico
25,8	47,4	14,3	79,2

O teor de umidade das outras biomassas, cavacos, finos e casca + lascas, sendo estes 25,8%, 47,4% e 14,3% respectivamente, podem variar segundo a amostragem. Pois as cascas e lascas provem da lavagem das toras, então a umidade logo depois deste processo deve ser mais elevada do que 14%. Além disso, este material é armazenado na intempérie, então sua umidade vai depender

de como for sua secagem natural, similar ao que acontece com os resíduos do campo. Os cavacos e finos, são gerados na trituração das toras, imediatamente depois da lavagem, então sua umidade depende da umidade inicial da tora, da lavagem e da secagem natural em pilhas, pois tanto os cavacos quanto os finos são armazenados em pilhas à intempérie.

### **Massa específica**

Na Tabela 4.3 são apresentados os resultados médios da determinação das massas específicas aparente e do leito das biomassas moídas. A seguir são discutidos os resultados.

**Massa específica aparente.** Primeiramente, deve-se destacar que o método da picnometria empregando água como fluido de trabalho para determinar a massa específica aparente da biomassa não é muito preciso, desde que para algumas biomassas, parte da amostra não afunda na água, gerando assim uma imprecisão na medida. Porém, foram tomadas todas as precauções possíveis para obter resultados aceitáveis. De forma geral, as folhas são a fração da árvore mais leve, com uma massa específica aparente ligeiramente abaixo da apresentada pela água ( $810 - 920 \text{ kg.m}^{-3}$ ) e a qual vai-se reduzindo com a degradação do material no campo. As outras frações da árvore apresentam resultados semelhantes uns aos outros, encontrando-se entre  $1100$  e  $1300 \text{ kg.m}^{-3}$ . O lodo orgânico, por sua vez, tem uma massa específica aparente bem maior, sendo esta acima de  $1800 \text{ kg.m}^{-3}$ .

**Massa específica do leito.** A massa específica do leito depende, entre outros fatores independentes da natureza da biomassa, do nível de preparação, mais especificamente da distribuição granulométrica e do diâmetro das partículas. Assim, estes resultados estão ligados à moagem feita na preparação das amostras para realizar as análises.

Da Tabela 4.3 podem destacar-se alguns resultados. Primeiramente, as massas específicas do leito, as quais estão na faixa de  $130$  a  $330 \text{ kg.m}^{-3}$ , são entre 2,5 e 9 vezes menor do que a massa específica aparente para cada tipo de amostra. Quem apresentou a maior massa específica do leito foram as folhas ( $325 \text{ kg.m}^{-3}$  na média), mas foram as que apresentaram menor massa específica aparente. Na manipulação deste material, observá-se que as partículas estão soltas umas das outras sem ser aderentes. O material muito aderente e fibroso é a casca, a qual apresentou a menor massa

Tabela 4.3: Massa específica da biomassa seca.

Amostra	$\rho_a$ ( $kg.m^{-3}$ )	$\rho_{Leito}$ ( $kg.m^{-3}$ )
Folhas do dia	926,5 ± 123,7	332,8 ± 3,8
Folhas 32 dias	830,8 ± 39,2	322,5 ± 5,8
Folhas 94 dias	812,7 ± 25,9	320,5 ± 6,7
Casca do dia	1175,1 ± 366,2	133,6 ± 5,9
Casca 32 dias	1543,2 ± 118,6	150,7 ± 5,3
Casca 94 dias	1175,7 ± 163,9	136,9 ± 3,5
Galhos do dia	1311,5 ± 80,9	253,5 ± 4,5
Galhos 32 dias	1218,4 ± 63,8	217,5 ± 5,6
Galhos 94 dias	1127,1 ± 73,2	188,7 ± 2,8
Pontas do dia	1121,8 ± 115,4	230,4 ± 5,9
Pontas 32 dias	1185,8 ± 61,2	239,1 ± 9,1
Cavacos	971,1 ± 91,6	197,1 ± 4,1
Finos	852,3 ± 97,4	132,8 ± 3,2
Casca + Lascas	1098,4 ± 55,2	180,1 ± 6,7
Lodo orgânico	1824,0 ± 80,7	201,8 ± 5,5

Massa específica determinada nas biomassas moídas.

específica do leito, um pouco acima de  $130 kg.m^{-3}$  e a maior massa específica aparente (sem considerar o lodo orgânico), sendo assim a maior diferença entre as massas específicas (9 vezes). A casca também foi dos materiais mais difíceis de moer pela sua consistência fibrosa e aderente, a qual entope as peneiras dos moinhos e pode travar as facas. Esta observação foi levantada por Ortíz et al. (2003), na sua pesquisa sobre a produção de elementos densificados a partir de resíduos florestais. Miranda et al. (2013), trabalhando com casca de eucalipto globulus, determinou massa específica do leito da casca em  $169,4 \pm 18,5 kg.m^{-3}$  para uma distribuição de partículas menores que  $2 mm$ .

A grande diferença entre os resultados obtidos para os cavacos e os finos é notável. Não era de esperar uma diferença entre estas duas amostras já que ambas proveém da tora da árvore e tiveram o mesmo procedimento de moenda.

Considerando que a massa específica do leito destas biomassas é relativamente baixa, o que transcende em elevados custos de transporte, é recomendável realizar elementos densificados como os briquetes e/ou os pellets, nos quais pode-se atingir densidades a granel da ordem de 800 a 900  $kg.m^{-3}$  (ORTÍZ L., 2003).

## Distribuição granulométrica

A distribuição granulométrica, determinada pelo método de peneiramento, apresentou na maioria das amostras dois picos. No Apêndice B encontram-se os gráficos obtidos para cada amostra. Como exemplo, na Figura 4.1 é representada a distribuição granulométrica e acumulada das folhas de 32 dias.

Foi determinado o diâmetro médio de Sauter ( $\bar{d}_p$ ) para as diferentes amostras, o qual é apresentado na Tabela 4.4.

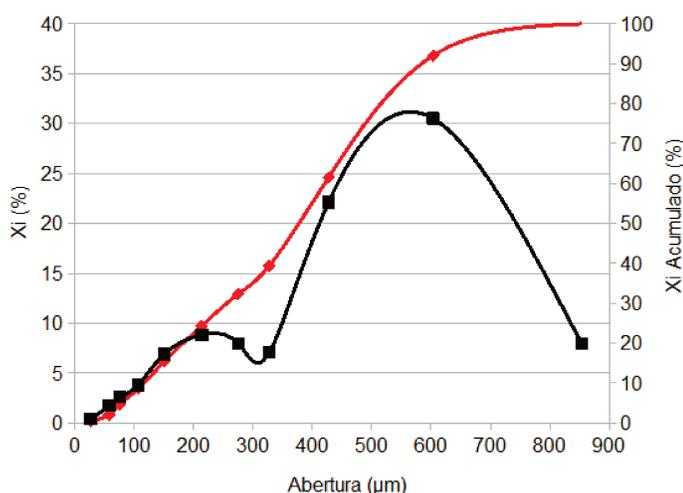


Figura 4.1: Distribuição granulométrica das folhas de 32 dias.

As folhas foram as que apresentaram um diâmetro de Sauter maior, chegando até 300  $\mu m$  nas folhas do dia. Por sua vez, a casca é que tem menor diâmetro médio, estando na faixa de 125 a 155  $\mu m$ . A distribuição granulométrica depende fortemente do processo de moagem, onde foi observada uma grande diferença entre a moagem das folhas e das cascas. Fato que foi destacado também na discussão dos resultados da massa específica. As outras biomassas têm um comportamento similar umas das outras na moagem, dando como resultados diâmetros semelhantes uns aos outros, na faixa de 220 a 270  $\mu m$ .

Com o objetivo de empregar a biomassa como combustível não tem um benefício iminente realizar uma moagem até uma granulométrica tão pequena. Caso se deseje realizar elementos densificados, obtendo uma granulométrica entre 500 e 1.000  $\mu m$  já seria suficiente (ORTÍZ L., 2003).

Tabela 4.4: Diâmetro médio de Sauter ( $\mu m$ ).

Amostra	$\bar{d}_p$
Folhas do dia	302
Folhas 32 dias	277
Folhas 94 dias	179
Casca do dia	156
Casca 32 dias	126
Casca 94 dias	140
Galhos do dia	220
Galhos 32 dias	271
Galhos 94 dias	252
Pontas do dia	249
Pontas 32 dias	242
Cavacos	263
Finos	261
Casca + Lascas	153

Em nosso caso foi realizada uma moagem menor para poder empregar o material nas análises.

**Classificação de Geldart.** Na Figura 4.2 apresenta-se o diagrama de Geldart, onde são situadas as biomassas estudadas. As partículas encontram-se concentradas no limite entre o grupo A e B. Segundo Geldart (1973) a maioria das partículas no grupo A são finas e/ou de massa específica baixa, o leito expande-se antes de formar bolhas e pode apresentar comportamento de fluidização homogênea. As partículas do grupo B têm um tamanho intermediário, apresentam formação de bolhas imediatamente acima da condição de mínima fluidização e comportamento de fluidização heterogênea.

### Composição imediata

Da análise imediata realizada nas amostras é determinado o teor de umidade, voláteis, carbono fixo e cinzas. Na Tabela 4.5 são apresentados os resultados médios obtidos pelo autor e dados comparativos da bibliografia.

Todas as biomassas, exceto o lodo orgânico, apresentam valores de teor de voláteis e carbono fixo similares aos constatados na bibliografia, estando estes na faixa de 78 a 90% (b.s.) para os

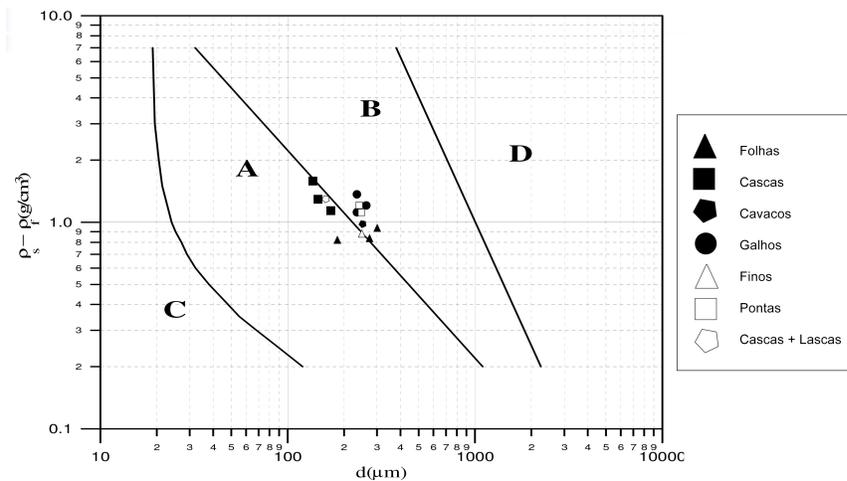


Figura 4.2: Diagrama de classificação da fluidização de partículas (GELDART, 1973).

voláteis e de 10 a 17% (b.s.) para o carbono fixo. A casca é quem tem maior conteúdo de cinzas, com 4,5%, logo depois as folhas (3,2%), casca + lascas (1,8%) e os galhos (1%) em base seca. O resto das amostras, as pontas, cavacos e finos, apresentam valores muito baixos e semelhantes uns aos outros de teor de cinzas, estando na faixa de 0,2 a 0,7% (b.s.). O conteúdo de cinzas é um parâmetro importante o qual afeta diretamente a qualidade do combustível. As biomassas com teor de cinzas baixo são consideradas melhores matérias primas. O fato de que as cascas sejam as que têm maior conteúdo de cinzas, seguido das folhas, galhos e madeira é observado também na bibliografia. Porém, existe uma grande variação nos resultados dependendo da espécie de eucalipto em questão (KUMAR et al., 2011).

Na Tabela 4.5 observa-se mudanças dos teores com o passar do tempo das amostras de folhas, casca e galhos. Primeiramente, com exceção das folhas, o teor de voláteis diminuiu e o teor de carbono fixo aumentou do dia para os 94 dias. Esta peculiaridade é razoável considerando que a biomassa é biodegradável e os voláteis são os componentes mais leves e, por conseguinte, os primeiros em degradar-se. O acontecido com as folhas, onde o teor de voláteis aumentou e o de carbono fixo diminuiu, pode ser devido a erros cometidos na análise. Quanto as cinzas, as três amostras apresentam o mesmo comportamento, um teor de cinzas menor nas amostras que ficaram 94 dias no campo do que as amostras coletadas o dia da colheita das toras. Este comportamento encontra-se ligado à lixiviação das cinzas com a água da chuva, ou seja, a água da chuva faz uma extração ou solubilização seletiva de alguns constituintes químicos das cinzas (TURN; KINOSHITA;

Tabela 4.5: Composição Imediata média (% , b.s.)

Material	Voláteis	Carbono Fixo	Cinzas	Referência
Folhas do dia	80,1 ± 0,7	16,6 ± 0,7	3,2 ± 0,1	Este Trabalho
Folhas 32 dias	83,0 ± 1,6	14,7 ± 1,6	2,4 ± 0,1	Este Trabalho
Folhas 94 dias	82,1 ± 1,3	15,3 ± 1,3	2,6 ± 0,1	Este Trabalho
Casca do dia	80,4 ± 0,9	15,1 ± 0,9	4,5 ± 0,2	Este Trabalho
Casca 32 dias	86,2 ± 7,1	8,9 ± 7,1	4,9 ± 0,1	Este Trabalho
Casca 94 dias	78,9 ± 0,9	17,1 ± 0,9	4,0 ± 0,1	Este Trabalho
Galhos do dia	84,3 ± 3,9	14,8 ± 3,9	0,9 ± 0,1	Este Trabalho
Galhos 32 dias	88,3 ± 1,1	10,6 ± 1,1	1,2 ± 0,1	Este Trabalho
Galhos 94 dias	83,7 ± 1,5	15,6 ± 1,5	0,8 ± 0,1	Este Trabalho
Pontas do dia	89,5 ± 1,2	10,2 ± 1,2	0,3 ± 0,1	Este Trabalho
Pontas 32 dias	87,4 ± 0,2	11,9 ± 0,2	0,7 ± 0,2	Este Trabalho
Cavacos	87,0 ± 0,90	12,8 ± 0,9	0,3 ± 0,1	Este Trabalho
Finos	92,8 ± 1,37	7,0 ± 1,4	0,2 ± 0,1	Este Trabalho
Casca + Lascas	83,8 ± 0,8	14,4 ± 0,8	1,8 ± 0,1	Este Trabalho
Lodo orgânico	64,7 ± 1,0	2,1 ± 1,0	33,1 ± 0,5	Este Trabalho
Madeira <i>E. grandis</i>	88,4	11,5	0,1	(MUSINGUZI et al., 2012)
Madeira Eucalipto	81,4	17,8	0,8	(CORTEZ; LORA; GÓMEZ, 2008)
Madeira <i>E. hybrid</i>	79,40	20,17	0,43	(KUMAR et al., 2011)
Casca Eucalipto	77,0	16,8	6,2	(GARCÍA et al., 2013)
Cavaco Eucalipto	79,0	19,1	1,9	(GARCÍA et al., 2013)
Madeira <i>E. grandis</i>	84,9	14,55	0,55	(HEIDARI et al., 2013)
Madeira <i>E. grandis</i>	83,7	16,2	0,1	(ALMEIDA; BRITO; PERRÉ, 2010)
Madeira <i>E. saligna</i>	81,0	18,7	0,3	(ALMEIDA; BRITO; PERRÉ, 2010)
Casca <i>E. grandis</i>	60,0	34,5	5,5	(ALMEIDA; BRITO; PERRÉ, 2010)
Casca <i>E. saligna</i>	81,6	12,2	6,2	(ALMEIDA; BRITO; PERRÉ, 2010)
Folhas <i>E. glubulus</i>	-	-	5,8	(PÉREZ et al., 2006)
Casca <i>E. glubulus</i>	-	-	6,3	(PÉREZ et al., 2006)
Galhos Finos <i>E. glubulus</i>	-	-	2,8	(PÉREZ et al., 2006)
Galhos Grossos <i>E. glubulus</i>	-	-	3,4	(PÉREZ et al., 2006)
Folhas <i>E. nitens</i>	-	-	1,5	(PÉREZ et al., 2006)
Casca <i>E. nitens</i>	-	-	7,1	(PÉREZ et al., 2006)
Galhos Finos <i>E. nitens</i>	-	-	1,1	(PÉREZ et al., 2006)
Galhos Grossos <i>E. nitens</i>	-	-	2,2	(PÉREZ et al., 2006)
Bagaço de Cana	90,0	6,9	3,0	(BIZZO et al., 2014)
Madeira de Pinus	82,5	17,7	0,3	(CORTEZ; LORA; GÓMEZ, 2008)
Casca de Arroz	65,5	16,7	18,9	(CORTEZ; LORA; GÓMEZ, 2008)

ISHIMURA, 1997).

O lodo orgânico tem uma composição imediata bem diferente das outras biomassas estudadas, este tem 65% de voláteis, 2% de carbono fixo e 33% de cinzas. O mais notável, e nocivo para a utilização desta biomassa como combustível, é seu muito elevado teor de cinzas, o qual é 100 vezes maior ao dos cavacos.

Comparado com outras biomassas empregadas como combustível, sendo estas a madeira de pinus, o bagaço de cana de açúcar e a casca de arroz, a madeira de pinus tem características similares à do eucalipto. Porém, os resíduos agrícolas (ou agroindustriais) têm diferenças notórias em relação à madeira de eucalipto, principalmente no teor de cinzas, onde o bagaço apresenta um teor de cinzas similar aos resíduos florestais (3,0%) e a casca de arroz atinge valores muito maiores (19%). Deste ponto de vista, e considerando a ampla difusão no emprego do bagaço como combustível nas usinas de açúcar e álcool, pode ser atraente empregar os resíduos florestais como combustível.

### **Composição estrutural**

A composição estrutural dos materiais, determinada no Laboratório de Celulose e Papel do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa, encontra-se detalhada na Tabela 4.6. Foram especificadas as porcentagens em base seca da celulose (glicanas), hemicelulose (arabinanas, galactanas, xilanas e mananas), lignina (solúvel e insolúvel) e extrativos totais. A análise tem uma certa porcentagem não identificada, a qual inclui as cinzas e outros componentes não identificados. Na Tabela 4.6 é adicionada a porcentagem de cinzas determinada na análise imediata e subtraído da porcentagem dos componentes não identificados.

A fração empregada para a fabricação de polpa de celulose e papel, os cavacos, é a fração da árvore com maior conteúdo de celulose (46,5%), sendo os teores de hemicelulose, lignina e extrativos de 13,3%, 29,9% e 2,7% em base seca, respectivamente. Estes valores são normais para as espécies empregadas com esta finalidade, com elevado teor de celulose e baixo de lignina e extrativos. Quando a madeira é empregada para fins energéticos, contrariamente ao procurado nas madeiras para polpação, é desejável ter maiores conteúdos de lignina e menores de celulose e hemicelulose (GOMIDE et al., 2005).

Quanto aos resíduos florestais, os resultados são mais variados. As folhas têm menor con-

Tabela 4.6: Composição estrutural (% , b.s.)

Amostra	Celulose	Hemicelulose	Lignina	Extrativos	Cinzas	Não Ident.	Referência
Folhas do dia	15,73	11,01	37,45	32,74	3,07	-	Este Trabalho
Folhas 32 dias	24,57	14,11	37,06	18,95	2,35	2,97	Este Trabalho
Folhas 94 dias	22,92	13,09	38,10	18,25	2,63	5,03	Este Trabalho
Casca do dia	44,08	11,92	21,92	14,24	4,54	3,31	Este Trabalho
Casca 32 dias	39,98	11,69	25,10	10,77	4,91	7,56	Este Trabalho
Casca 94 dias	44,36	13,01	23,73	10,24	3,97	4,70	Este Trabalho
Galhos do dia	38,24	14,67	31,42	6,66	0,88	8,13	Este Trabalho
Galhos 32 dias	38,26	14,61	31,36	4,76	1,15	9,87	Este Trabalho
Galhos 94 dias	39,55	14,83	30,88	4,69	0,79	9,26	Este Trabalho
Pontas do dia	37,92	14,80	31,98	6,83	0,31	8,16	Este Trabalho
Pontas 32 dias	42,78	13,77	30,99	3,10	0,70	8,67	Este Trabalho
Cavacos	46,52	13,30	29,90	2,73	0,31	7,25	Este Trabalho
Finos	46,55	12,09	30,74	3,28	0,19	7,16	Este Trabalho
Cascas + Lascas	47,13	12,45	26,01	8,14	1,82	4,45	Este Trabalho
Lodo orgânico	20,14	3,92	21,94	19,85	33,14	1,02	Este Trabalho
Madeira E. saligna	51,49	16,41	27,1	4,1	0,9	-	(BRITO et al., 2008)
Madeira E. grandis	46,0	21,2	29,3	3,3	0,3	-	(GOMIDE et al., 2005)
Madeira E. grandis	46,25	13,49	30,00	-	0,55	5,71	(HEIDARI et al., 2013)

teúdo de celulose (na faixa de 16 a 25%) do que as cascas, galhos e pontas, os quais não apresentam grandes diferenças (38~44%). Sendo assim, o conteúdo de celulose de todos os resíduos é menor do que da madeira. O teor de hemicelulose, não varia muito em relação ao obtido para os cavacos, todos os resíduos apresentam valores entre 11 e 15%. As folhas, estão constituídas principalmente pela lignina, a qual representa aproximadamente 37% da massa em base seca. São as folhas, as quais têm maior conteúdo de lignina, o resto dos resíduos florestais, cascas, galhos e pontas, têm teores de lignina de 22~25%, 30~31% e 31~32%, respectivamente. Os extrativos também tiveram uma tendência similar à lignina, decrescendo sua concentração na ordem: folhas > casca > galhos > pontas, onde nas folhas verdes o teor de extrativos é mais de 10 vezes maior do que na madeira.

Os extrativos apresentam uma particularidade com o passar do tempo das biomassas no campo, estes diminuem rapidamente logo depois de que o material fica à intempérie. Aos 32 dias já é determinada uma redução à 60% do valor original nas folhas e à 70~75% nas cascas e galhos. Estes teores de extrativos, uma vez reduzidos, conservam-se quase constantes no período de 32 a 94 dias. Os extrativos são a matéria orgânica de menor massa molar na biomassa, então é razoável pensar que são os primeiros em degradar-se ou lixiviar. Um resultado similar foi observado na redução do teor de voláteis pela influencia das condições ambientais e do transcurso do tempo.

Pode-se concluir então, que os extrativos são a fração dos voláteis que se degrada ou lixivia com maior facilidade. Silvêiro et al. (2008), estudaram o efeito do tempo de armazenamento no conteúdo e composição dos extrativos na madeira de eucalipto destinada a polpação no Brasil. Como conclusão destacam que aos 60 dias de estocagem, a madeira perdeu quase 50% dos extrativos e aos 180 dias o conteúdo de extrativos chega à 30% do valor original.

Quanto aos resíduos gerados na fábrica, os finos tem uma composição química muito semelhante à dos cavacos, o que era esperado desde que ambos provém da tora. As cascas + lascas têm uma composição a qual pode ser estimada como uma ponderação entre as cascas e a madeira sem particularidades aparentes. O lodo orgânico, como nas outras propriedades estudadas, apresenta resultados bem diferentes comparado com as outras biomassas. O teor de hemicelulose da amostra analisada foi de quase 4%, e os outros componentes (celulose, lignina e extrativos) encontraram-se todos na faixa de 20 a 22%. O lodo provém dos esgotos os quais são gerados logo depois da digestão, então a presença de celulose e hemicelulose no lodo representa uma perda de rendimento na polpação.

### **Composição elementar**

A análise elementar das biomassas realizada no Laboratório de Celulose e Papel do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa, teve como resultados os dados apresentados na Tabela 4.7.

O conteúdo de carbono representa aproximadamente a metade da massa, nas folhas com um 55%, 48% nas cascas e na faixa de 52 a 53% para os galhos, pontas, cavacos e finos. Quanto ao hidrogênio, este é muito similar entre as diferentes biomassas, representando entre 5 e 6% da massa seca, com exceção do lodo orgânico, o qual apresenta uma composição bem particular.

O nitrogênio, tem uma maior representação nas folhas (1% aprox.) do que nas outras biomassas, nas quais tanto o nitrogênio quanto o enxofre encontram-se em porcentagens menores que 0,2%. Os teores de nitrogênio e enxofre podem variar fortemente segundo a fertilização da floresta. Porcentagens baixas de nitrogênio são importantes do ponto de vista ambiental (KUMAR et al., 2011; PÉREZ et al., 2006).

O teor de oxigênio, calculado por diferença, é elevado, fato que acontece nas biomassas. Assim, o oxigênio representa entre 35 e 43% da massa das biomassas pesquisadas. O elevado

Tabela 4.7: Composição elementar das biomassas (b.s.)

Amostra	C(%)	H(%)	O(%)	N(%)	S(%)	Cloreto(ppm)	Referência
Folhas do dia	54,7	6,0	34,7	1,2	0,2	1339	Este Trabalho
Folhas 32 dias	54,9	5,9	35,8	0,8	0,2	366	Este Trabalho
Folhas 94 dias	55,1	6,0	35,1	1,0	0,2	112	Este Trabalho
Casca do dia	48,1	5,5	41,7	0,1	0,1	4329	Este Trabalho
Casca 32 dias	47,7	5,4	41,8	0,1	0,1	864	Este Trabalho
Casca 94 dias	47,5	5,5	42,7	0,2	0,1	231	Este Trabalho
Galhos do dia	53,3	5,8	39,9	0,0	0,1	760	Este Trabalho
Galhos 32 dias	52,9	5,9	39,9	0,1	0,1	686	Este Trabalho
Galhos 94 dias	52,2	5,9	41,0	0,0	0,1	368	Este Trabalho
Pontas do dia	52,9	6,1	40,6	0,0	0,1	484	Este Trabalho
Pontas 32 dias	52,5	5,9	40,6	0,2	0,1	263	Este Trabalho
Cavacos	52,3	5,9	41,4	0,0	0,1	376	Este Trabalho
Finos	51,7	5,9	42,2	0,0	0,1	269	Este Trabalho
Casca + Lascas	50,0	5,7	42,3	0,1	0,1	423	Este Trabalho
Lodo orgânico	32,0	3,8	28,8	1,6	0,7	939	Este Trabalho
Folhas E. globulus	50,9	6,8	34,9	1,3	0,2	-	(PÉREZ et al., 2006)
Folhas E. nitens	56,0	7,0	32,1	1,3	0,2	-	(PÉREZ et al., 2006)
Casca E. globulus	46,8	6,2	39,9	0,6	0,2	-	(PÉREZ et al., 2006)
Casca E. nitens	53,2	6,7	32,2	0,7	0,1	-	(PÉREZ et al., 2006)
G. gros. E. globulus	43,5	6,7	45,5	0,7	0,1	-	(PÉREZ et al., 2006)
G. gros. E. nitens	47,1	6,6	43,1	0,8	0,2	-	(PÉREZ et al., 2006)
G. finos E. globulus	48,7	6,9	41,0	0,5	0,1	-	(PÉREZ et al., 2006)
G. finos E. nitens	52,7	6,8	38,6	0,7	0,2	-	(PÉREZ et al., 2006)
Madeira E. grandis	49,8	6,0	43,7	0,1	< 0,1	-	(HEIDARI et al., 2013)
Madeira E. hybrid	46,81	5,87	-	0,16	-	-	(KUMAR et al., 2011)
Madeira Eucalipto	49,0	5,9	44,0	0,3	0,01	-	(CORTEZ; LORA; GÓMEZ, 2008)
Madeira de Pinus	49,3	6,0	44,4	0,06	0,03	-	(CORTEZ; LORA; GÓMEZ, 2008)
Bagaço de Cana	44,8	5,4	39,6	0,4	0,01	-	(CORTEZ; LORA; GÓMEZ, 2008)
Casca de Arroz	41,0	5,9	35,9	0,4	0,02	-	(CORTEZ; LORA; GÓMEZ, 2008)

O(%) por diferença.

conteúdo de oxigênio na biomassa é um dos responsáveis pelo baixo o poder calorífico desta. A pouca variação entre as composições elementares nas diferentes amostras é responsável pela pouca variabilidade dos poderes caloríficos, o qual vai ser aprofundado na seção seguinte (KUMAR et al., 2011).

Nos resíduos do campo, onde se tem amostras em diferentes estágios de degradação, não é percebido uma mudança significativa nos principais componentes de um combustível (*C, H, N*). Porém, o cloro na forma de cloreto, teve sim uma redução importante com o passar do tempo em todas as amostras, fato que é notoriamente favorável, desde que o cloro é dos principais elementos participastes na corrosão das tubulações. As folhas, que originalmente tinham 1340 *ppm* de cloreto, 32 dias depois esse valor caiu a 366 *ppm* e até 110 *ppm* aos 94 dias. De forma similar, mas com uma queda mais acentuada, as cascas eram a fração com maior conteúdo de cloreto original (4330 *ppm*), esse valor à 860 e 230 *ppm* aos 32 e 94 dias respectivamente, chegando assim até 5% do teor original.

Comparado com dados da bibliografia, observa-se uma variação entre as diferentes espécies de eucalipto mas com a mesma relação, por exemplo, que as folhas são as que têm maior conteúdo de carbono e nitrogênio. A madeira de pinus tem uma composição elementar bem similar à da madeira de eucalipto. Porém, o bagaço de cana de açúcar e a casca de arroz têm teores de carbono menores. Quanto ao hidrogênio, este não apresenta mudanças significativas entre estas biomassas.

O lodo orgânico, de forma semelhante que nas outras análises, tem resultados bem diferentes às outras biomassas. Assim, tem um conteúdo de carbono e hidrogênio menor, mas os teores de nitrogênio (1,6%) e enxofre (0,7%) são maiores que as outras biomassas. Estas características não são desejáveis nos combustíveis. O nitrogênio e o enxofre podem estar originados na etapa de digestão do processo de polpação.

Na Figura 4.3 é apresentado um diagrama de classificação de combustíveis segundo as taxas atômicas de *H/C* e *O/C*. Todos os pontos ficaram dentro da região de biomassa determinada pelo autor, onde os três pontos mais à esquerda correspondem às cinzas, Os quatro mais à direita são das cascas e do lodo orgânico. Os pontos centrais são os correspondentes aos galhos, pontas, cavacos e finos. Também é compatível com o incremento do poder calorífico, onde as folhas são as de maior poder calorífico e as cascas e o lodo orgânico os de menor poder calorífico.

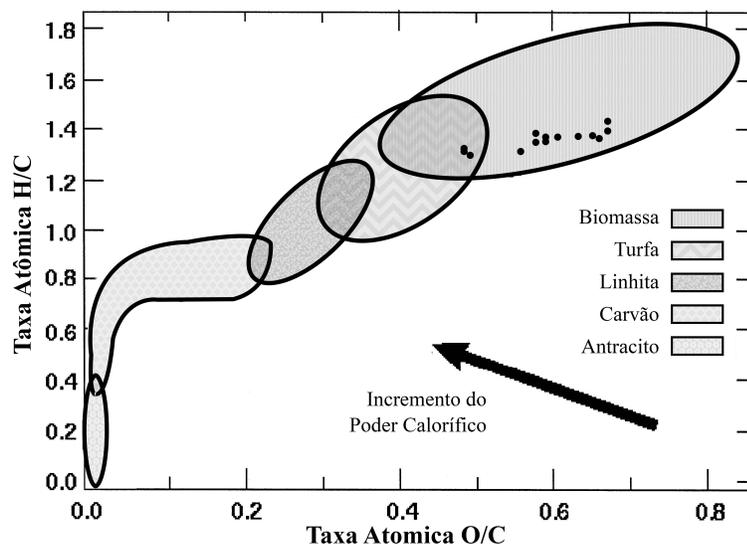


Figura 4.3: Diagrama de classificação que mostra as diferenças na composição de diferentes amostras de biomassa e carvão (JENKINS et al., 1998).

### Poder calorífico

O poder calorífico superior determinado no Laboratório de Celulose e Papel do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa, apresentou resultados desde 17,0 até 21,1  $MJ.kg^{-1}$  para as biomassas não tratadas e 11,6  $MJ.kg^{-1}$  para o lodo orgânico (Tabela 4.8). As folhas foram as de maior PCS com mais de 20  $MJ.kg^{-1}$ , apresentando uma pequena queda com o passar do tempo, o que provavelmente esteja relacionado com a redução do teor de voláteis e extrativos. Os PCS dos galhos, pontas, cavacos e finos não têm grandes diferenças uns dos outros (19,1~19,4  $MJ.kg^{-1}$ ). A casca é o resíduo florestal com menor poder calorífico (17,1  $MJ.kg^{-1}$ ), sendo também a fração de maior conteúdo de cinzas.

Comparado com outras biomassas empregadas como combustível, como a madeira de pinus, o bagaço de cana de açúcar e a casca de arroz, o eucalipto apresenta poderes caloríficos similares a estes, e melhores em alguns casos. A madeira de pinus tem um PCS maior do que a madeira de eucalipto, sendo estes 20,0 e 19,1  $MJ.kg^{-1}$ , respectivamente. Porém, todos os resíduos florestais do eucalipto, até as cascas, têm PCS da ordem ou maior do que o bagaço de cana de açúcar (17,3  $MJ.kg^{-1}$ ) e a casca de arroz (16,1  $MJ.kg^{-1}$ ).

Pelo fato de que as biomassas têm um conteúdo baixo de hidrogênio, na faixa de 5 a 6%, a diferença entre os poderes caloríficos superior e inferior (b.s.) não é grande, sendo o PCS aproxi-

Tabela 4.8: Poder calorífico ( $MJ.kg^{-1}$ )

Amostra	<i>PCS</i>	<i>PCI(b.s.)</i>	Referência
Folhas do dia	21,1	19,8	Este Trabalho
Folhas 32 dias	20,4	19,1	Este Trabalho
Folhas 94 dias	20,5	19,2	Este Trabalho
Casca do dia	17,1	15,9	Este Trabalho
Casca 32 dias	17,0	15,8	Este Trabalho
Casca 94 dias	17,1	15,9	Este Trabalho
Galhos do dia	19,4	18,1	Este Trabalho
Galhos 32 dias	19,4	18,1	Este Trabalho
Galhos 94 dias	19,2	17,9	Este Trabalho
Pontas do dia	19,1	17,8	Este Trabalho
Pontas 32 dias	19,2	17,9	Este Trabalho
Cavacos	19,1	17,8	Este Trabalho
Finos	19,3	18,0	Este Trabalho
Casca + Lascas	18,3	17,0	Este Trabalho
Lodo orgânico	11,6	10,8	Este Trabalho
Madeira <i>E. grandis</i>	20,0	18,7	(ALMEIDA; BRITO; PERRÉ, 2010)
Madeira <i>E. saligna</i>	19,9	18,6	(ALMEIDA; BRITO; PERRÉ, 2010)
Casca <i>E. grandis</i>	16,9	15,6	(ALMEIDA; BRITO; PERRÉ, 2010)
Casca <i>E. saligna</i>	17,1	15,8	(ALMEIDA; BRITO; PERRÉ, 2010)
Cavacos Eucalipto	16,5	-	(GARCÍA et al., 2013)
Casca Eucalipto	16,2	-	(GARCÍA et al., 2013)
Folhas <i>E. globulus</i>	19,6	-	(PÉREZ et al., 2006)
Folhas <i>E. nitens</i>	19,4	-	(PÉREZ et al., 2006)
Casca <i>E. globulus</i>	15,7	-	(PÉREZ et al., 2006)
Casca <i>E. nitens</i>	16,4	-	(PÉREZ et al., 2006)
G. Finos <i>E. globulus</i>	18,6	-	(PÉREZ et al., 2006)
G. Finos <i>E. nitens</i>	18,5	-	(PÉREZ et al., 2006)
G. Grossos <i>E. globulus</i>	18,6	-	(PÉREZ et al., 2006)
G. Grossos <i>E. nitens</i>	18,6	-	(PÉREZ et al., 2006)
Madeira Eucalipto	19,4	-	(CORTEZ; LORA; GÓMEZ, 2008)
Madeira Pinus	20,0	-	(CORTEZ; LORA; GÓMEZ, 2008)
Bagaço de cana	17,3	-	(CORTEZ; LORA; GÓMEZ, 2008)
Casca de arroz	16,1	-	(CORTEZ; LORA; GÓMEZ, 2008)

madamente  $1,3 \text{ MJ.kg}^{-1}$  maior do que o PCI em base seca.

Foram calculados os poderes caloríficos das amostras aplicando correlações empíricas. Os resultados dos cálculos são apresentados na Tabela 4.9, onde também é calculado o erro entre o valor obtido experimentalmente e o valor calculado com as correlações segundo a equação 4.1.

$$Erro = \left| \frac{PCS_{Analise} - PCS_{Eq}}{PCS_{Analise}} \right| \quad (4.1)$$

Nenhuma das correlações empíricas aproxima de forma satisfatória o PCS das biomassas consideradas, chegando até 16% de erro. O cálculo para as folhas do dia com a correlação em função do conteúdo de carbono (2.1) é o que melhor aproxima, com 1,8% de erro. Essa equação (2.1), apresentou resultados maiores para todas as biomassas, onde as cascas e o lodo foram as biomassas pior estimadas. Com o uso da correlações em função do teor de cinzas (2.2), calculo-se um PCS menor para as folhas e maior para as outras amostras. Por último, a correlação que relaciona maior quantidade de características da biomassa (2.4), deu como resultados poderes caloríficos maior aos determinados experimentalmente. Uma particularidade interessante foi observada neste último caso, o cálculo com a equação 2.3, ou seja, de PCI, aproxima bem melhor o PCS experimental, com um erro menor a 4% (média de 1,1%).

Observando a composição imediata e elementar das cinzas (Tabelas 4.5 e 4.7) junto com o PCS (Tabela 4.8), estima-se que o PCS das biomassas depende principalmente do teor de cinzas e carbono, o primeiro tendo um impacto negativo e o segundo positivo. O conteúdo de hidrogênio não é tão influente desde que seu teor não é elevado e quase não varia de uma biomassa para outra. Para poder obter alguma correlação entre estas propriedades das biomassas é necessário ter uma família maior de amostras e realizar uma análise estatística.

### **Análises térmicas**

As análises térmicas foram realizadas sob atmosfera inerte em cinco amostras de biomassa e cinco amostras de cinzas, sendo traçados os gráficos da perda de massa em função da temperatura (TGA), sua derivada (DTG), a calorimetria espectral diferencial (DSC) e sua derivada (dDSC). A derivada primeira da DSC em função da temperatura, não é geralmente traçada, mas neste trabalho foi feita com a finalidade de acentuar alguns detalhes da ocorrência de reações endotérmicas e/ou exotérmicas na pirólise.

Tabela 4.9: Poder calorífico calculado a partir de correlações empíricas ( $MJ.kg^{-1}$ )

Amostra	Res. Exp.	Equação 2.1		Equação 2.2		Equação 2.4	
	<i>PCS</i>	<i>PCS</i>	<i>Erro</i> (%)	<i>PCS</i>	<i>Erro</i> (%)	<i>PCS</i>	<i>Erro</i> (%)
Folhas do dia	21,1	21,5	1,8	19,5	7,5	22,3	5,6
Folhas 32 dias	20,4	21,6	5,7	19,7	3,4	22,1	8,3
Folhas 94 dias	20,5	21,6	5,5	19,6	4,2	22,4	9,2
Casca do dia	17,1	19,2	12,1	19,3	12,6	18,6	9,1
Casca 32 dias	17,0	19,0	12,0	19,2	12,8	18,4	8,1
Casca 94 dias	17,1	19,0	10,9	19,4	13,3	18,3	7,2
Galhos do dia	19,4	21,0	8,2	20,0	3,1	21,0	8,1
Galhos 32 dias	19,4	20,9	7,5	19,9	2,8	21,0	8,1
Galhos 94 dias	19,2	20,6	7,3	20,0	4,3	20,6	7,3
Pontas do dia	19,1	20,9	9,2	20,1	5,3	21,1	10,7
Pontas 32 dias	19,2	20,7	7,9	20,0	4,4	20,8	8,1
Cavacos	19,1	20,6	8,1	20,1	5,3	20,6	7,9
Finos	19,3	20,4	5,9	20,1	4,4	20,3	5,3
Casca + Lascas	18,3	19,8	8,4	19,8	8,3	19,5	6,4
Lodo orgânico	11,6	13,5	16,7	13,5	16,0	12,5	8,1

Começando a discussão dos resultados com as biomassa, mais precisamente os cavacos, observam-se comportamentos similares aos constatados na bibliografia para o eucalipto (e outras biomassas) sob o aquecimento em atmosfera inerte (BARNETO; VILA; ARIZA, 2011; MORTARI; ÁVILA; CRNKOVIC, 2011; MUSINGUZI et al., 2012; YANG et al., 2007). Quanto à perda de massa (TGA e DTG), notam-se dois picos. O primeiro, a uma temperatura menor do que 100°C, corresponde à evaporação da umidade. Este pico é apresentado de igual forma para todas as biomassas. O segundo, o qual começa aos 250°C aproximadamente, tem um máximo a 360°C e um ombro aos 280°C. Este ombro é considerado como a degradação da hemicelulose, enquanto o pico apresenta-se pela degradação da celulose. A lignina tem uma degradação térmica menor e numa faixa de temperaturas maior, assim, a cauda no final do pico maior, na faixa de 400 a 500°C é devido à degradação da lignina. Yang et al. (2007) estudaram a pirólise de cada um dos componentes da biomassa separadamente onde podem ser observados estes picos na DTG. A DSC não é muito exata, desde que o equipamento utilizado gera uma incerteza (ou desvio) na medição. Para o caso dos cavacos, esse desvio fica bem claro a partir dos 420°C aproximadamente, onde é determinada uma queda no valor do fluxo de calor a qual não é gerada pela ocorrência de reações térmicas. Fa-

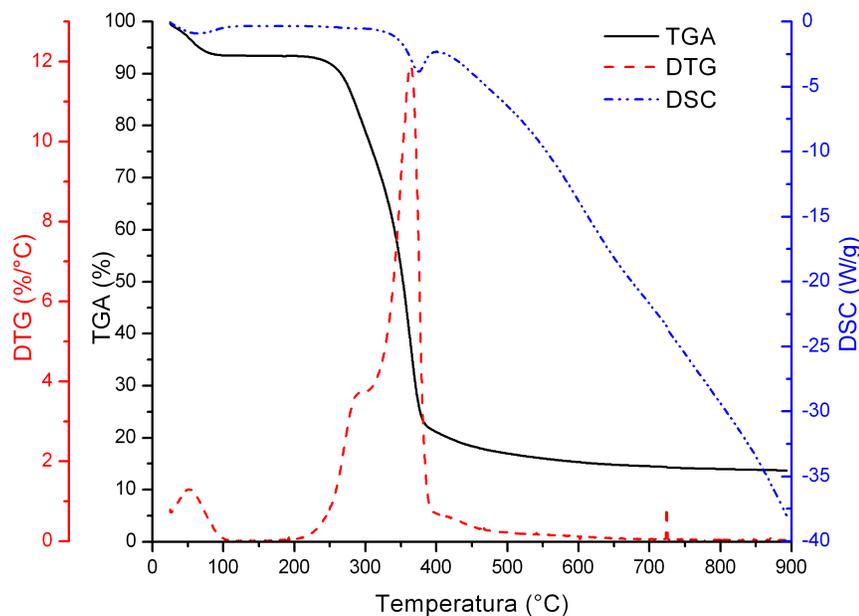


Figura 4.4: Análises térmicas dos cavacos.

tos similares acontecem para a DSC de todas as amostras, tanto nas biomassas quanto nas cinzas. Levando em consideração essa incerteza e tentando abstrair-se dela, são identificados dois picos de reações endotérmicas, o primeiro relacionado com a evaporação da umidade e o segundo se encontra apenas deslocado 5 °C a mais em relação ao pico da pirólise da celulose.

Os galhos, com uma composição imediata, elemental e estrutural relativamente similar à dos cavacos, teve uma degradação térmica bem parecida (ver Figura 4.5). São observados os mesmos dois picos na derivada da perda de massa e os dois correspondentes a reações endotérmicas na DSC. A forma dos picos e as temperaturas onde eles ocorrem são bem similares.

As cascas, além destes picos, apresentam mais três picos menores na perda de massa (Figura 4.6) a temperaturas de 150, 590 e 660 °C. Estes aumentos pontuais na taxa de degradação térmica têm associados reações endotérmicas cada um. O primeiro destes picos menores pode estar relacionado com a pirólise dos extrativos. O comportamento das folhas na pirólise é ainda mais diferenciado comparado com os cavacos (Figura 4.7). A degradação começa a menor temperatura (150 °C), chegando até 550~600 °C. Um grande pico, com o máximo aos 350 °C, tem dois pequenos ombros para temperaturas menores do que o máximo (220 e 270 °C) e um ombro maior (ou pico)

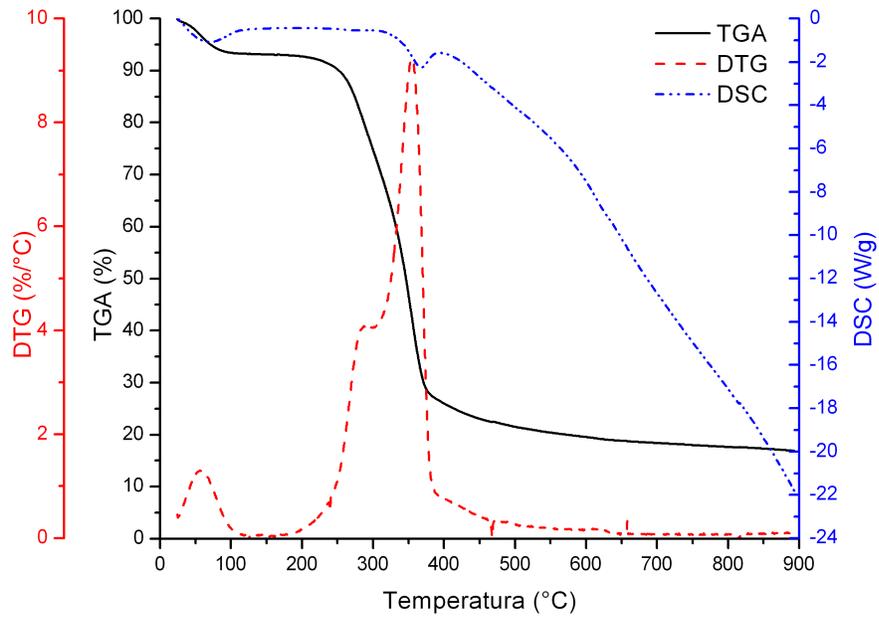


Figura 4.5: Análises térmicas dos galhos do dia.

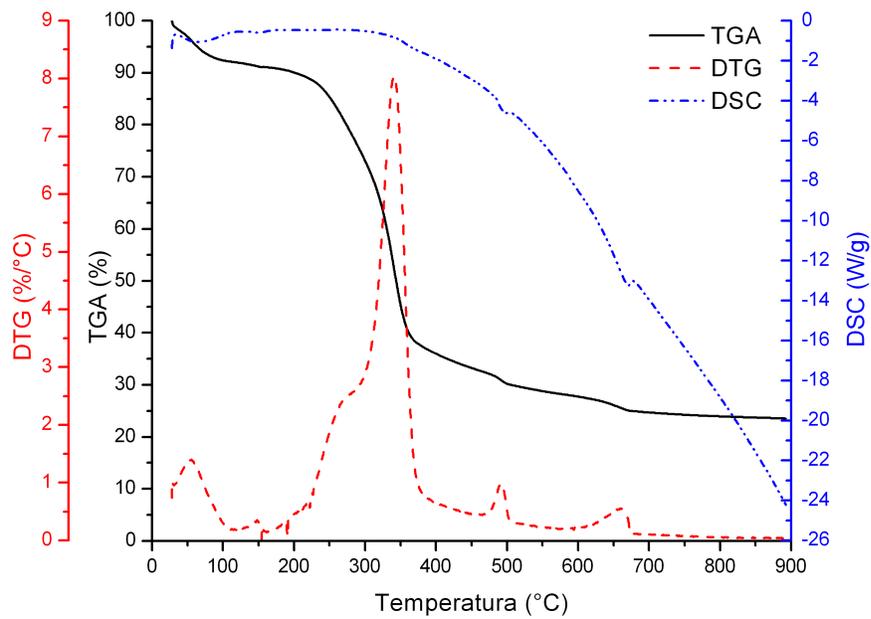


Figura 4.6: Análises térmicas das cascas do dia.

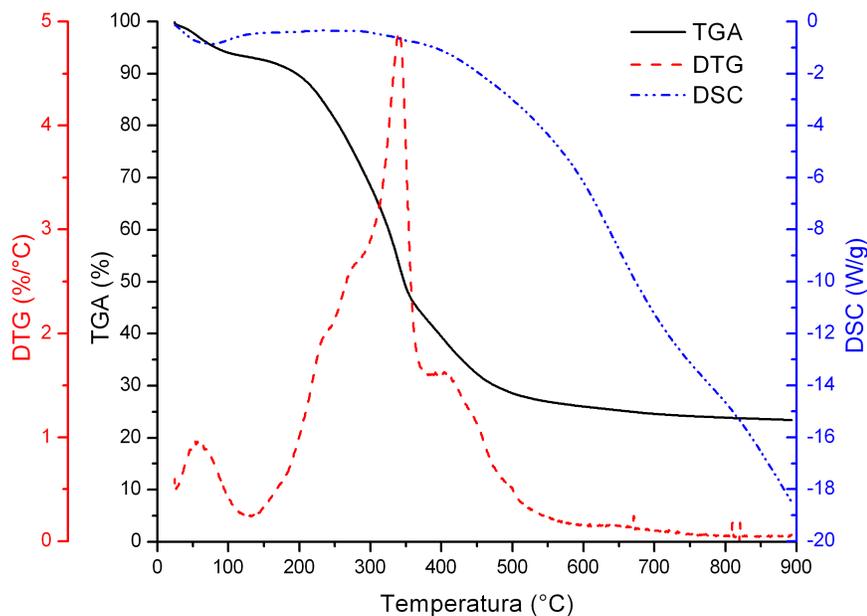


Figura 4.7: Análises térmicas das folhas do dia.

a 410°C. Continuando com o raciocínio empregado nas biomassas anteriores, no sentido crescente da temperatura, o primeiro ombro é gerado pela degradação térmica dos extrativos, o segundo pela hemicelulose, o pico maior pela celulose e o último ombro pela lignina. Considerando que as folhas têm um grande teor tanto de extrativos quanto de lignina, a superposição da degradação destes compostos junto com à hemicelulose e celulose, podem gerar este grande pico.

A análise de DTG do lodo orgânico (Figura 4.8) apresenta o pico da secagem, o pico na faixa de temperaturas da pirólise da hemicelulose e celulose, um pico menor a temperatura de 400°C pela lignina e mais um grande pico na faixa de 600 a 730°C. Este último tem associado uma forte reação endotérmica. Contrariamente ao acontecido nas outras biomassas analisadas, onde todas as pirólises foram puramente endotérmicas, a degradação térmica do lodo orgânico tem um pico exotérmico na faixa de temperaturas associada à pirólise da celulose e/ou hemicelulose.

Nas figuras A.16, A.17, A.18 e A.19 são apresentados gráficos comparativos de cada uma das análises (TGA, DTG, DSC e dDSC) entre as diferentes amostras de biomassa. Assim podem ser notados os deslocamentos de temperaturas entre os fenômenos.

Considerando que neste trabalho foi realizada a TGA unicamente sob atmosfera inerte, po-

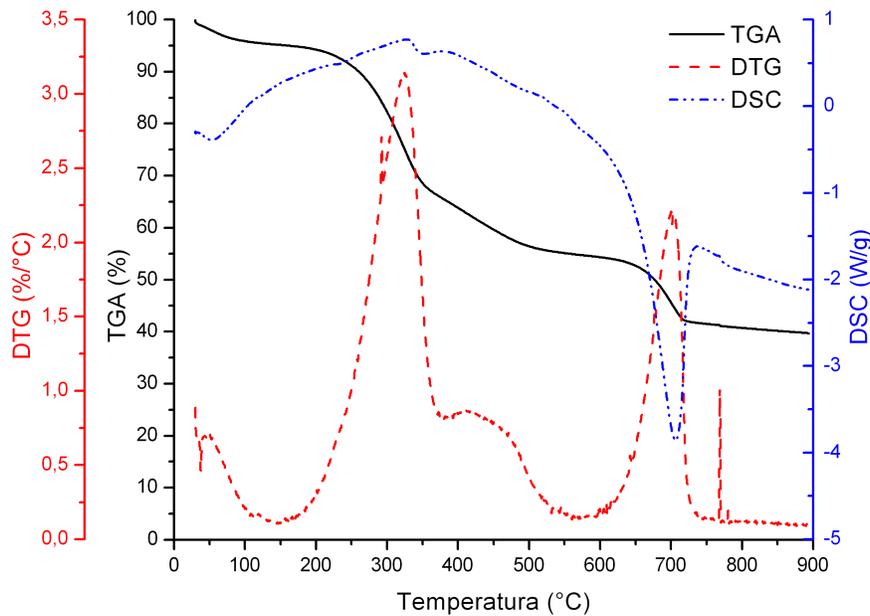


Figura 4.8: Análises térmicas do lodo orgânico.

dem ser determinadas a umidade do combustível e o teor de voláteis. Tomando a temperatura de 105°C como o ponto da secagem total da biomassa (temperatura empregada na análise imediata) e a temperatura final da TGA (900°C) como a temperatura onde já volatilizou toda a matéria volátil, a porcentagem de massa nestes pontos é empregada na determinação da umidade e matéria volátil. Na tabela 4.10 são apresentados os resultados dos voláteis determinados a partir da TGA e da análise imediata. Os resultados mostram que para todas as amostras pesquisadas o teor de voláteis determinado a partir da análise imediata é maior do que o determinado a partir da TGA. Como foi observado na realização da análise imediata, determinando o teor de voláteis a 950°C aparecem cinzas na parte superior da amostra (ver Figura 3.4), ou seja, está-se considerando uma parcela de carbono fixo como matéria volátil.

Quanto às cinzas, desde que foram preparadas a 575°C, não deveriam apresentar quedas na massa a temperaturas menores do que esta. Porém, com exceção das cinzas das folhas e dos cavacos, as outras tiveram uma perda de massa considerável onde não deveriam ter. As cinzas dos cavacos e das folhas são as que apresentam maior perda de massa no aquecimento, chegando até 76 e 77% da massa inicial respectivamente. Enquanto as cinzas dos galhos se reduziram à 88% de sua

Tabela 4.10: Comparação do teor de voláteis determinado a partir da TGA e da análise imediata (% massa, b.s.).

Amostra	TGA	Análise Imediata
Folhas do dia	75,1	80,1
Casca do dia	74,5	80,4
Galhos do dia	81,9	84,3
Cavacos	85,3	87,4
Lodo orgânico	58,5	64,7

massa, e tanto as das cascas quanto as do lodo orgânico a 93%. Nas figuras A.6-A.10 e A.20-A.24 do Apêndice A são apresentados os gráficos das análises térmicas das cinzas. Pela grande perda de massa sofrida pelas cinzas das folhas, junto com seu elevado teor de cinzas em relação ao teor de cinzas dos cavacos, estima-se que as cinzas das folhas podem ter um impacto ou influencia maior nas tubulações da caldeira, já que na fase gasosa os elementos que compõem as cinzas são mais nocivos do que na fase sólida.

Assim como nas biomassas, as Figuras A.25, A.26, A.27 e A.28 apresentam gráficos comparativos de cada uma das análises (TGA, DTG, DSC e dDSC) entre as diferentes amostras de cinzas. Os picos na DTG de todas as amostras têm associados variações na DSC (ou dDSC) o que denota a ocorrência da volatilização de algum composto das cinzas. Porém, não são constatados variações na DSC (ou dDSC) sem variação de massa, caso isso ocorresse seria pela fusão das cinzas ou mudanças na estrutura dela. Destaca-se que em todas as cinzas, com exceção das do lodo orgânico, são constatados dois picos na DTG nas faixas de temperaturas de 650 a 750°C e de 750 a 900°C. Como vai ser discutido na próxima seção (Análise elementar das cinzas), as cinzas estão compostas principalmente por *Ca* e o carbonato de cálcio ( $CaCO_3$ ) calcina-se aos 840°C, liberando  $CO_2$ . Este fenômeno pode estar ligado ao segundo pico mencionado (ARVELAKIS; JENSEN; DAM-JOHANSEN, 2004).

### **Análise elementar das cinzas**

Os elementos como os metais alcalinos (*Na* e *K*), alcalinos terrosos (*Mg* e *Ca*), silício (*Si*), enxofre (*S*) e cloro (*Cl*), são os menos desejados na composição elementar das cinzas, desde que são os principais contribuintes para a ocorrência de *fouling*, *slagging* e a corrosão.

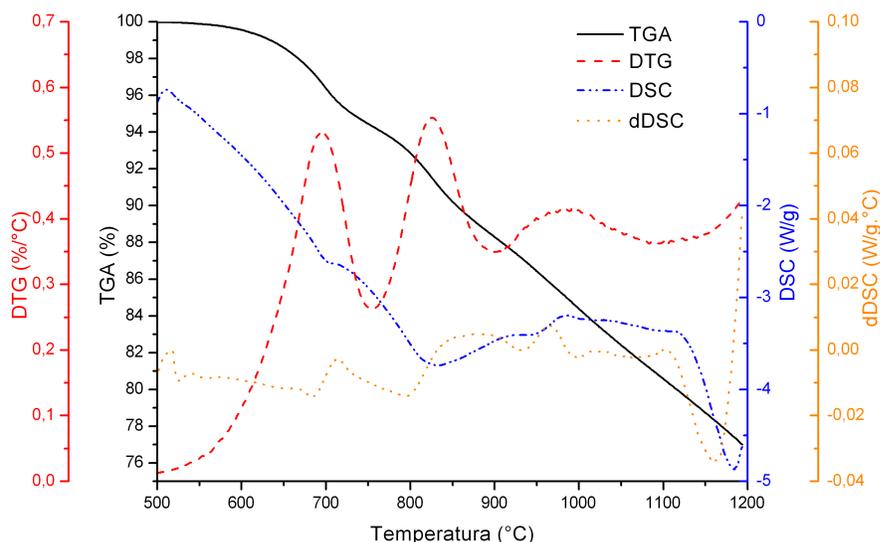


Figura 4.9: Análises térmicas das cinzas das folhas.

A análise EDS dá como resultado a composição elementar da amostra, porém, as vezes é preferível trabalhar com a composição elementar das cinzas na forma de óxidos. Assim, nas Tabelas 4.11 e 4.12 são apresentadas as porcentagens em massa de cada elemento para cada amostra na forma de elemento sozinho e na forma dos principais óxidos respectivamente. Foram identificados os elementos *Na*, *Mg*, *Al*, *Si*, *P*, *S*, *Cl*, *K*, *Ca*, *Ti*, *Mn*, *Fe* e estimados os principais óxidos  $Na_2O$ ,  $MgO$ ,  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $P_2O_5$ ,  $SO_3$ ,  $ClO_2$ ,  $K_2O$ ,  $CaO$ ,  $TiO_2$ ,  $MnO_2$ ,  $Fe_2O_3$ .

Observando a composição de cada amostra, destaca-se que as biomassas pesquisadas estão compostas principalmente pelo *K* e *Ca* com exceção do lodo orgânico o qual quase não apresenta conteúdo de *K*. Em menor medida encontra-se o *Mg*, seguido do *P* e *Na*. Os outros elementos têm uma representação menos significativa.

O cloro, o qual influencia fortemente na corrosão das tubulações, encontrou-se principalmente nas cinzas das folhas, casca, cascas+lascas e no lodo orgânico. Destaca-se uma grande queda na concentração de *Cl* tanto nas folhas quanto na casca com o passar do tempo destas biomassas à intempérie, fato que já foi observado na composição elementar das biomassas e que seria positivo na hora de queimar estes materiais.

Dentro dos metais alcalinos, *Na* tem uma representação entre 4 e 6% em massa das cinzas das folhas, galhos, pontas, cavacos e finos. Em menor medida, 2% aproximadamente, encontra-se

Tabela 4.11: Análise elementar das cinzas (% massa).

Amostra	<i>Na</i>	<i>Mg</i>	<i>Al</i>	<i>Si</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>Cl</i>	<i>K</i>	<i>Ca</i>	<i>Ti</i>	<i>Mn</i>	<i>Fe</i>
F.0d	4,19	8,93	1,20	1,77	5,42	1,55	4,59	43,72	24,35	0	3,39	0,90
F.32d	4,98	9,49	1,12	1,83	5,56	1,76	0,80	41,46	30,29	0	1,43	1,27
F.94d	1,73	9,19	1,45	2,16	5,11	2,14	0	15,06	61,30	0	0,76	1,09
C.0d	2,10	8,19	7,89	0,41	1,59	0,71	3,50	12,40	62,49	0	0,73	0
C.32d	1,15	9,46	0	0	1,53	0,40	0	5,75	81,21	0	0,49	0
C.94d	0,91	4,72	2,05	0,44	1,47	0,37	0	3,74	85,91	0	0,40	0
G.0d	3,40	8,86	10,32	0,55	2,94	1,01	0	27,16	43,27	0	2,50	0
G.32d	4,37	15,65	1,00	3,07	8,10	1,27	0	34,64	29,68	0,42	0,85	0,95
G.94d	3,12	11,29	0,64	0,64	4,17	1,30	0	14,97	63,07	0	0,81	0
P.0d	4,31	6,79	0,95	0,93	7,05	1,24	0	55,89	19,59	0	2,57	0,67
P.32d	6,11	17,66	0	0	6,33	1,32	0	35,72	31,82	0	1,03	0
Cav.	6,02	5,76	1,09	1,25	4,48	2,21	0	34,28	43,03	0	0,78	1,09
Finos	4,76	9,66	5,63	5,00	4,05	1,72	0	17,65	46,53	0,40	1,32	3,28
C + L	2,38	11,85	0,63	0,45	4,26	1,35	0,73	14,46	62,81	0	1,08	0
Lodo	1,64	2,05	8,07	7,62	1,90	1,96	1,14	0,39	72,06	0	0,56	2,61

nas cascas e no lodo orgânico. Sua porcentagem se mantém constante ou diminui levemente com a exposição do material ao ambiente. O outro metal alcalino identificado, o *K*, é o material que apresenta a maior queda percentual ligado a degradação ou lixiviação da biomassa. As cinzas de casca são as quem têm menor parcela de *K*, começando com 12% e chegando até menos que 4%. As folhas tiveram uma redução desde quase 44 até 15% nos 94 dias de exposição da biomassa. Fatos similares ocorrem nos galhos e pontas.

O cálcio, um dos principais elementos que compõe as cinzas destas biomassas, aumenta sua porcentagem assim que os dias passam, então estima-se que o cálcio é o elemento que volta ao solo com maior dificuldade. São as cascas e o lodo orgânico as biomassas com maior teor de *Ca* nas suas cinzas. O outro metal alcalino terroso, o magnésio, encontra-se na faixa de 5 a 15% aproximadamente para todas as biomassas, com poucas mudanças na porcentagem nas diferentes etapas de colheita, porém, como o total das cinzas diminuiu, a quantidade de *Mg* teve que ter diminuído também.

O enxofre encontra-se com um teor menor ou igual do que 2% para todas as amostras, sendo a casca quem tem menor porcentagem. Não é observada uma tendência marcante de aumento ou diminuição do teor de *S* com a degradação ou lixiviação da biomassa. Assim, contrariamente ao

ocorrido com o cloro, em princípio o enxofre é difícil de eliminar.

Quanto ao silício, foi nas cinzas do lodo orgânico onde apresentou maior teor, com quase 8%. No resto das biomassas, e sem considerar os finos já que o resultado obtido para estes é um pouco anômalo em comparação aos outros, o teor de  $Si$  é menor que 2%, onde as cinzas das folhas são as que têm de maior concentração deste elemento.

O fósforo, teve uma participação menor na casca e no lodo orgânico do que nas outras biomassas, sendo menor do que 2% para as primeiras, um pouco acima de 5% nas folhas, 4% para os cavacos e finos, e por volta de 7% para os galhos e pontas.

O resto de elementos tiveram uma representação menor na composição das cinzas, onde  $Al$  foi identificado principalmente no lodo orgânico e nas cascas, onde caiu sua concentração com o passar do tempo.  $Mn$ , com porcentagens baixas, também reduz sua presença ao passar dos dias. Finalmente o  $Fe$  e  $Ti$  apresentam simples traços.

Comparado com outras biomassas (Tabela 4.12), encontra-se uma grande diferença na composição entre as cinzas das diferentes frações do eucalipto e as cinzas de outras biomassas como as do bagaço de cana de açúcar, madeira de pinus e casca de arroz. Esta diferença nota-se principalmente no teor de  $SiO_2$ , sendo este o principal óxido nas outras biomassas mencionadas (43%, 68% e 91%, respectivamente) e com uma representação abaixo de 10% nas biomassas deste trabalho. Os óxidos  $K_2O$  e  $CaO$ , sendo os preponderantes nas cinzas do eucalipto, encontram-se em um segundo grau nas cinzas de estas outras biomassas. Assim o teor de estes dois óxidos são 14 e 13% no bagaço, 4 e 8% no pinus e 4 e 3% na casca de arroz. Outras biomassas como a madeira de salgueiro e álamo, geram cinzas com uma composição elementar bem mais similar às cinzas do eucalipto, onde os óxidos  $K_2O$  e  $CaO$  são os predominantes (15 e 41% nas cinzas do salgueiro; 10 e 50% nas cinzas do álamo) e o teor de  $SiO_2$  encontra-se em um nível inferior (2,4 e 5,9%, respectivamente).

Para intentar predizer a ocorrência de fenômenos como as deposições e a aglomeração foram calculados três índices baseados na composição das cinzas ( $AI$ ,  $R_{b/a}$  e  $BAI$ ). Na Tabela 4.13 encontram-se os resultados dos cálculos destes índices para cada amostra.

Segundo estes índices, a combustão de todas as biomassas em questão são propensas à formação de *fouling*, *slagging* e/ou aglomeração. Em relação a este último fenômeno, a aglomeração em leitos fluidizados, somente o lodo orgânico não teria tendência a acontecer, desde que os valores

Tabela 4.12: Análise elementar das cinzas - Principais óxidos (% massa).

Amostra	$Na_2O$	$MgO$	$Al_2O_3$	$SiO_2$	$P_2O_5$	$SO_3$	$ClO_2$	$K_2O$	$CaO$	$TiO_2$	$MnO_2$	$Fe_2O_3$
F.0d	3,87	10,13	1,55	2,59	8,49	2,65	5,97	36,03	23,31	0	3,67	1,75
F.32d	4,62	10,83	1,45	2,69	8,76	3,03	1,05	34,35	29,15	0	1,56	2,51
F.94d	1,56	10,15	1,82	3,08	7,79	3,55	0	12,08	57,09	0	0,80	2,08
C.0d	1,92	9,19	10,09	0,59	2,46	1,20	4,50	10,11	59,17	0	0,78	0
C.32d	1,08	10,97	0	0	2,45	0,71	0	4,84	79,41	0	0,55	0,00
C.94d	0,85	5,46	2,69	0,66	2,34	0,65	0	3,14	83,77	0	0,44	0
G.0d	3,13	10,03	13,32	0,80	4,59	1,72	0	22,35	41,35	0	2,70	0
G.32d	3,92	17,29	1,25	4,38	12,36	2,12	0	27,81	27,67	0,47	0,89	1,82
G.94d	2,88	12,84	0,83	0,94	6,55	2,23	0	12,36	60,50	0	0,88	0,00
P.0d	4,13	8,00	1,28	1,41	11,47	2,20	0	47,80	19,46	0	2,89	1,36
P.32d	5,70	20,27	0	0	10,03	2,27	0	29,78	30,81	0	1,13	0
Cavacos	5,63	6,63	1,43	1,86	7,12	3,84	0	28,67	41,79	0	0,86	2,18
Finos	4,12	10,28	6,83	6,86	5,95	2,75	0	13,64	41,78	0,42	1,34	6,03
C + L	2,19	13,42	0,81	0,66	6,66	2,30	0,94	11,89	59,97	0	1,16	0
Lodo	1,40	2,15	9,63	10,30	2,75	3,10	1,37	0,30	63,72	0	0,56	4,73
Bagaço(*)	0,20	6,70	7,0	43,01	5,82	1,68	-	14,14	12,75	1,53	0,63	5,23
C. Arroz (**)	0,21	< 0,01	0,78	91,42	0,43	0,72	-	3,71	3,21	0,02	-	0,14
Pinus (***)	1,19	2,42	7	67,84	1,55	1,18	-	4,49	7,85	0,55	-	5,42
Salgueiro (**)	0,94	2,47	1,43	2,35	7,40	1,83	-	15,0	41,20	0,05	-	0,73
Álamo (**)	0,13	18,40	0,84	5,90	1,34	2,04	-	9,64	49,92	0,30	-	1,40

(\*) (BIZZO et al., 2014); (\*\*) (JENKINS et al., 1998); (\*\*\*) (MASIÁ et al., 2007)

Tabela 4.13: Índices de ocorrência de deposição de cinzas.

Amostra	$AI(kg.GJ^{-1})$	$R_{b/a}$	$BAI$
Folhas do dia	0,61	18,1	0,44
Folhas 32 dias	0,45	19,6	0,064
Folhas 94 dias	0,17	16,9	0,153
Casca do dia	0,32	7,5	0
Casca 32 dias	0,17	$\infty$	0
Casca 94 dias	0,09	27,8	0
Galhos do dia	0,12	5,4	0
Galhos 32 dias	0,19	12,9	0,057
Galhos 94 dias	0,06	50,3	0
Pontas do dia	0,08	30,0	0,026
Pontas 32 dias	0,13	$\infty$	0
Cavacos	0,06	25,8	0,063
Finos	0,01	5,4	0,339
Casca + Lascas	0,14	59,7	0
Lodo Orgânico	0,48	3,6	2,792

do índice  $BAI$  é menor para todas as outras biomassas. A formação de *fouling* e/ou *slagging* seria muito provável nas folhas e casca, tendência que se reduziria com o passar do tempo do material no campo já que o valor do  $AI$  se reduz passando a valores onde poderia não ocorrer (0,17 e 0,09  $kg.GJ^{-1}$  para as folhas e casca respectivamente). Observando o  $AI$ , os galhos, pontas, cavacos, finos e cascas+lascas, poderiam não ocasionar *fouling* e/ou *slagging*. Porém, a ocorrência de algum ou os dois fenômenos na combustão do lodo orgânico seria quase um fato. Existem inconsistências entre os resultados do  $AI$  e  $R_{b/a}$ , conseqüentemente, estes resultados devem ser tomados unicamente como uma primeira estimativa.

## 4.2 Potencial energético

Para estimar a energia elétrica que pode ser gerada a partir dos resíduos florestais e da indústria de papel e celulose foi empregado o método descrito na seção 3.3, começando pela estequiometria da combustão e resolvendo o balanço térmico da caldeira, para logo depois fazer o cálculo do potencial energético.

### Resíduos do campo

Na Tabela 4.14 são apresentados alguns dados empregados para resolver a estequiometria da combustão como a composição elementar e o excesso de ar, e outros dados (ou resultados) para resolver o balanço térmico como o poder calorífico, o fluxo em massa dos gases de combustão e a eficiência da combustão. O resultado mais importante desta tabela é a energia recuperada na caldeira ( $Q_{cald}$ ), a qual é empregado para o cálculo da geração de energia elétrica.

Da estequiometria da combustão observa-se que o requerimento de ar e a subseqüentemente geração de gases de combustão, varia de uma biomassa para a outra segundo o teor de carbono de cada uma, já que o teor de hidrogênio não apresenta grandes variações. Assim, são as folhas as que necessitam de maior quantidade de agente oxidante para conseguir uma boa combustão, seguidas pelas pontas, galhos e por último a casca. Considerando uma temperatura de saída dos gases de combustão igual para todas as biomassa ( $180^{\circ}C$ ), e visto que as composições dos gases não variam fortemente, quanto maior for o fluxo de gás por unidade de combustível, maiores são as perdas de energia pelos gases de exaustão.

Tabela 4.14: Dados e resultados da estequiometria e do balanço térmico da caldeira para os resíduos do campo.

	Folhas		Casca		Galhos		Pontas	
	L. Fluid.	L. Fixo						
<i>C</i> (% b.s.)	54,9		47,5		52,2		52,9	
<i>H</i> (% b.s.)	5,9		5,5		5,9		6,1	
<i>O</i> (% b.s.)	35,8		42,7		41,0		40,6	
<i>N</i> (% b.s.)	0,8		0,2		0		0	
<i>S</i> (% b.s.)	0,2		0,1		0,1		0,1	
<i>Cinzas</i> (% b.s.)	2,4		4,0		0,8		0,3	
<i>Excesso ar</i> (%)	25	40	25	40	25	40	25	40
$G_{ngh}$ ( $kg_{gas} \cdot kg_{fuel}^{-1}$ )	9,5	10,5	7,9	8,7	8,8	9,8	9,0	10,0
<i>PCS</i> ( $MJ \cdot kg^{-1}$ )	21,0		17,1		19,3		19,2	
$\eta_{comb}$ (%)	98	92	98	92	98	92	98	92
$G_{v.s.}$ ( $kg_{vapor} \cdot kg_{fuel}^{-1}$ )	5,5	5,0	4,4	4,0	5,0	4,6	4,9	4,5
$Q_{cald}$ ( $MJ \cdot kg_{fuel}^{-1}$ )	16,6	15,2	13,2	12,1	15,1	13,8	14,9	13,6

Do balanço térmico destaca-se que as folhas, sendo as que têm maior poder calorífico, são as que conseguem gerar maior quantidade de energia na caldeira por unidade de massa de combustível, seguidas dos galhos, pontas e da casca. Comparando os resultados entre as caldeiras de leito fluidizado e leito fixo, as primeiras conseguem produzir quase 10% a mais do que as segundas.

Quanto à eficiência da caldeira e das perdas de energia, estas foram calculadas tomando como base o PCS e o PCI. Os resultados encontram-se na Tabela 4.15. Segundo o PCS, as eficiências são de 77~79% para as caldeiras equipadas com fornalha de leito fluidizado e de 71~73% para as de leito fixo. Caso o cálculo seja feito com o PCI, estas ascendem a 86~87% e 79~80% segundo seja leito fluidizado ou fixo respectivamente. Estes resultados são compatíveis com os dados levantados na bibliografia na seção 2.4.3. Do mesmo jeito ao acontecido com a energia da caldeira, as folhas são as que têm maior eficiência, seguidas dos galhos, pontas e cascas.

Identificam-se as perdas de energia como as perdas pela entalpia dos gases de combustão (*Gases*)<sup>1</sup>, perdas pela umidade do combustível (calor latente e sensível), perdas pelo calor sensível da água formada na combustão ( $9H$ ) e as perdas pela combustão incompleta e pela transferência de calor ao ambiente. Nas fornalhas de leito fluidizado a maior perda de energia é pela entalpia dos gases. Esta pode ser reduzida diminuindo principalmente a temperatura dos gases de exaustão

<sup>1</sup>Estes gases não incluem a umidade do combustível.

Tabela 4.15: Eficiência térmica da caldeira para os resíduos do campo (%).

	Folhas		Casca		Galhos		Pontas	
	L. Fluid.	L. Fixo						
$\eta_{cald}^{PCS}$	79,2	72,6	77,4	70,8	78,3	71,7	77,7	71,1
<i>Gases</i>	7,5	8,2	7,6	8,4	7,6	8,3	7,8	8,6
<i>Umidade<sub>latente</sub></i>	2,9	2,9	3,6	3,6	3,2	3,2	3,2	3,2
<i>Umidade<sub>sensível</sub></i>	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
<i>9H</i>	6,2	6,2	7,1	7,1	6,7	6,7	7,0	7,0
$\eta_{comb} \times \eta_{T.C.}$	4,0	9,8	4,0	9,8	4,0	9,8	4,0	9,8
$\eta_{cald}^{PCI}$	87,1	79,8	86,6	79,2	86,9	79,5	86,6	79,1
<i>Gases</i>	8,2	9,0	8,5	9,4	8,4	9,2	8,7	9,6
<i>Umidade<sub>sensível</sub></i>	0,3	0,3	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3
$\eta_{comb} \times \eta_{T.C.}$	4,4	10,8	4,4	11,0	4,4	10,9	4,4	11,0

e/ou o excesso de ar empregado. Para o cálculo foi estimada uma temperatura de saída de 180°C a qual é difícil reduzir e um excesso de 25% o qual poderia ser menor mas com a contrapartida de obter uma combustão pior ( $\eta_{comb}$  menor). A segunda maior perda é devida ao calor latente da água formada na combustão, energia que não pode ser aproveitada quando a temperatura dos gases é maior do que 100°C. As perdas pela combustão incompleta e pela transferência de calor ao ambiente encontram-se no terceiro lugar. Por último, a umidade do combustível, e principalmente o calor latente, representa a menor perda de energia na caldeira. Deve-se notar que foi considerado o combustível com 20% de umidade em base úmida, caso este valor seja maior, suas perdas associadas também serão maiores.

Para as fornalhas de leito fixo, observa-se como as perdas mais importantes são as devidas à combustão incompleta e transferência de calor. Isto é devido à eficiência de combustão considerado para este tipo de fornalhas, o que deixa em evidência a importância de conseguir uma boa combustão. Desde que neste tipo de fornalhas foi considerado um maior excesso de ar do que para as de leito fluidizado, as perdas pela entalpia dos gases é ainda maior, sendo entre 0,7 e 0,9% maiores nas de leito fixo do que nas de leito fluidizado.

A partir dos resultados da energia obtida na caldeira ( $Q_{cald}$ ) e empregando os resultados da Tabela 3.3 de geração de resíduos de campo a partir da produtividade das florestas da empresa, calcula-se a energia elétrica e o potencial elétrico por hectare segundo as equações 3.5 e 3.6. Na Tabela 4.16 apresenta-se estes resultados para cada fração de resíduo florestal.

Tabela 4.16: Geração de energia e potência elétrica por hectare.

	$\dot{M}$ ( $kg.ha^{-1}.ano^{-1}$ )	$W'_e$ ( $MJ.ha^{-1}.ano^{-1}$ )		$\dot{W}'_e$ ( $W.ha^{-1}.ano^{-1}$ )	
		L. Fluid.	L. Fixo	L. Fluid.	L. Fixo
Folhas	1.086	5.860	5.370	219	200
Casca	2.849	12.240	11.190	456	417
Galhos	1.950	9.560	8.750	357	326
Pontas	1.572	7.590	6.940	283	259
Total	7.457	35.240	32.240	1.315	1.203

Dos resultados destaca-se que empregando a totalidade dos resíduos florestais de um hectare, é possível obter uma potência elétrica de mais de 1  $kW$  (1.315 e 1.203  $W.ha^{-1}$  no leito fluidizado e fixo, respectivamente). A casca é quem tem maior potencial energético com 34,7% do total, logo depois os galhos (27,1%), pontas (21,5%) e as folhas (16,7%). Sendo a casca o resíduo que tem menor poder calorífico, o qual conduz em uma menor geração de energia na caldeira por unidade de massa, isto é compensado pelo fato de ser a fração com maior porcentagem em massa, e assim a biomassa com maior potencial energético entre os resíduos do campo.

Do mesmo jeito como foi calculada a quantidade de resíduos gerados no campo ( $\dot{M}$ ) com a produtividade das florestas da empresa, pode ser calculada a geração de biomassa para os diferentes estados do Brasil. Considerando as áreas plantadas com florestas de eucalipto destinadas à produção de papel e celulose de cada estado, estima-se o potencial energético de cada estado.

Na Tabela 4.17 são apresentados dados das florestas de eucalipto para celulose nos diferentes estados como a produtividade de madeira com casca ( $Prod. c.c.$ ) e a superfície de florestas ( $Sup$ ), a geração total de resíduos por hectare ( $\dot{M}$ ), a potência elétrica por hectare ( $\dot{W}'_e$ ), a potência elétrica considerando a superfície dos cultivos de cada estado ( $\dot{W}_e$ ) e a energia elétrica que pode ser gerada a partir da combustão dos resíduos florestais ( $W_e$ ). Para os cálculos energéticos foi levado em conta somente a metade da biomassa gerada no campo, ou seja, foi considerado que a metade do material é deixado no campo. Isto é devido às limitações técnicas da colheita dos resíduos como foi mencionado na seção 2.2.3 e/ou para evitar o impacto ambiental adverso que a retirada deste material tem associado.

Como principais resultados observa-se que os estados de Bahia e São Paulo são os dois com

maior potencial energético, representando mais da metade do total (130~142 e 120~131  $ktep.ano^{-1}$  respectivamente). A Bahia é o estado com maior área plantada e uma produtividade elevada e São Paulo apresenta uma área plantada um pouco menor mas com uma produtividade maior. Sob as hipóteses tomadas neste trabalho, no Brasil é possível gerar mais de 500  $ktep.ano^{-1}$  de energia elétrica utilizando a metade dos resíduos florestais<sup>2</sup> em um sistema com caldeira de leito fluidizado e ciclo Rankine. Caso a caldeira seja de leito fixo, esse valor se reduz a 475  $ktep.ano^{-1}$ . A potência elétrica média estaria na faixa de 700 a 775 MW. Note-se que estes resultados são para a mistura de todos os resíduos do campo, a porcentagem que aporta cada um deles é a mesma mencionada anteriormente, sendo casca 34,7%, galhos 27,1%, pontas 21,5% e folhas 16,7%. Como ponto de comparação podemos tomar o consumo de energia elétrica do setor residencial brasileiro e das indústrias de papel e celulose. Segundo dados do Ministério de Minas e Energia, no ano 2012, o setor residencial teve um consumo de 10.118  $ktep$  durante o ano todo e as indústrias de papel e celulose de 1.682  $ktep$ . Assim, com os resíduos de campo poderia ser suprido um 5% do consumo residencial ou 30% do consumo do setor industrial considerado.

O estado de Pará, por ser o estado com as florestas de maior produtividade média (53,1  $m^3.ha^{-1}.ano^{-1}$  com casca), é quem tem maior geração de resíduos e um potencial energético por hectare maior (580~635  $W.ha^{-1}$ ). Porém, sua área plantada (112 mil ha) não é das maiores do Brasil. Assim, poderiam ser gerados entre 42 e 45  $ktep.ano^{-1}$  de eletricidade por ano.

A mesma metodologia foi aplicada ao caso das florestas de eucalipto para celulose no Uruguai, onde no ano 2012 foram explorados 6.126 mil  $m^3$  de madeira em tora com casca. Sob as mesmas hipóteses que nos cálculos anteriores, no Uruguai podem ser gerados entre 43 e 47  $ktep.ano^{-1}$  (de 67 a 73 MW) de energia elétrica empregando só a metade da biomassa residual gerada no campo. Esse potencial energético representa 15% do consumo elétrico residencial do país ou 22% do consumo de todo o setor industrial.

### **Resíduos da fábrica**

Com os dados da geração de resíduos de biomassa úmida na produção de papel e celulose apresentados na Tabela 3.4 e considerando uma umidade de 40% em base úmida para o lodo orgânico e de 30% (b.u.) para o resto das biomassas (finos, casca + lascas e “overs”), estima-se

---

<sup>2</sup>Resíduos florestais unicamente de florestas de eucalipto destinadas à produção de papel e celulose.

Tabela 4.17: Potencial energético dos estados do Brasil a partir da utilização de 50% dos resíduos de campo.

EST.	<i>Prod. c.c.</i> $m^3 \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}$	$\dot{M}$ $kg \cdot ano^{-1} \cdot ha^{-1}$	<i>Sup</i> $10^3 ha$	Leito Fluidizado			Leito Fixo		
				$\dot{W}'_e$ $W \cdot ha^{-1}$	$\dot{W}_e$ <i>MW</i>	$W_e$ <i>ktep</i>	$\dot{W}'_e$ $W \cdot ha^{-1}$	$\dot{W}_e$ <i>MW</i>	$W_e$ <i>ktep</i>
AP	35,0	4.745	12	418	5,0	3,2	383	4,6	2,9
BA	42,2	5.271	439	504	221,4	142	461	202,6	130
ES	40,3	5.464	136	482	65,5	41,9	441	59,9	38,4
MT	49,3	6.684	1	589	0,6	0,4	539	0,5	0,3
MS	40,1	5.437	158	479	75,7	48,5	438	69,3	44,4
MG	39,1	5.301	200	467	93,5	59,8	428	85,5	54,7
PA	27,0	3.660	49	323	15,8	10,1	295	14,5	9,3
PR	53,1	7.199	112	635	71,1	45,5	581	65,0	41,6
RS	22,9	3.105	189	274	51,7	33,1	250	47,3	30,3
SC	35,4	4.799	17	423	7,2	4,6	387	6,6	4,2
SP	46,0	6.236	371	550	204,0	131	503	186,6	120

o potencial energético que poderia ser produzido na fábrica da empresa em questão a partir dos resíduos de sua própria produção.

Resolvendo a estequiometria da combustão e o balanço energético sob as mesmas hipóteses que para os resíduos do campo, se obtém a energia que pode ser aproveitada na caldeira, ou seja, o potencial térmico destas biomassas por unidade de massa e o total por ano para cada um, levando em conta a geração de resíduos. Considerando o mesmo ciclo termodinâmico antes descrito, é calculado o potencial de energia elétrica. Estes resultados são apresentados na Tabela 4.18, discretizando pelo tipo de resíduo<sup>3</sup>.

Os finos constituem o resíduo com maior potencial energético, térmico e elétrico. Isto é devido a combinação de ser a biomassa que apresenta melhores propriedades como combustível, junto com os “overs”, e a grande quantidade em massa que este resíduo é gerado. Assim, empregando essa biomassa pode ser gerado  $2,5 \sim 2,7 \text{ ktep} \cdot \text{ano}^{-1}$  de energia elétrica com uma potência de  $3,9 \sim 4,2 \text{ MW}$  dependendo da tecnologia utilizada. Os “overs”, com propriedades muito similares, atingem um potencial menor desde que é gerado quase 6 vezes menos do que os finos. A mistura de cascas e lascas é o segundo resíduo com maior potencial, sendo gerados um pouco menos que os finos e com uma geração de calor por massa na caldeira um pouco menor.

<sup>3</sup>A composição elementar dos “overs” foi estimada igual à composição elementar dos cavacos.

Tabela 4.18: Potencial energético dos resíduos da fabricação de papel e celulose.

	Finos	Casca + Lascas	“Overs”	Lodo Orgânico	Total
$\dot{M}$ ( $10^6$ $kg_{umido.ano^{-1}}$ )	34	30	6,0	48	118
Umidade (% b.u.)	30	30	30	40	-
$\dot{M}$ ( $10^6$ $kg_{seco.ano^{-1}}$ )	24	21	4,2	28	78
L. Fluid.					
$Q_{cald}$ ( $MJ.kg_{fuel}^{-1}$ )	14,7	13,8	14,4	7,5	50,4
$\eta_{cald}^{PCS}$	75,9	75,4	75,6	64,3	-
$\eta_{cald}^{PCI}$	86,4	86,2	86,2	81,7	-
$W_t$ ( $ktep.ano^{-1}$ )	8,3	6,9	1,4	5,1	21,8
$W_e$ ( $ktep.ano^{-1}$ )	2,7	2,2	0,5	1,7	7,1
$\dot{W}_e$ (MW)	4,2	3,5	0,7	2,6	11,1
L. Fixo					
$Q_{cald}$ ( $MJ.kg_{fuel}^{-1}$ )	13,4	12,6	13,1	6,7	45,8
$\eta_{cald}^{PCS}$	69,3	68,7	69,0	57,6	-
$\eta_{cald}^{PCI}$	78,9	78,6	78,6	73,1	-
$W_t$ ( $ktep.ano^{-1}$ )	7,6	6,3	1,3	4,6	19,8
$W_e$ ( $ktep.ano^{-1}$ )	2,5	2,0	0,4	1,5	6,4
$\dot{W}_e$ (MW)	3,9	3,2	0,7	2,3	10,0

Quanto ao lodo orgânico, este é o resíduo maioritariamente gerado, tanto úmido quanto seco. Porém, suas propriedades como combustível não são boas, o que acaba refletindo em uma produção de energia térmica na caldeira de  $6,7\sim 7,5$   $kJ.kg_{fuel}^{-1}$  e uma energia elétrica de  $1,5\sim 1,7$   $ktep$  ( $2,3\sim 2,6$  MW). Os cálculos no balanço energético na caldeira para esta biomassa foram feitos com uma umidade de 40% (b.u.), mas a umidade determinada *in natura* foi de 80% (b.u.). Caso seja empregado este resíduo com a umidade determinada inicialmente, o balanço energético seria nulo. Ou seja, com uma umidade de 80% (b.u.) o poder calorífico inferior é zero, a energia liberada na oxidação do carbono e do hidrogênio é apenas suficiente para evaporar toda a água que o resíduo tem. Assim, é necessária uma redução da umidade para empregar esta biomassa com fins energéticos.

A eficiência da caldeira é muito similar quando é empregado como combustível os finos, os “overs” ou as cascas+lascas. Assim a eficiência chega até  $75\sim 76\%$  segundo o PCS e  $86\%$  segundo o PCI nas fornalhas de leito fluidizado. Estes valores diminuem a 69 e 79% quando a combustão é realizada em fornalhas de leito fixo. Na combustão do lodo orgânico são obtidas eficiências menores, sendo estas 64 e 82% para fornalhas de leito fluidizado segundo o PCS e o PCI respectivamente, e 58 e 73% para as fornalhas de leito fixo.



## 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Este trabalho de pesquisa teve como foco de estudo os resíduos de biomassa relacionados com a cadeia produtiva de papel e celulose. Estas biomassas foram os resíduos florestais oriundos da exploração florestal (folhas, casca, galhos e pontas) e resíduos gerados na indústria (finos, “overs”, casca+lascas e lodo orgânico). Estas biomassas foram caracterizadas como combustíveis e também foi estimado o potencial de energia elétrica que poderia ser gerado a partir da combustão dos resíduos de biomassa e utilização de um ciclo Rankine com vapor de água.

A partir das análises realizadas na caracterização das biomassas podem ser levantadas as seguintes conclusões:

- O teor de umidade *in natura* das biomassas florestais geradas o dia da exploração florestal é muito elevada (cascas  $\sim 60\%$ ; folhas e pontas  $\sim 50\%$ ; galhos  $\sim 40\%$  - b.u.) para o emprego destes materiais como combustível, sendo necessária uma desidratação previa do material. Segundo o constatado, sob as condições ambientais as quais esteve exposto o material, a permanência da biomassa no campo durante 32 dias reduz o teor de umidade até  $5\sim 8\%$  o qual se manteve nas amostras de 94 dias no campo.
- Algumas das propriedades ou características menos desejadas das biomassas, como por exemplo o elevado teor de cinzas, o conteúdo de cloro ou outros elementos potencialmente nocivos, apresentam uma redução com a degradação e/ou lixiviação do material no campo exposto ao ambiente. O teor de cinzas se reduz à  $80\sim 90\%$  do valor original, o cloro diminuiu da ordem de 10 vezes nas folhas, quase 20 vezes nas cascas e a mais da metade nos galhos e nas pontas.
- O PCS não apresenta uma queda muito significativa em relação à primeira etapa de degradação natural do material. Este atingiu os valores máximos nas folhas ( $20\sim 21 \text{ MJ.kg}^{-1}$ ), mínimos nas cascas ( $17 \text{ MJ.kg}^{-1}$ ) e medios para as outras frações da arvore ( $19\sim 19,5 \text{ MJ.kg}^{-1}$ ).
- Em comparação a outras biomassas residuais empregadas comumente como combustível, como o bagaço de cana de açúcar e a casca de arroz, os resíduos florestais têm qualidades muito semelhantes e até melhores para algumas características. Por exemplo no teor de

cinzas onde nas cascas de arroz atinge valores de até 19% e nos resíduos florestais não sobrepassaram 5%. Assim como nos poderes caloríficos, os quais nos resíduos florestais são similares aos resíduos agrícolas ou até maiores em alguns casos.

- Dos resíduos gerados na fábrica, os finos e “overs” têm as mesmas qualidades do que os cavacos, os quais são comumente empregados como combustível, assim o aproveitamento energético destas biomassas não tem problemas notáveis por fora de suas propriedades físicas. A mistura de cascas e lascas têm algumas propriedades não desejáveis, como o teor de cinzas relativamente alto, mas sendo um problema a disposição final deste resíduo da produção, seu emprego como combustível também apresenta-se atraente.
- Quanto ao lodo orgânico, este não tem boas qualidades como combustível, principalmente por sua elevada umidade (80% b.u.), seu elevado teor de cinzas (33% b.s.), cloro e enxofre, e baixo poder calorífico ( $11,6 \text{ MJ.kg}^{-1}$ ). Porém, sua disposição final pode ser um grande problema ambiental.
- As análises térmicas sob atmosfera inerte determinaram uma pirólise muito semelhante entre os galhos e os cavacos. Quanto as cascas e folhas, estas apresentaram diferenças comparadas com os cavacos, as quais podem ser atribuídas ao maior conteúdo de extrativos e/ou lignina. Com exceção do lodo orgânico, a pirólise de todas as biomassas foi puramente endotérmica, com picos associados às faixas de temperatura das perda de massa.
- A composição elementar das cinzas apresentam resultados similares às cinzas do álamo e salgueiro, mas bem diferentes às cinzas produzidas por outras biomassas como o bagaço, as cascas de arroz e a madeira de pinus. As cinzas de eucalipto, álamo e salgueiro quase não têm  $SiO_2$ , sendo o  $CaO$  o principal óxido que as constitui. Enquanto as cinzas do bagaço, a casca de arroz e do pinus apresentam o  $SiO_2$  como o óxido principal. Segundo os indicadores de ocorrência de deposições e/ou aglomerados calculados, a combustão de todas as biomassas em questão são propensas à geração de algum ou vários problemas relacionados à deposições ou aglomeração em fornalhas.

No que concerne aos cálculos realizados para estimar o potencial energético, determinou-se que as folhas são a fração dos resíduos florestais com maior eficiência térmica, seguidas dos galhos, pontas e cascas. Considerando a biomassa com 20% de umidade em base úmida, as principais

perdas de energia são pela entalpia dos gases de exaustão e pela combustão incompleta. Desde que as cascas são a fração com maior porcentagem em massa dos resíduos, é por meio do emprego das cascas pelas quais pode-se gerar maiores quantidades de energia (34,7% do total<sup>1</sup>), seguidas pelos galhos (27,1%), pontas (21,5%) e folhas (16,7%). Com uma floresta de produtividade de  $55 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$ , utilizando a totalidade das cascas, folhas, galhos e pontas geradas na exploração florestal, podem ser gerados entre 1,2 e 1,3  $\text{kW} \cdot \text{ha}^{-1}$ . Os estados de São Paulo e Bahia são os que têm maior potencial no Brasil, desde que têm grandes extensões de florestas destinadas à produção de papel e celulose e com produtividades elevadas. O potencial energético total do país é elevado, podendo suprir 5% do consumo residencial brasileiro empregando a metade da biomassa gerada na exploração florestal. Fazendo a analogia no Uruguai, essa porcentagem aumenta a 15% do consumo elétrico residencial uruguaio.

Quanto aos resíduos da fábrica, estes foram considerados com uma umidade maior, o que resultou numa eficiência térmica na caldeira menor. No entanto, o potencial destas biomassas é elevado, sem considerar o lodo orgânico o qual pode ter um balanço energético nulo se sua umidade é elevada. Em uma fábrica com uma produção de  $670.000 \text{ ton} \cdot \text{ano}^{-1}$  de celulose e  $370.000 \text{ ton} \cdot \text{ano}^{-1}$  de papel, empregando seus resíduos de finos, “overs”, cascas+lascas e o lodo orgânico, podem ser gerados  $7 \text{ ktep} \cdot \text{ano}^{-1}$  (11 MW) de energia elétrica.

A partir deste trabalho de pesquisa, das matérias realizadas durante o mestrado e outras instâncias de aprendizagem, o autor tem como sugestão pesquisar e/ou aprofundar sobre os seguintes tópicos:

- Realizar as análises térmicas às amostras que não foram analisadas por questões de tempo e complementar estas análises realizando-as sob atmosfera oxidante. Assim poderão ser levantados resultados sobre a temperatura de ignição, cinética da combustão, entre outros. Além de comparar os resultados entre as biomassas (e suas cinzas) com diferentes tempo de permanência no campo.
- Aprofundar no estudo da influência das cinzas nas fornalhas, isto inclui a compreensão de como influencia cada elemento e a mistura deles, a temperatura da combustão e a das paredes dos trocadores de calor, metodologias para prever sua ocorrência e mecanismo para mitigar seu impacto. Preparar as cinzas de cada biomassa a diferentes temperaturas.

---

<sup>1</sup>Total gerado a partir dos resíduos florestais

- Melhorar a estimativa da massa de cada fração da árvore com dados mais atuais. Assim o cálculo do potencial energético terá menos incerteza.
- Nota-se uma grande diferença entre as biomassas geradas no campo e as geradas na fábrica em questão de logística do aproveitamento do material, onde as primeiras têm um custo associado a sua colheita e transporte e as segundas as vezes têm um custo associado a sua disposição final. Assim, apresenta-se como interessante a possibilidade de aproveitar os resíduos florestais em geradores de pequena escala e evitar os custos de transporte do material. Estudar sistemas de geração o co-geração de energia elétrica e térmica em pequena escala, otimizando sua eficiência, pode ser uma solução economicamente mais viável para este tipo de combustíveis.
- Otimização da cadeia de exploração florestal incluindo a etapa de colheita total ou parcial dos resíduos, procurando o momento ideal visando a sustentabilidade do solo e procurando as melhores características como combustíveis deste material.
- Estudar outros processos de termo-conversão de biomassa aplicados aos resíduos florestais.

## Referências Bibliográficas

- ABRAF. *Anuário Estatístico 2013 - Ano Base 2012*. Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas,, 2013. Disponível em: <www.abraflor.org.br>.
- ALMEIDA, G.; BRITO, J.; PERRÉ, P. Alterations in energy properties of eucalyptus wood and bark subjected to torrefaction: The potential of mass loss as a synthetic indicator. *Bioresource Technology*, v. 101, p. 9778–9784, 2010.
- ANTÓNIO, N. et al. Effect of tree, stand, and site variables on the allometry of eucalyptus globulus tree biomass. *Canadian Journal of Forest Research*, v. 37, p. 895–906, 2007.
- ARVELAKIS, S.; JENSEN, P. A.; DAM-JOHANSEN, K. Simultaneous thermal analysis (sta) on ash from high-alkali biomass. *Energy and Fuels*, v. 18, p. 1066–1076, 2004.
- ASTM-D1102. *Standard Test Method for Ash in Wood*. [S.l.].
- ASTM-E775. *Standard Test Methods for Total Sulfur in the Analysis Sample of Refuse-Derived Fuel*. [S.l.].
- ASTM-E776. *Standard Test Method for Forms of Chlorine in Refuse-Derived Fuel*. [S.l.].
- ASTM-E777. *Standard Test Method for Carbon and Hydrogen in the Analysis Sample of Refuse-Derived Fuel*. [S.l.].
- ASTM-E778. *Standard Test Methods for Nitrogen in the Analysis Sample of Refuse-Derived Fuel*. [S.l.].
- ASTM-E871. *Standard Test Method for Moisture Analysis of Particulate Wood Fuels*. [S.l.].
- ASTM-E872. *Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis of Particulate Wood Fuels*. [S.l.].
- BALBOA, M. et al. Aprovechamiento de la biomasa forestal producida por la cadena monte-industria. parte ii: Cuantificaciones e implicaciones ambientales. *CIS-Maderas*, 2003.
- BARNETO, A. G.; VILA, C.; ARIZA, J. Eucalyptus kraft pulp production: Thermogravimetry monitoring. *Thermochimica Acta*, v. 520, p. 110–120, 2011.
- BASU, P. Biomass characteristics. In: BASU, P. *Biomass Gasification and Pyrolysis - Practical Design*. [S.l.]: Elsevier Inc., 2010. cap. 2, p. 27–63.
- BERKES. *Tecnologías para el mejor uso de la biomasa y los recursos renovables*. [S.l.], 2010.
- BIZZO, W. A. et al. The generation of residual biomass during the production of bio-ethanol from sugar cane, its characterization and its use in energy production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 29, p. 589–603, 2014.

BRACELPA. Relatório florestal 2010-2011. *Áreas de Estatística e Comunicação Corporativa da Bracelpa*, Associação Brasileira de Celulose e Papel, 2011.

BRACELPA. Associação Brasileira de Celulose e Papel, 2013. Disponível em: <<http://www.bracelpa.org.br/bra2/?q=node/181>>.

BRACELPA. Associação Brasileira de Celulose e Papel, 2013. Disponível em: <[www.bracelpa.org.br](http://www.bracelpa.org.br)>.

BRACELPA. Associação Brasileira de Celulose e Papel, 2013. Disponível em: <<http://www.bracelpa.org.br/bra2/?q=node/134>>.

BRACELPA. *Dados do Setor*. Associação Brasileira de Celulose e Papel, 2013. Disponível em: <<http://www.bracelpa.org.br/bra2/sites/default/files/estatisticas/booklet.pdf>>.

BRACELPA. *Mapa do Setor 2013*. Associação Brasileira de Celulose e Papel, 2013. Disponível em: <[www.bracelpa.org.br](http://www.bracelpa.org.br)>.

BRAUNBECK, O. A.; AES, P. S. G. M.; GARCIA, M. O. Colheita e recuperação da biomassa. In: CORTEZ, L. A. B.; SILVA LORA, E. E.; OLIVARES GÓMEZ, E. *Biomassa para energia*. Campinas - SP, Brasil, 2008. cap. 3, p. 63–92.

BRITO, J. O. et al. Avaliação das características dos resíduos da exploração florestal do eucalipto para fins energéticos. *Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais*, n. 62, 1979.

BRITO, J. O. et al. Chemical composition changes in eucalyptus and pinus woods submitted to heat treatment. *Bioresource Technology*, v. 99, p. 8545–8548, 2008.

CANNEL, M. G. R. Encyclopedia of forest sciences. In: \_\_\_\_\_. [S.l.: s.n.], 2004. cap. Plantation Silviculture: Short Rotation Forestry for Biomass Production, p. 872–877.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. Caracterização da biomassa. In: CORTEZ, L. A. B.; SILVA LORA, E. E.; OLIVARES GÓMEZ, E. *Biomassa para energia*. Campinas - SP, Brasil, 2008. cap. 2, p. 31–62.

COUTO, H. T. Z. D. et al. Quantificação dos resíduos florestais para produção de energia om povoamento de eucalyptus saligna. *Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais*, n. 26, p. 19–23, 1984.

COUTO, L.; MÜLLER, M. D. Florestas energéticas no brasil. In: CORTEZ, L. A. B.; SILVA LORA, E. E.; OLIVARES GÓMEZ, E. *Biomassa para energia*. Campinas - SP, Brasil, 2008. cap. 4, p. 93–111.

ELECTRONUCLEAR. *Caldeiras*. [S.l.], 2008.

EVANS, J. Plantation silviculture: Forest plantation. In: BURLEY, J.; EVANS, J.; YOUNGQUIST, J. A. *Encyclopedia of Forest Sciences*. [S.l.], 2004. p. 822–828.

- FENGEL, D.; WEGENER, G. *WOOD: Chemistry, Ultrastructure and Reactions*. [S.l.: s.n.], 1984.
- GARCÍA, R. et al. Spanish biofuels heating value estimation. part ii: Proximate analysis data. *Fuel*, 2013.
- GELDART, D. Type of gas fluidization. *Powder Technology*, 1973.
- GOMIDE, J. L. et al. Caracterização tecnológica, para produção de celulose, da nova geração de clones de eucalyptus do brasil. *árvore*, v. 29, n. 1, p. 129–137, 2005.
- GUNGOR, A. Simulation of emission performance and combustion efficiency in biomass fired circulating fluidized bed combustors. *Biomass and bio energy*, v. 34, p. 506–514, 2010.
- HE, X. et al. Dry matter losses in combination with gaseous emissions during the storage of forest residues. *Fuel*, v. 95, p. 662–664, 2012.
- HEIDARI, A. et al. Effect of process conditions on product yield and composition of 3 fast pyrolysis of eucalyptus grandis in fluidized bed reactor. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2013.
- HOLMBERG, J. M.; GUSTAVSSON, L. Biomass use in chemical and mechanical pulping with biomass-based energy supply. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 52, p. 331–350, 2007.
- INFRANTE, F. S.; VEIRAS, G. Piñeiro. Aprovechamiento de la biomasa forestal producida por la cadena monte-industria. parte i: Situación actual y evaluación de sistemas de tratamiento. *CIS-Madera*, 2003.
- JENKINS, B. M. et al. Combustion properties of biomass. *Fuel Processing Technology*, v. 54, p. 17–46, 1998.
- KHAN, A. A. et al. Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies. *Fuel Processing Technology*, v. 90, p. 21–50, 2009.
- KITTO, J. B.; STULTZ, S. C. Chemical and heat recovery in the paper industry. In: KITTO, J. B.; STULTZ, S. C. *Steam/Its generation and use*. 41. ed. [S.l.], 2005. cap. 28.
- KITTO, J. B.; STULTZ, S. C. Fuel ash effects on boiler - design and operation. In: KITTO, J. B.; STULTZ, S. C. *Steam/Its generation and use*. 41. ed. [S.l.], 2005. cap. 21.
- KITTO, J. B.; STULTZ, S. C. Stokers. In: KITTO, J. B.; STULTZ, S. C. *Steam/Its generation and use*. 41. ed. [S.l.], 2005. cap. 16.
- KITTO, J. B.; STULTZ, S. C. Wood and biomass installations. In: KITTO, J. B.; STULTZ, S. C. *Steam/Its generation and use*. 41. ed. [S.l.], 2005. cap. 30.
- KOORNNEEF, J.; JUNGINGER, M.; FAAIJ, A. Development of fluidized bed combustion overview of trends, performance and cost. *Progress in Energy and Combustion Science*, v. 33, p. 19–55, 2007.

KUMAR, R. et al. Study of age and height wise variability on calorific value and other fuel properties of eucalyptus hybrid, acacia auriculaeformis and casuarina equisetifolia. *Biomass and Bioenergy*, v. 35, p. 1339–1344, 2011.

MASERA, O. R.; AGUILLÓN, J.; GAMINO, B. *Estimación del recurso y prospectiva tecnológica de la biomasa como energético renovable em México*. [S.l.], 2005.

MASIÁ, A. A. T. et al. Characterising ash of biomass and waste. *Fuel Processing Technology*, v. 88, p. 1071–1081, 2007.

MGAP. *Anuario Estadístico 2012*. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca - Dirección General Forestal - Uruguay, 2013. Disponible em: <<http://www.mgap.gub.uy/portal/hgxpp001.aspx?7,5,659,O,S,0,MNU;E;2;16;10;6;MNU;,www>>.

MICHELSEN, H. P. et al. Deposition and high temperature corrosion in a 10 mw straw fired boiler. *Fuel Processing Technology*, v. 54, p. 95–108, 1998.

MIEM. *Balance Energético 2010*. Ministerio de Industria Energía y Minería, 2011. Disponible em: <<http://www.miem.gub.uy/web/energia/publicaciones-y-estadisticas/planificacion-y-balance/estadisticas>>.

MIEM. *Balance Energético 2012*. Ministerio de Industria Energía y Minería, 2013. Disponible em: <<http://www.miem.gub.uy/web/energia/publicaciones-y-estadisticas/planificacion-y-balance/estadisticas>>.

MME. *Balanço Energético Nacional 2013*. Ministério de Minas e Energia, 2013. Disponible em: <<https://ben.epe.gov.br/BENRelatorioFinal2013.aspx>>.

MONTE, M. C. et al. Waste management from pulp and paper production in the european union. *Waste Management*, v. 29, p. 293–308, 2009.

MORTARI, D. A.; ÁVILA, I.; CRNKOVIC, P. M. Study of thermal decomposition of sugarcane bagasse and ignition temperature of coal/bagasse blends using thermogravimetry. *21 Brazilian Congress of Mechanical Engineering - COBEM*, 2011.

MUSINGUZI, W. B. et al. Thermal characterization of ugandas acacia hockii, combretum molle, eucalyptus grandis and terminalia glaucescens for gasification. *Biomass and Bioenergy*, v. 46, p. 402–408, 2012.

NBR-8633. *Carvão vegetal - Determinação do poder calorífico*. [S.l.].

ORTÍZ L., T. A. V. A. Aprovechamiento de la biomasa forestal producida por la cadena monte-industria. parte iii: Producción de elementos densificados. *CIS-Madera*, p. 17–32, 2003.

PÉREZ-CRUZADO, C. et al. Ecuaciones de biomasa aérea de árbol individual para eucalyptus nitens maid. para el norte de españa. estimacion de los errores cometidos mediante su aplicación a nivel de rodal. *5o Congreso Forestal Español*, 2009.

- PÉREZ, S. et al. Energy evaluation of the eucalyptus globulus and the eucalyptus nitens in the north of spain (cantabria). *Thermochemical Acta*, v. 451, p. 57–64, 2006.
- PÉREZ, S. et al. Energy potential of waste from 10 forest species in the north of spain (cantabria). *Bioresource Technology*, v. 99, p. 6339–6345, 2008.
- ROSENGREN, L. M. Hacia la ordenación responsable de los bosques plantados. *FAO: Departamento Forestal*, 2009.
- SAIDUR, R. et al. A review on biomass as a fuel for boilers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 15, p. 2262–2289, 2011.
- SHREVE, R. N.; JR, J. A. B. *Indústrias de Processos Químicos*. 4. ed. [S.l.: s.n.], 1977.
- SILVA-LORA, E. E.; ZAMPIERI, M. Classificação e balanço térmico das fornalhas para a combustão de biomassa. In: CORTEZ, L. A. B.; SILVA LORA, E. E.; OLIVARES GÓMEZ, E. *Biomassa para energia*. Campinas - SP, Brasil, 2008. cap. 7, p. 155–178.
- SOUZA-SANTOS, M. L.; CHAVEZ, J. V. Preliminary studies on advanced power generation based on combined cycle using a single high-pressure fluidized bed boiler and consuming sugar-cane bagasse. *Fuel*, v. 95, p. 221–225, 2012.
- STENSENG, M. et al. Thermal analysis in combustion research. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, v. 64, p. 1325–1334, 2001.
- TAPPI 222 om-98. [S.l.].
- TAPPI 264 cm-97. [S.l.].
- TAPPI UM 250. [S.l.].
- TURN, S. Q.; KINOSHITA, C. M.; ISHIMURA, D. M. Removal of inorganic constituents of biomass feedstocks by mechanical dewatering and leaching. *Biornass and Bioenergy*, v. 12, p. 241–252, 1997.
- URNS, S. R. *An introduction of combustion: Concepts and applications*. [S.l.: s.n.], 2000.
- VAMVUKA, D.; ZODGRAFOS, D. Predicting the behaviour of ash from agricultural wastes during combustion. *Fuel*, v. 83, p. 2051–2057, 2004.
- VIEGAS-ASSUMPCAO, R. M. et al. Polpação química. In: PHILIPP, P.; OTERO-D' ALMEIDA, M. L. *Celulose e Papel. Vol.1 Tecnologia de Fabricação da Pasta Celulósica*. Campinas - SP, Brasil, 1998. cap. VI, p. 169–320.
- YANG, H. et al. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel*, v. 86, p. 1781–1788, 2007.
- YIM, C.; ROSENDAHL, L. A.; KAER, S. K. Grate-firing of biomass for heat and power production. *Progress in Energy and Combustion Science*, v. 34, p. 725–754, 2008.

ZHANG, X. et al. Experimental investigation and mathematical modelling of wood combustion in a moving grate boiler. *Fuel Processing Technology*, v. 91, p. 1491–1499, 2010.

## A. Análises térmicas

Em este apêndice são apresentados os gráficos correspondentes às análises térmicas realizadas às amostras de biomassa e suas respectivas cinzas. Estas amostras são folhas, cascas, galhos, cavacos e o lodo orgânico. As análises térmicas (TGA e DSC) foram feitas simultaneamente num analisador SDT Q600 no Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol - CTBE - CNPEM. As amostras utilizadas foram de  $10,5 \pm 0,5$  mg e foi empregada uma taxa de aquecimento de  $10$  K/min. As amostras foram analisadas sob atmosfera inerte (nitrogênio) com um fluxo de  $100,0$  ml/min, numa faixa de temperaturas desde o ambiente até  $900^\circ\text{C}$  para as biomassas e de  $500$  até  $1200$  para as cinzas. Foram empregados cadinhos de alumina e platina.

Nas Figuras A.1-A.5 e A.11-A.15 apresentam os resultados das análises das biomassas, onde nas primeiras são traçadas todas as curvas sobre os mesmos eixos e nas segundas são traçadas separadamente. As Figuras A.16-A.19 apresentam as mesmas informações, porém comparando cada tipo de curva (TGA, DTG, DSC e dDSC) para as diferentes amostras.

Assim como nas biomassas, os resultados das análises térmicas das cinzas são apresentados em três tipos de gráficos, sendo estes nas Figuras A.6-A.10, A.20-A.24 e A.25-A.28.

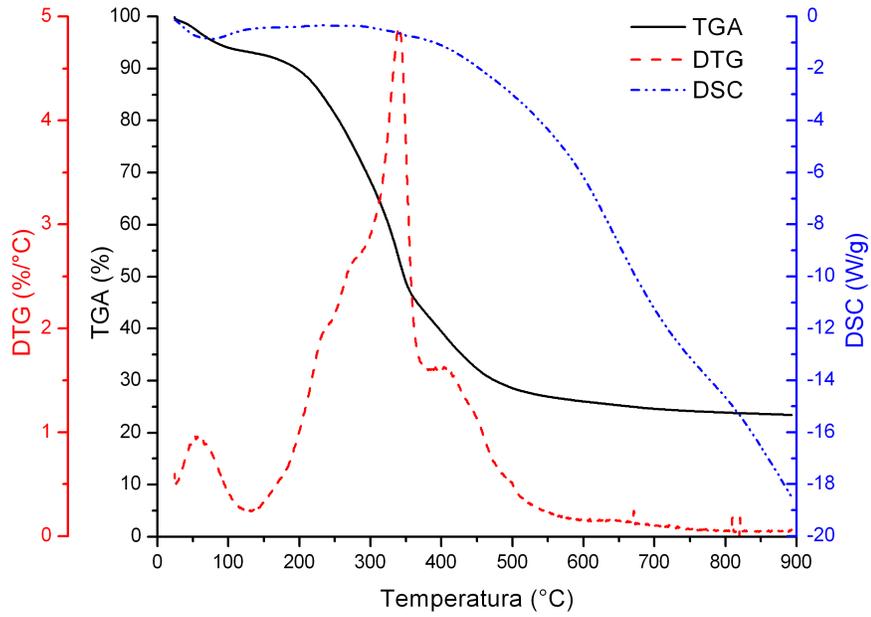


Figura A.1: Análises térmicas das folhas do dia.

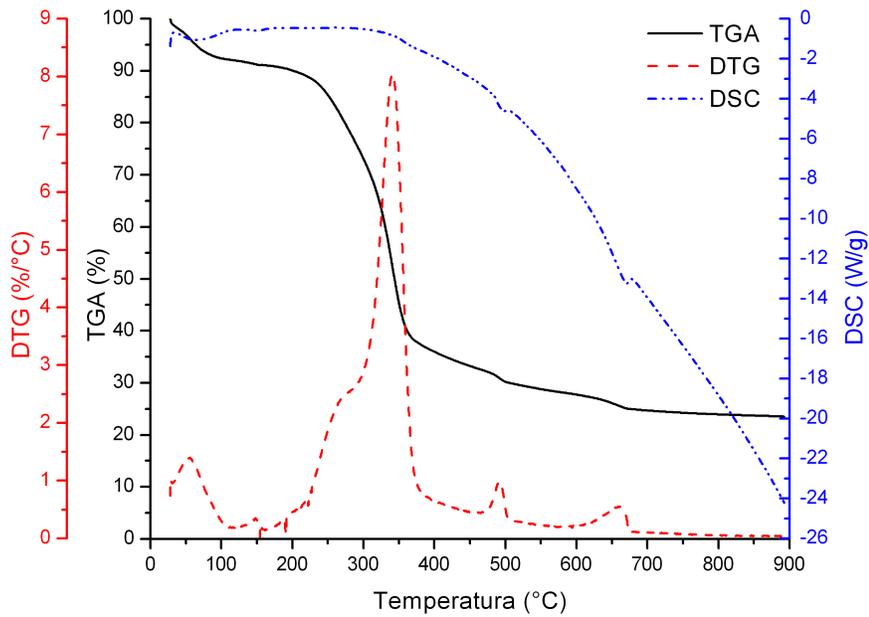


Figura A.2: Análises térmicas das cascas do dia.

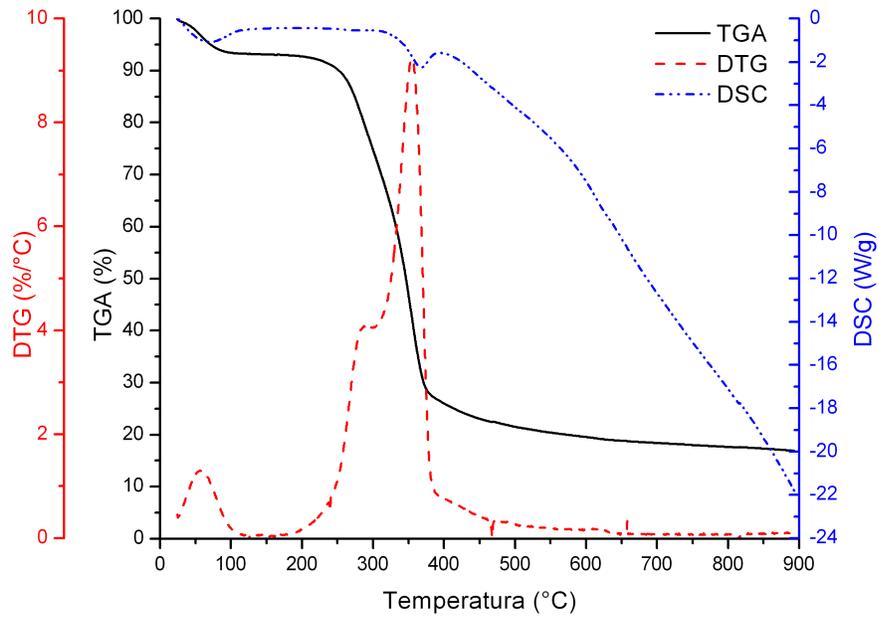


Figura A.3: Análises térmicas dos galhos do dia.

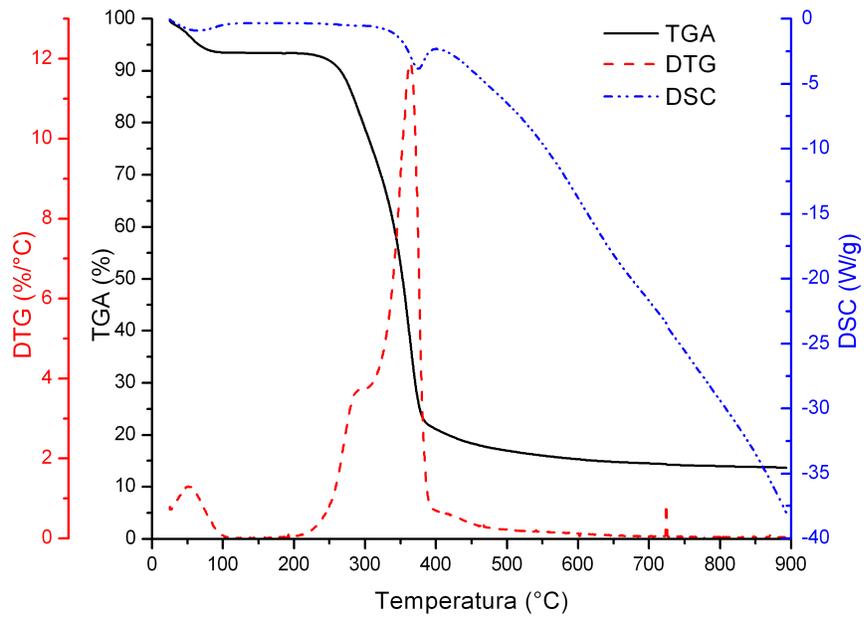


Figura A.4: Análises térmicas dos cavacos.

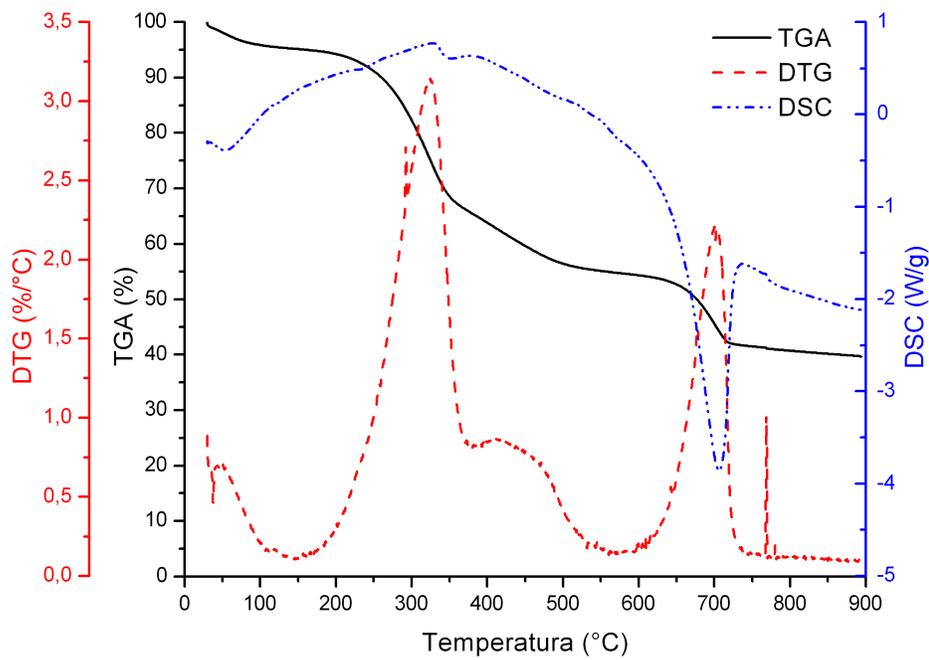


Figura A.5: Análises térmicas do lodo orgânico.

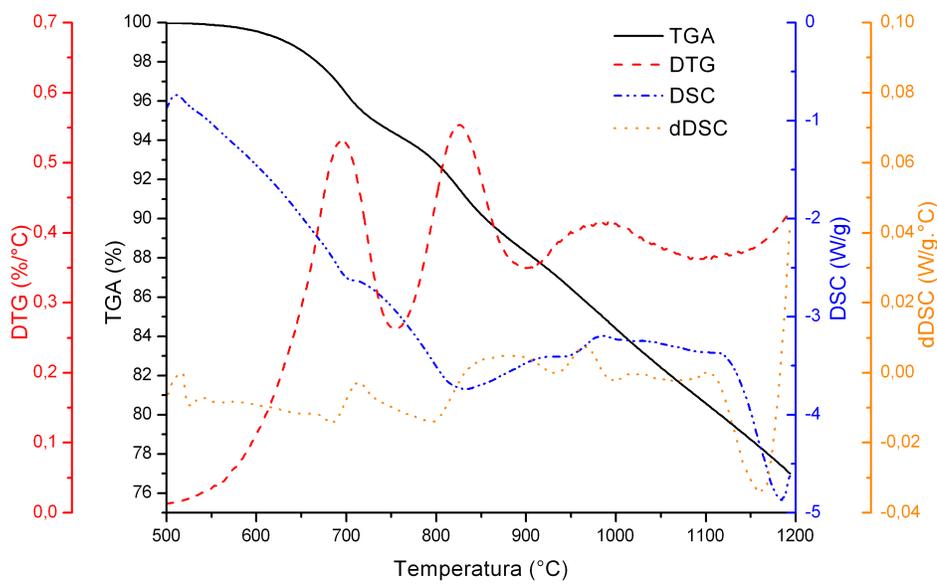


Figura A.6: Análises térmicas das cinzas das folhas de 32 dias.

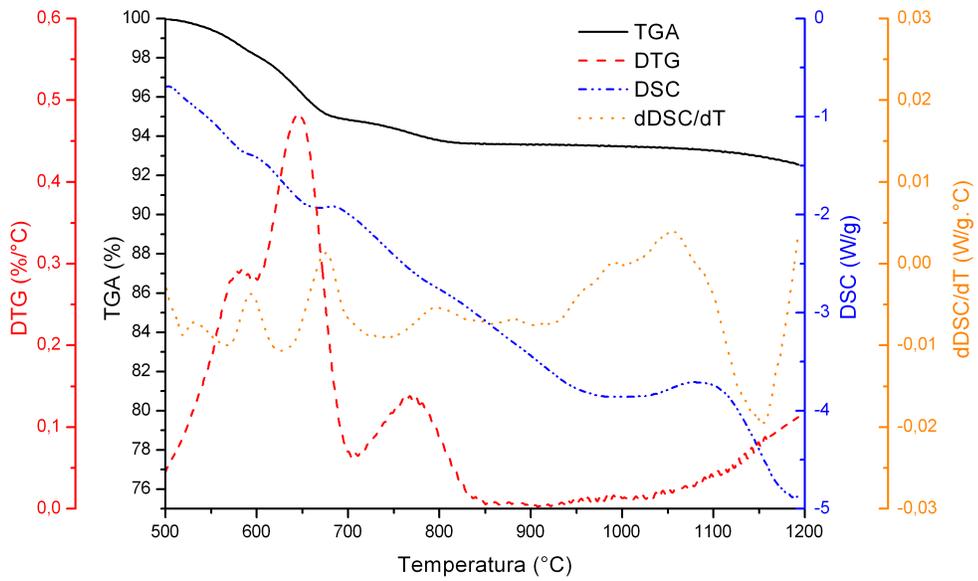


Figura A.7: Análises térmicas das cinzas das cascas de 32 dias.

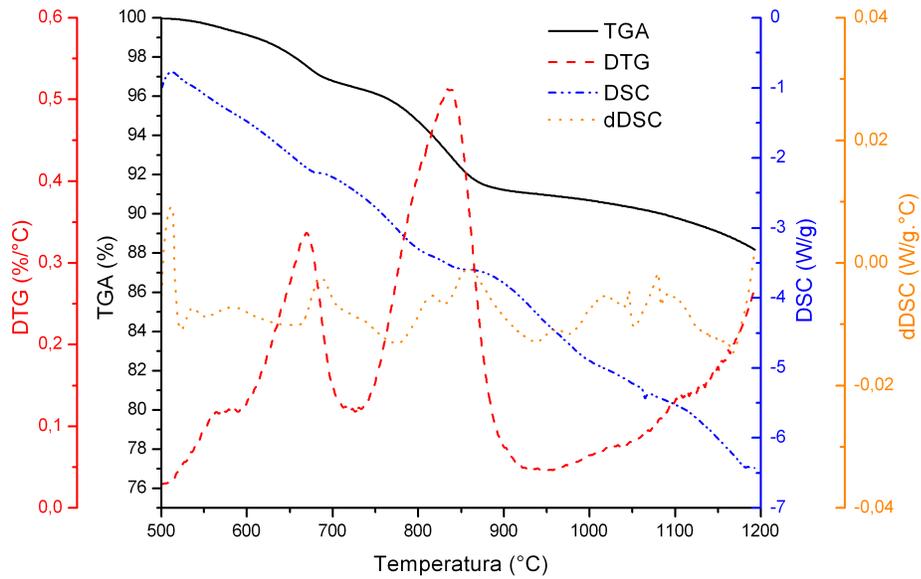


Figura A.8: Análises térmicas das cinzas dos galhos de 32 dias.

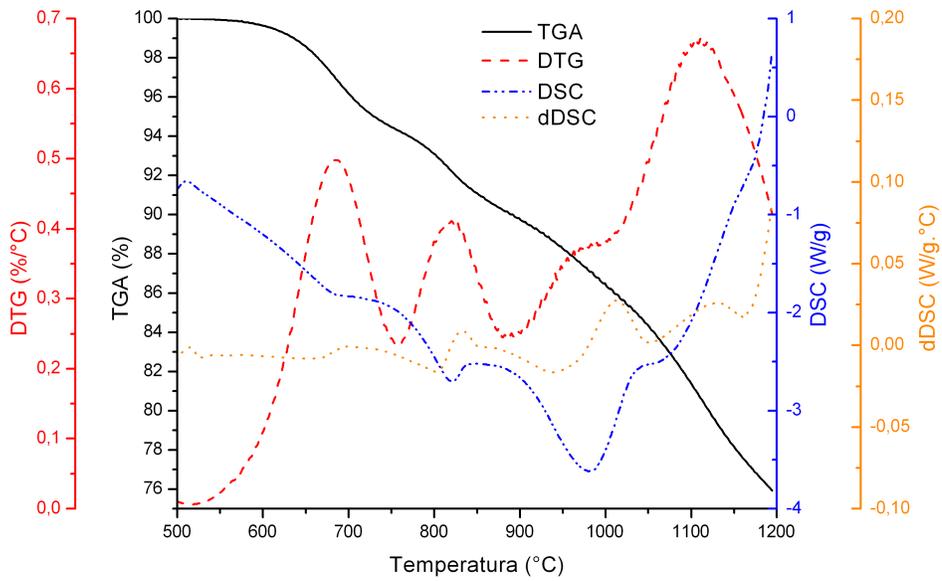


Figura A.9: Análises térmicas das cinzas dos cavacos.

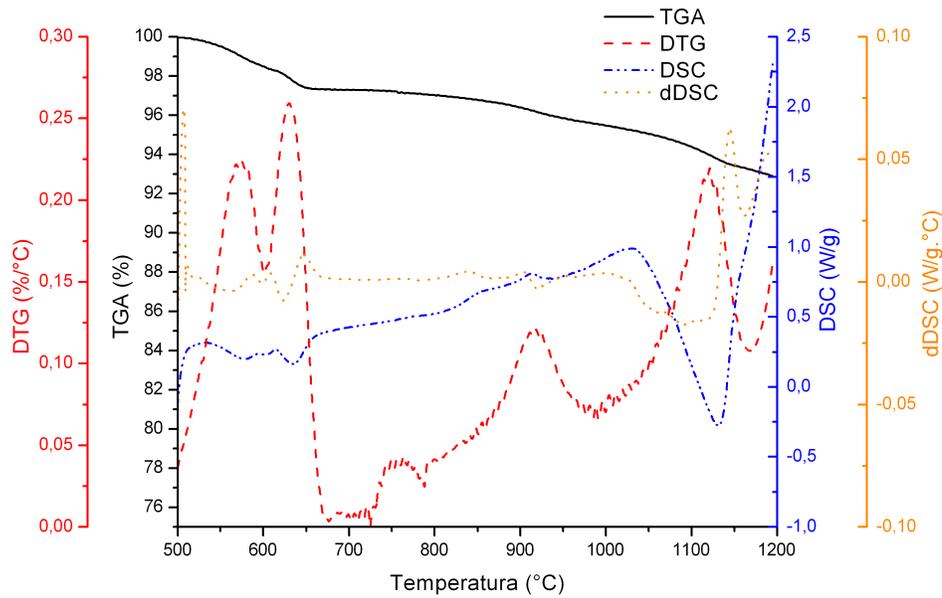


Figura A.10: Análises térmicas das cinzas do lodo orgânico.

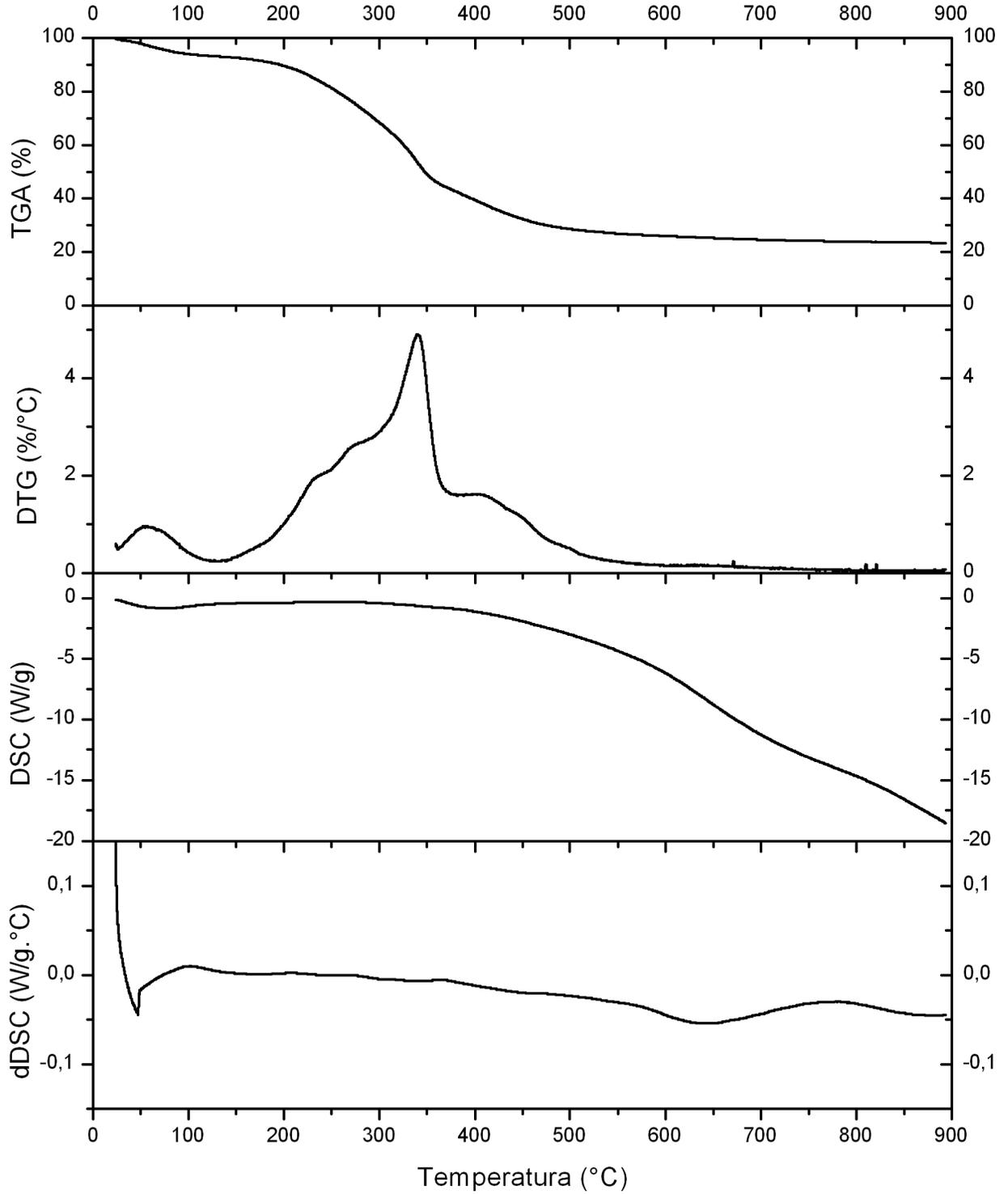


Figura A.11: Análises térmicas das folhas do dia (Versão 2).

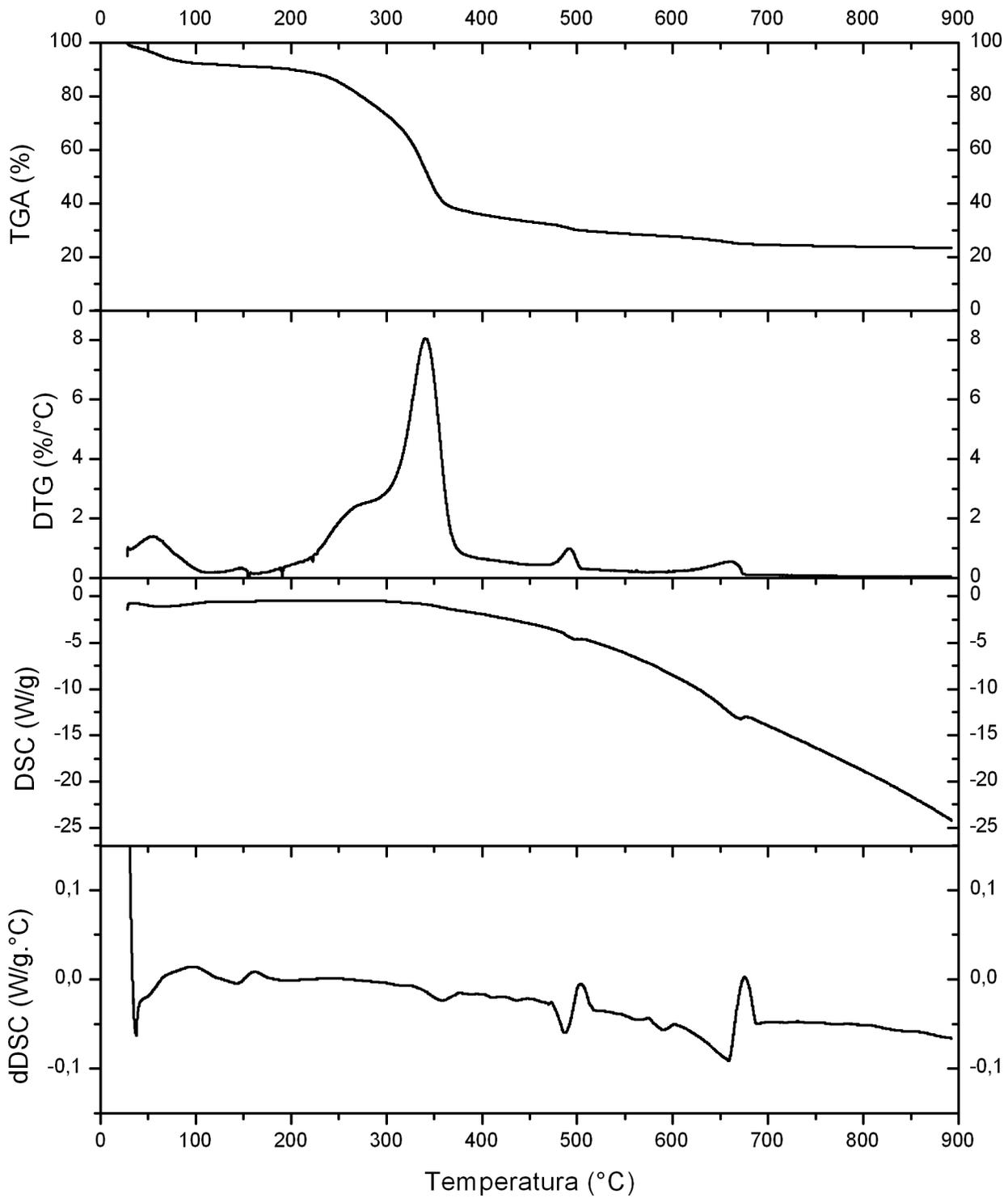


Figura A.12: Análises térmicas das cascas do dia (Versão 2).

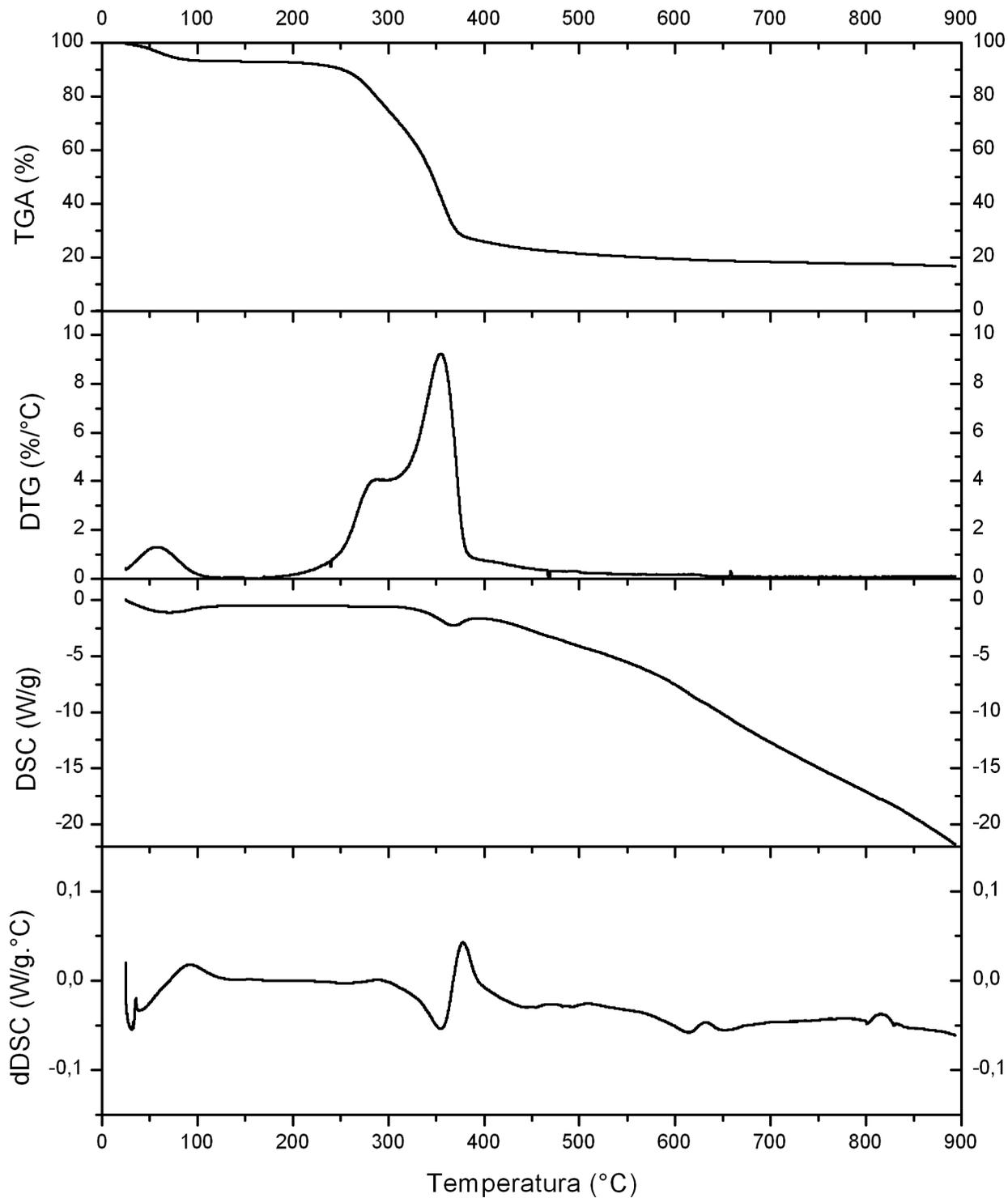


Figura A.13: Análises térmicas dos galhos do dia (Versão 2).

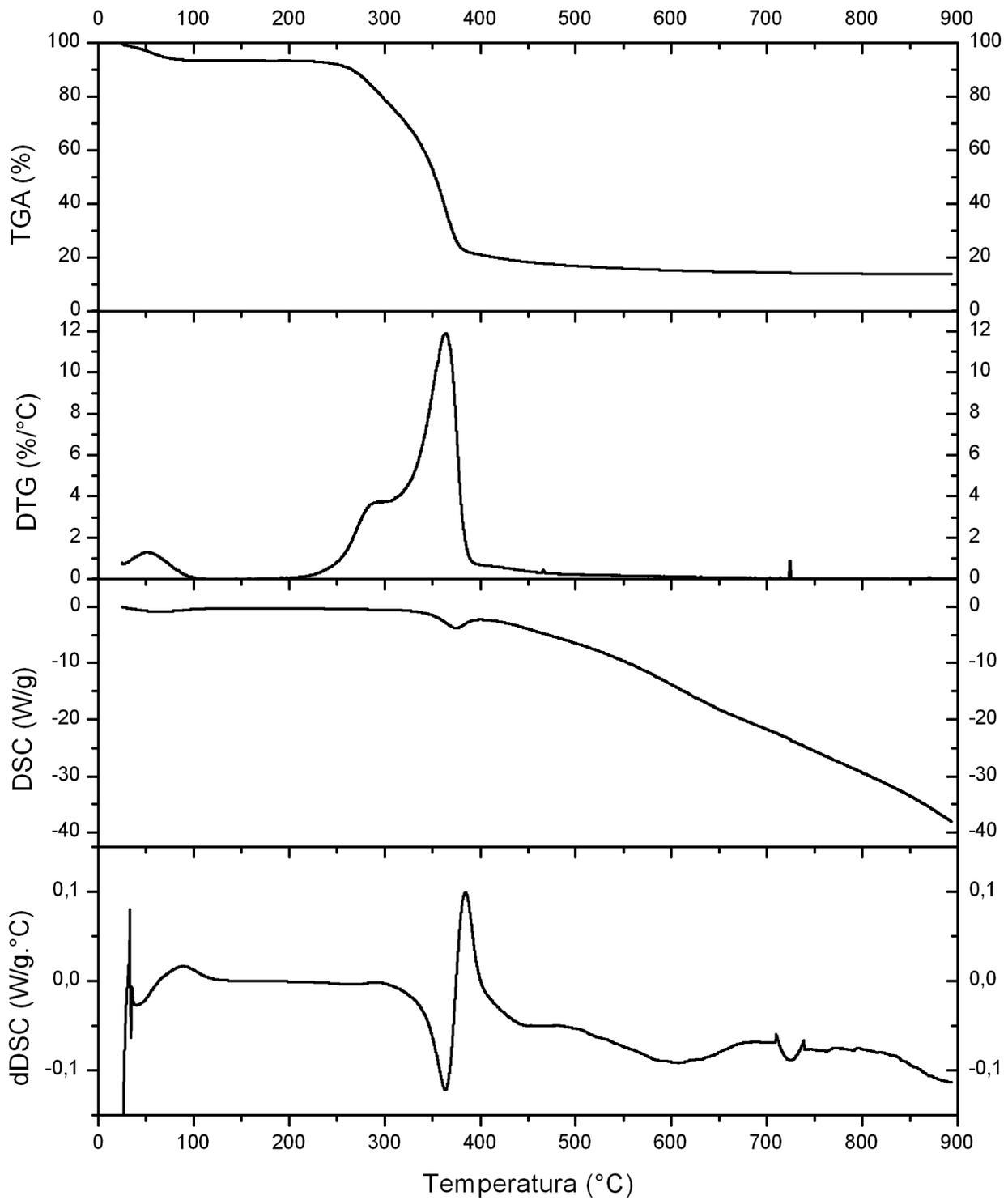


Figura A.14: Análises térmicas dos cavacos (Versão 2).

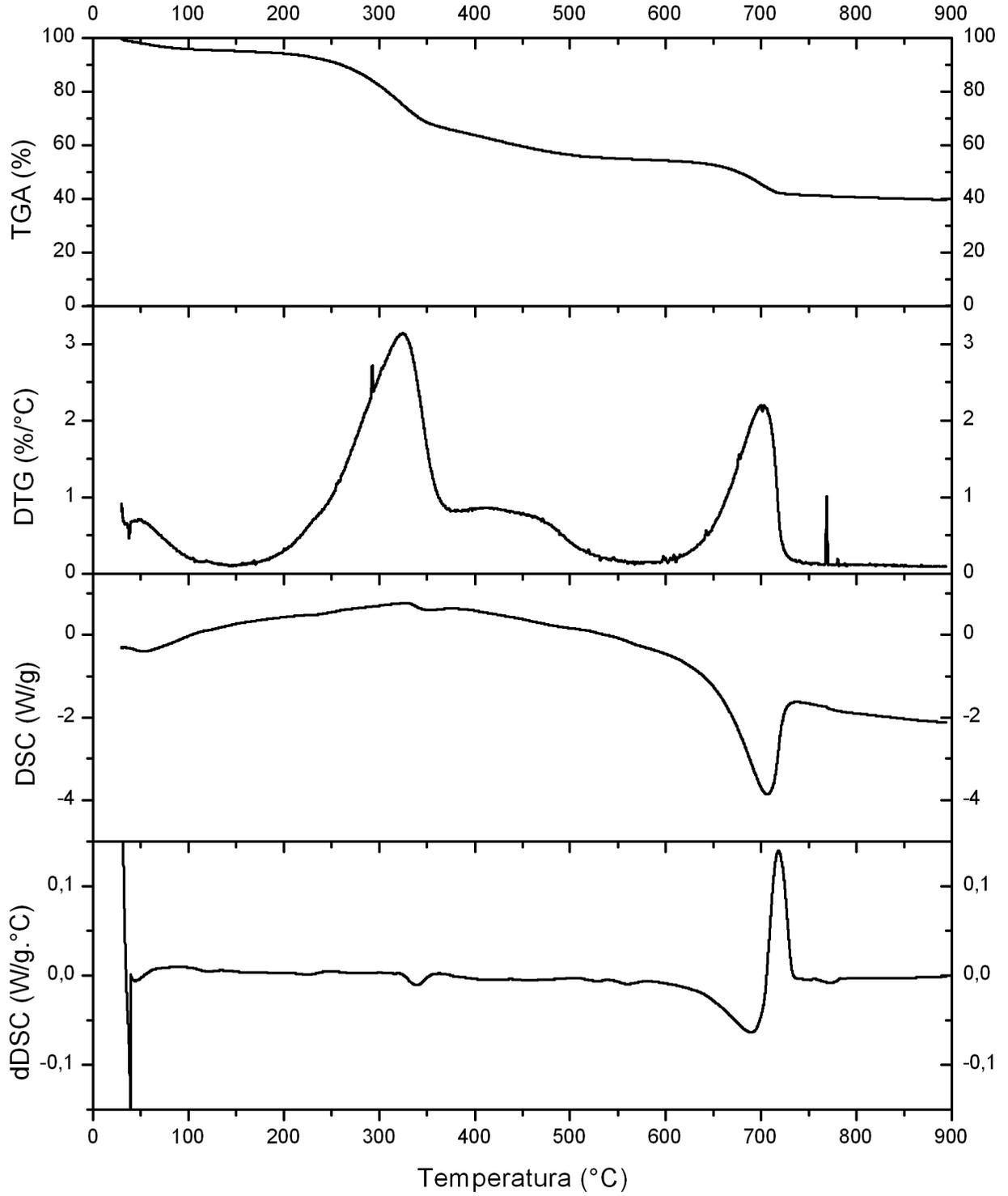


Figura A.15: Análises térmicas do lodo orgânico (Versão 2).

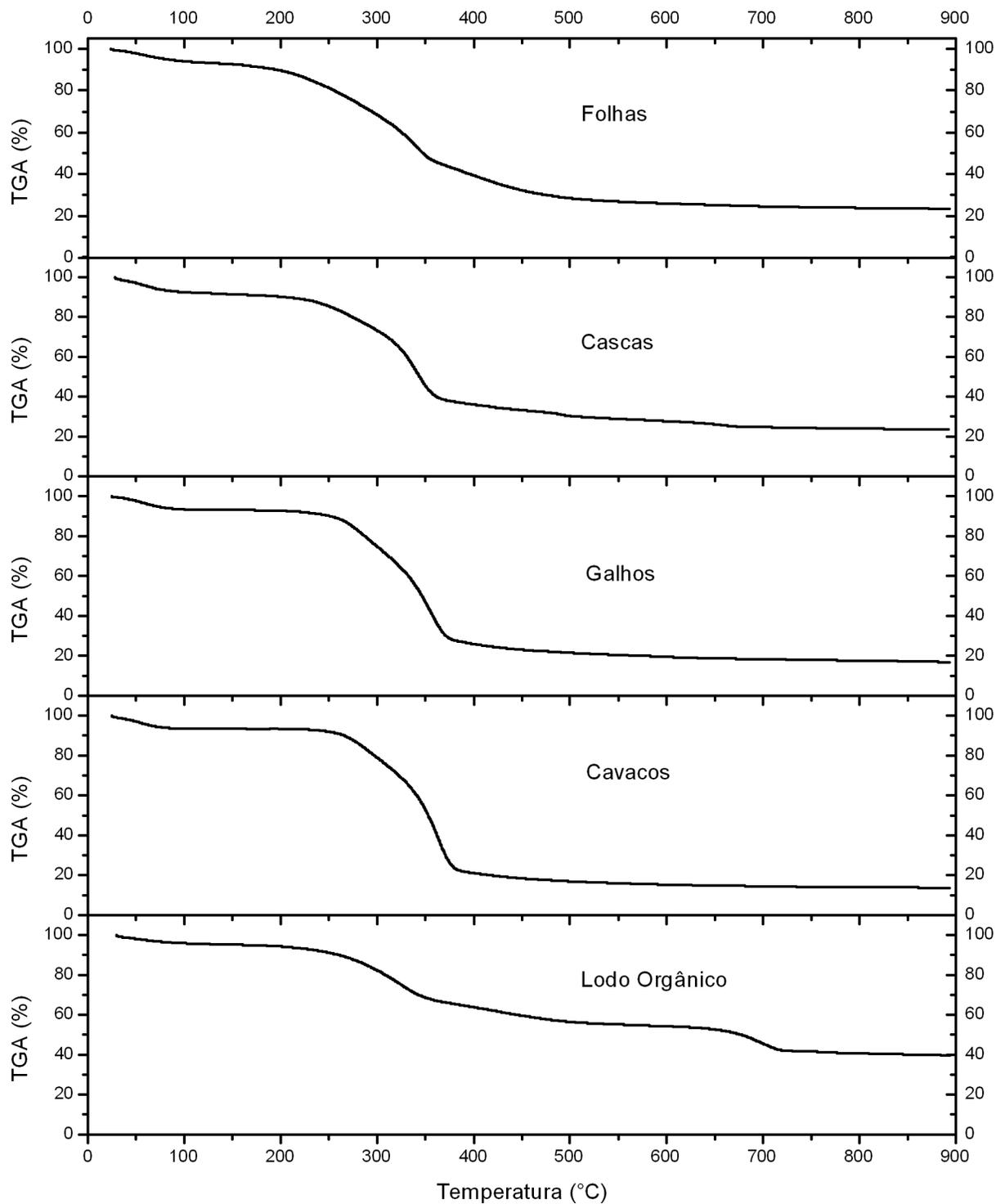


Figura A.16: TGA comparativa das biomassas.

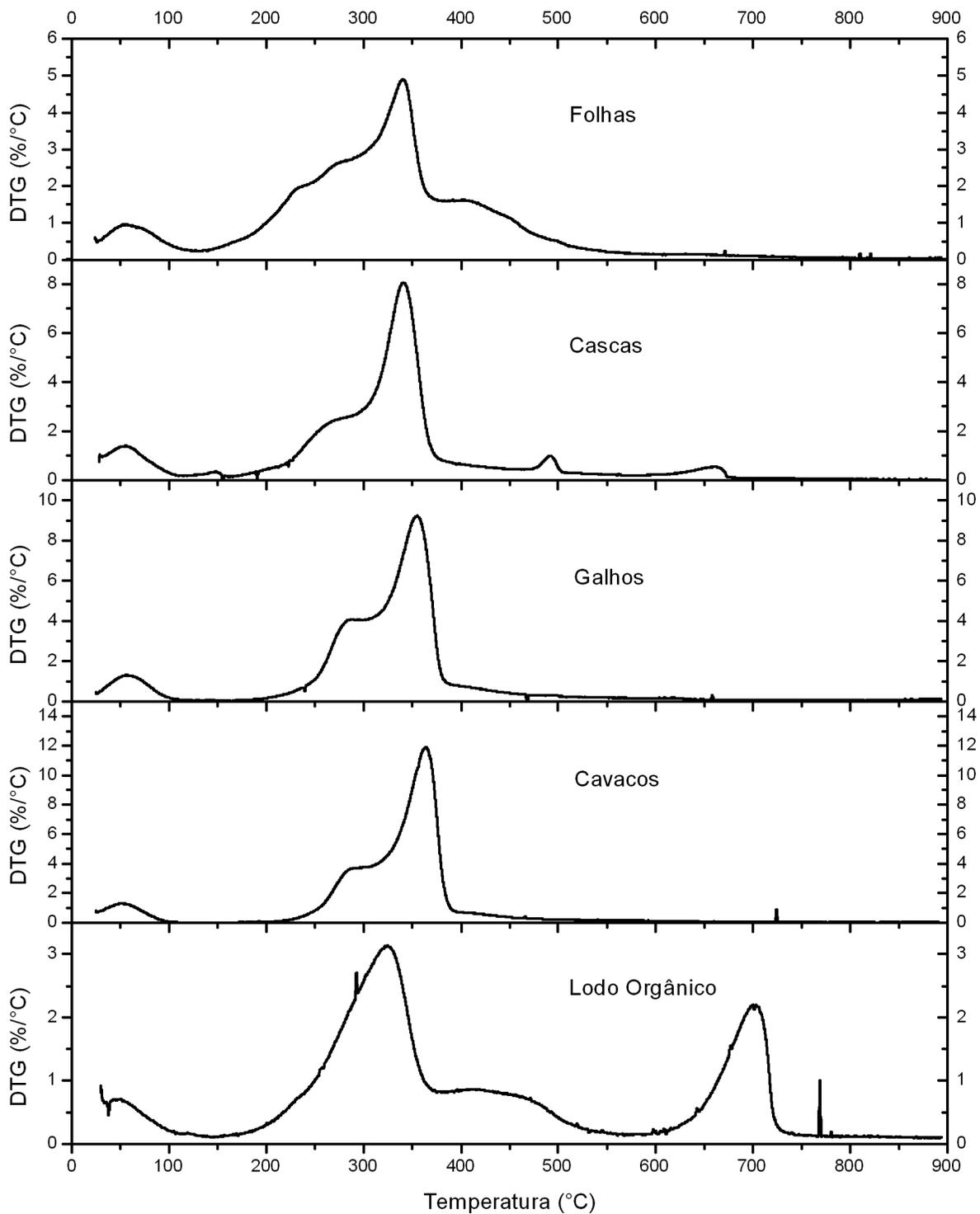


Figura A.17: DTG comparativa das biomassas.

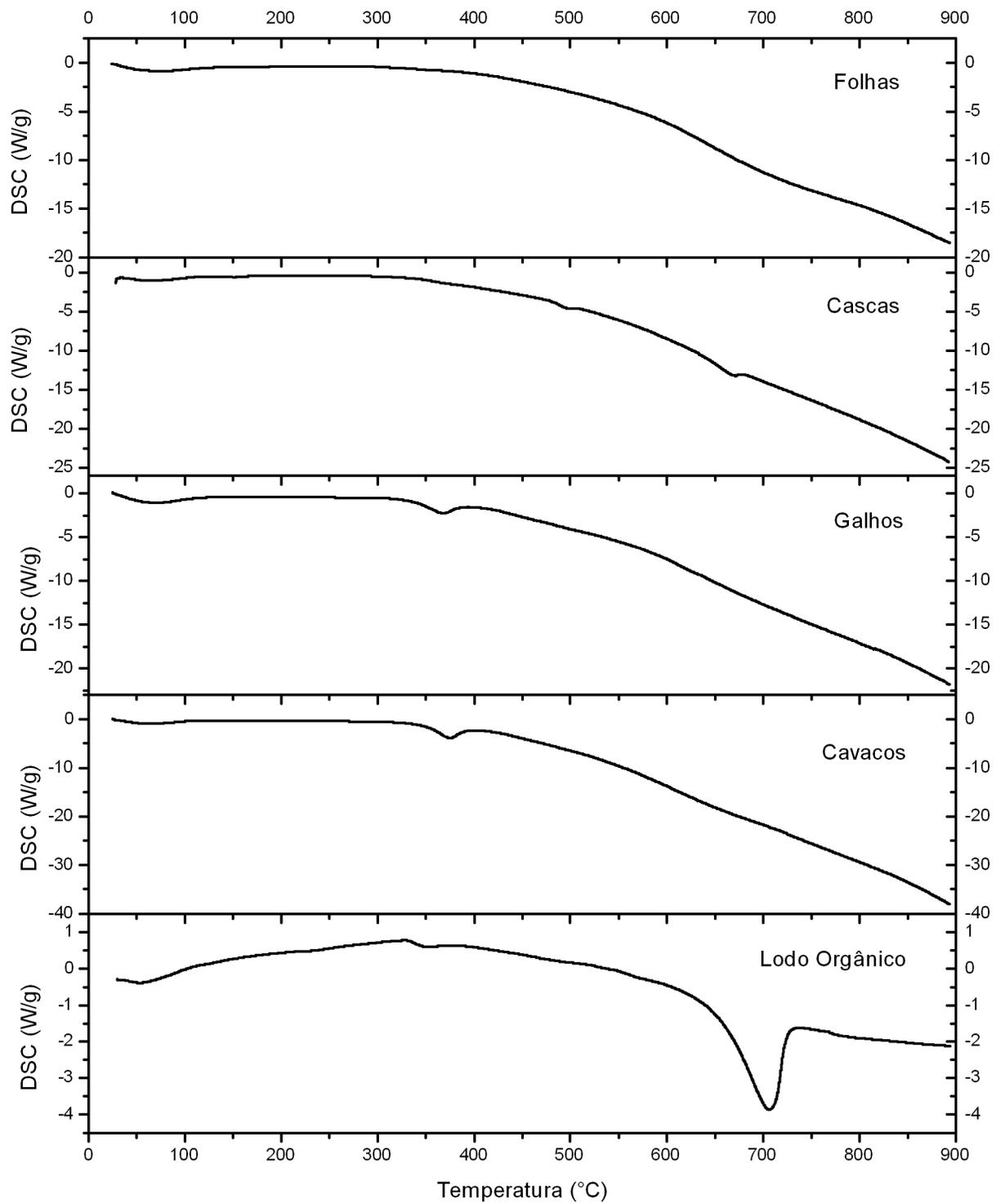


Figura A.18: DSC comparativa das biomassas.

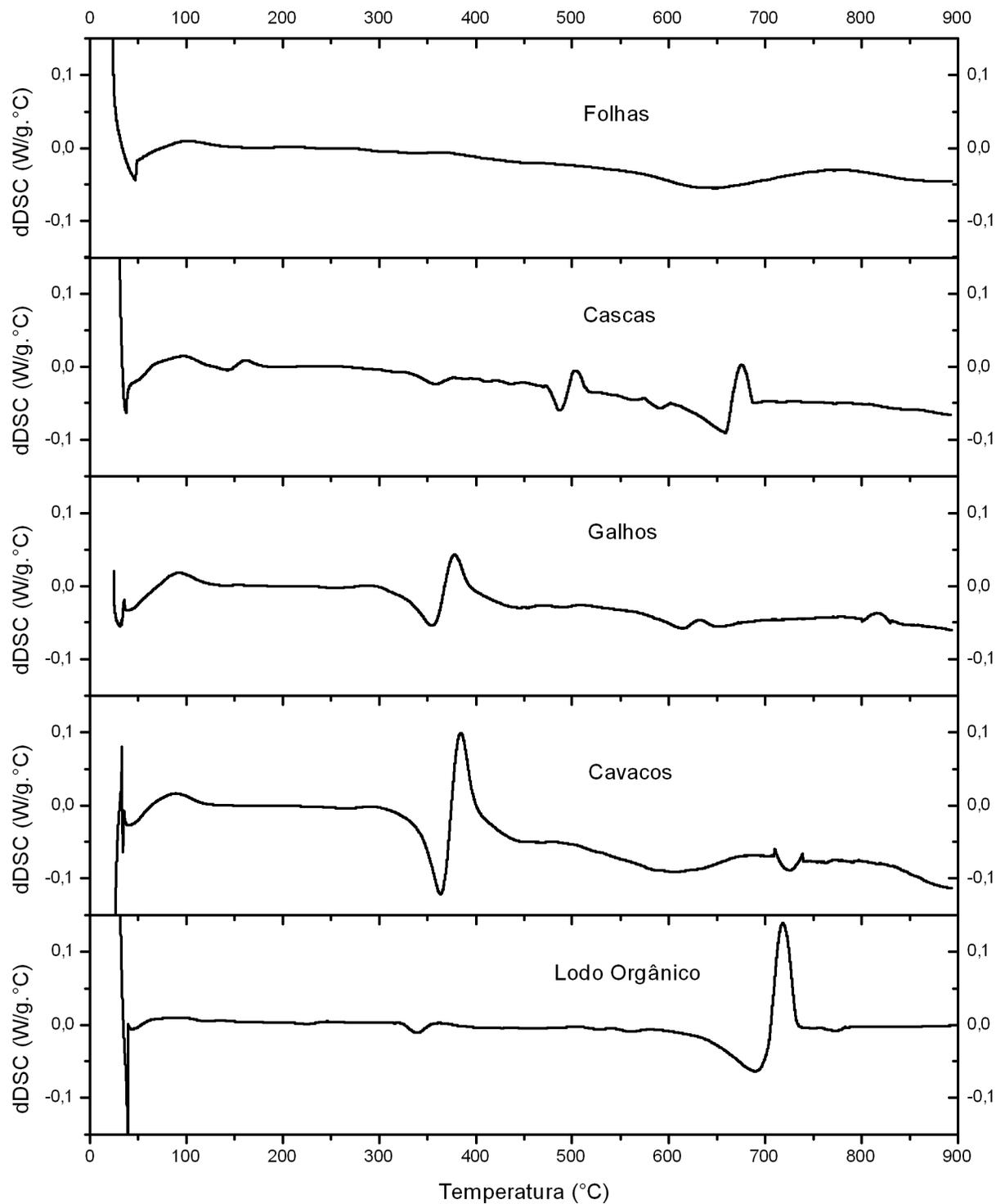


Figura A.19: dDSC comparativa das biomassas.

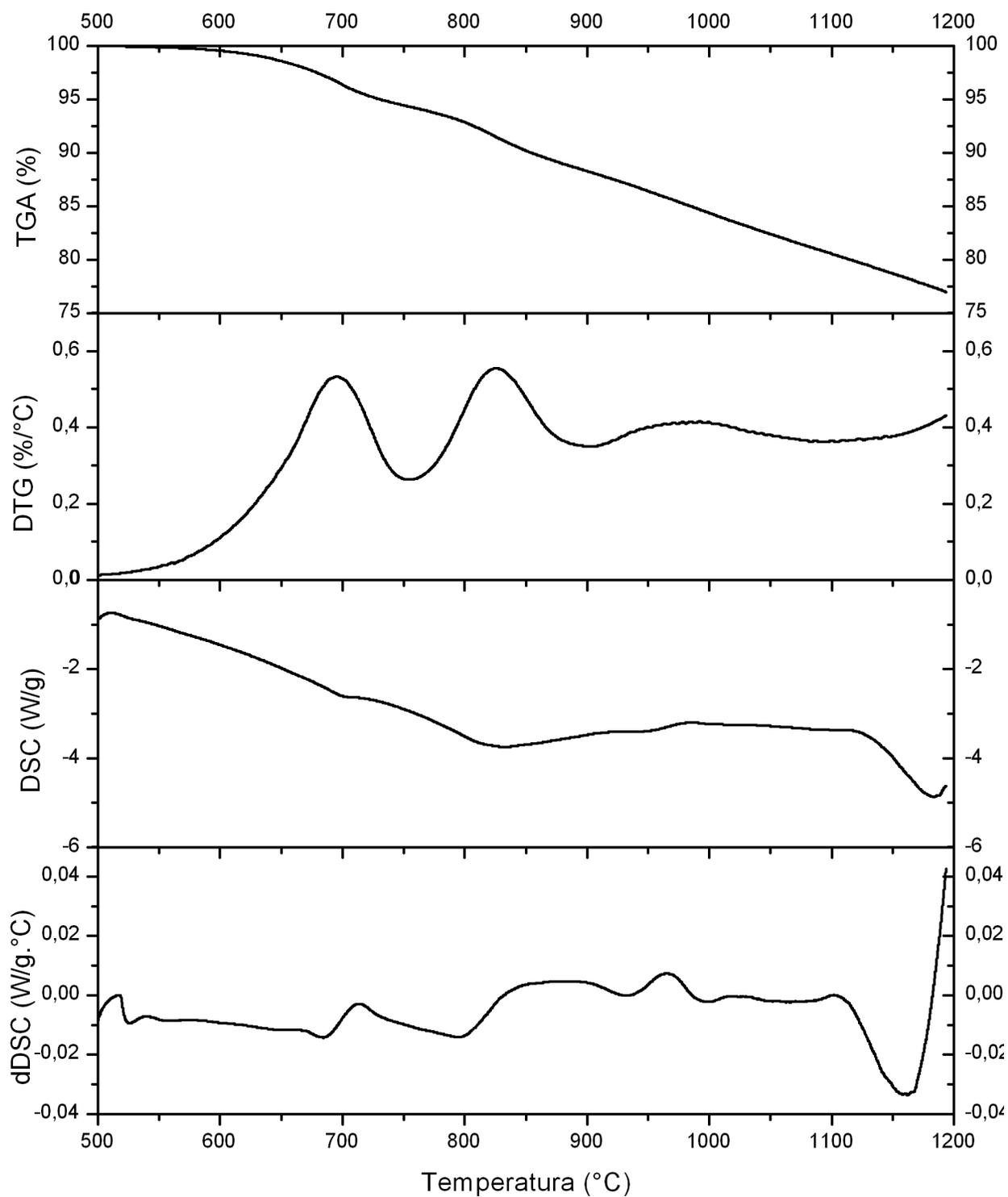


Figura A.20: Análises térmicas das cinzas das folhas de 32 dias (Versão 2).

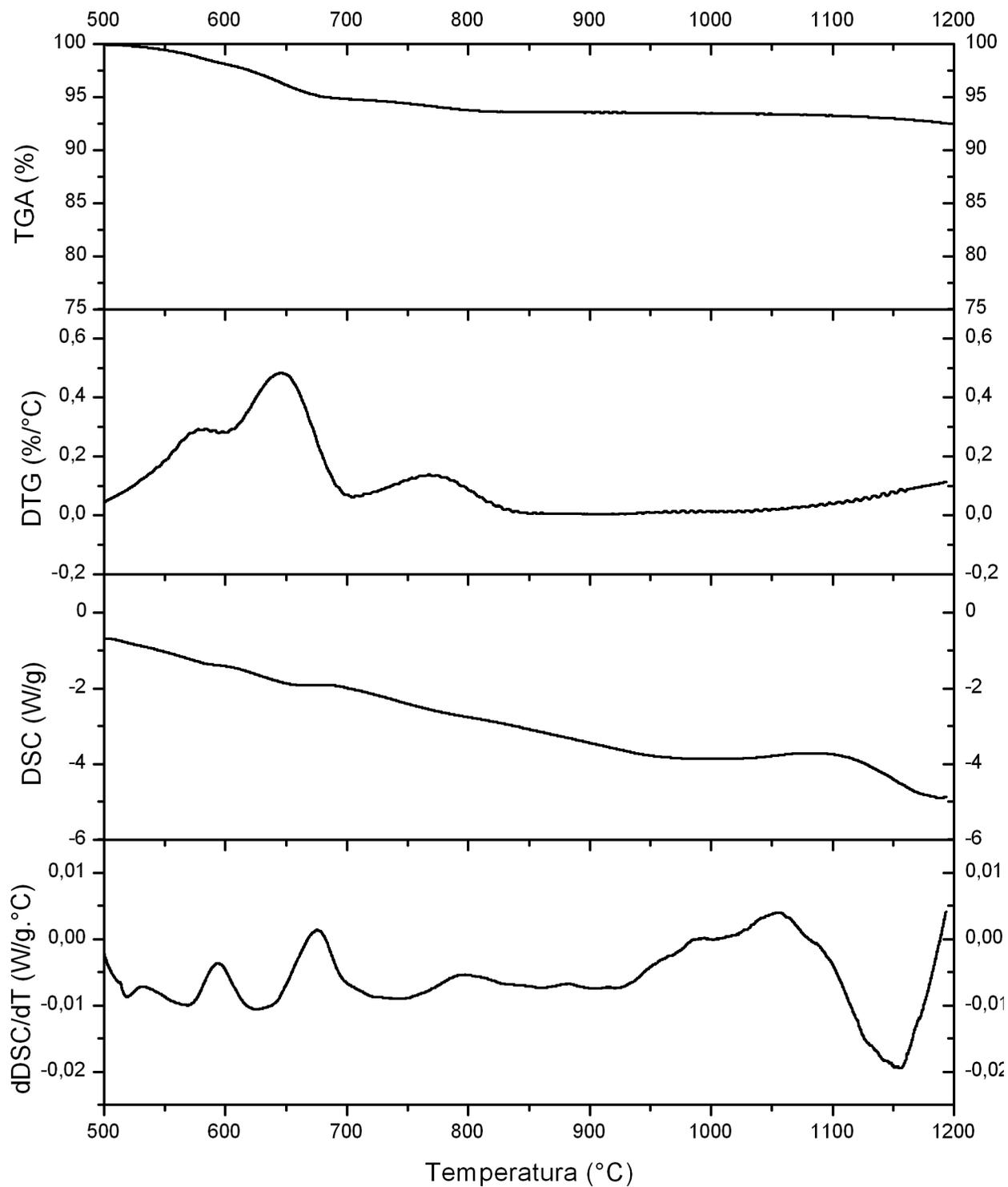


Figura A.21: Análises térmicas das cinzas das cascas de 32 dias (Versão 2).

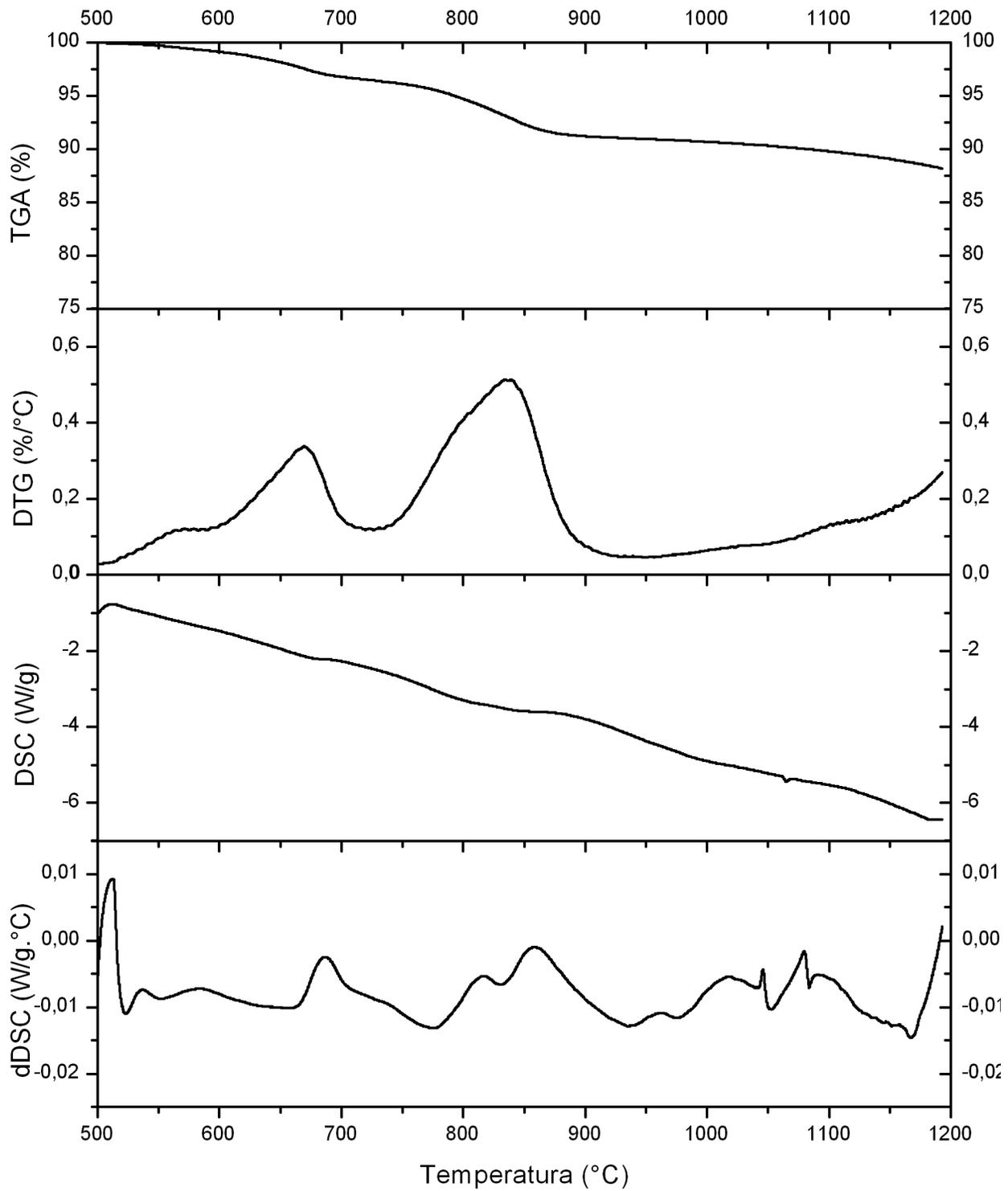


Figura A.22: Análises térmicas das cinzas dos galhos de 32 dias (Versão 2).

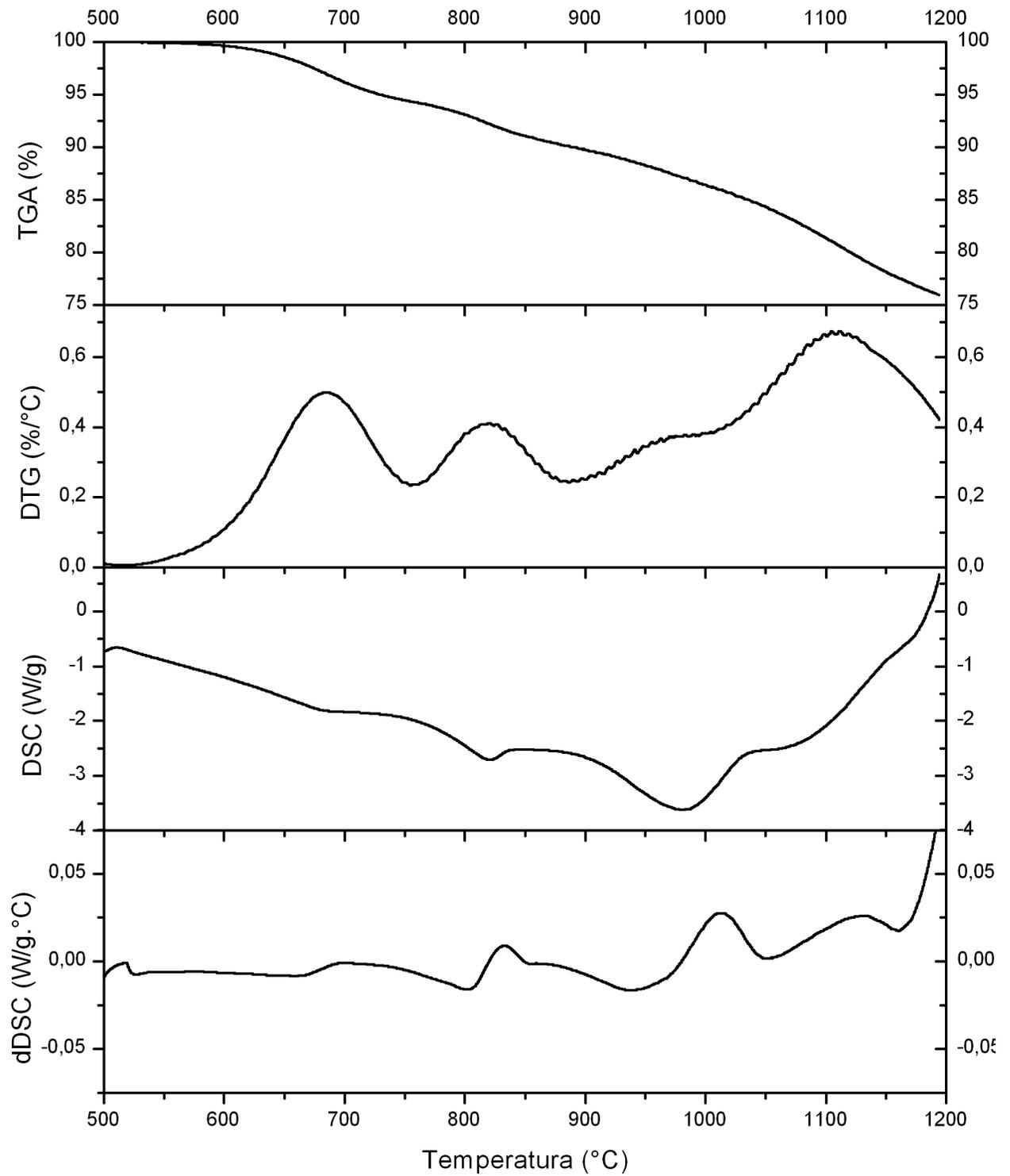


Figura A.23: Análises térmicas das cinzas dos cavacos (Versão 2).

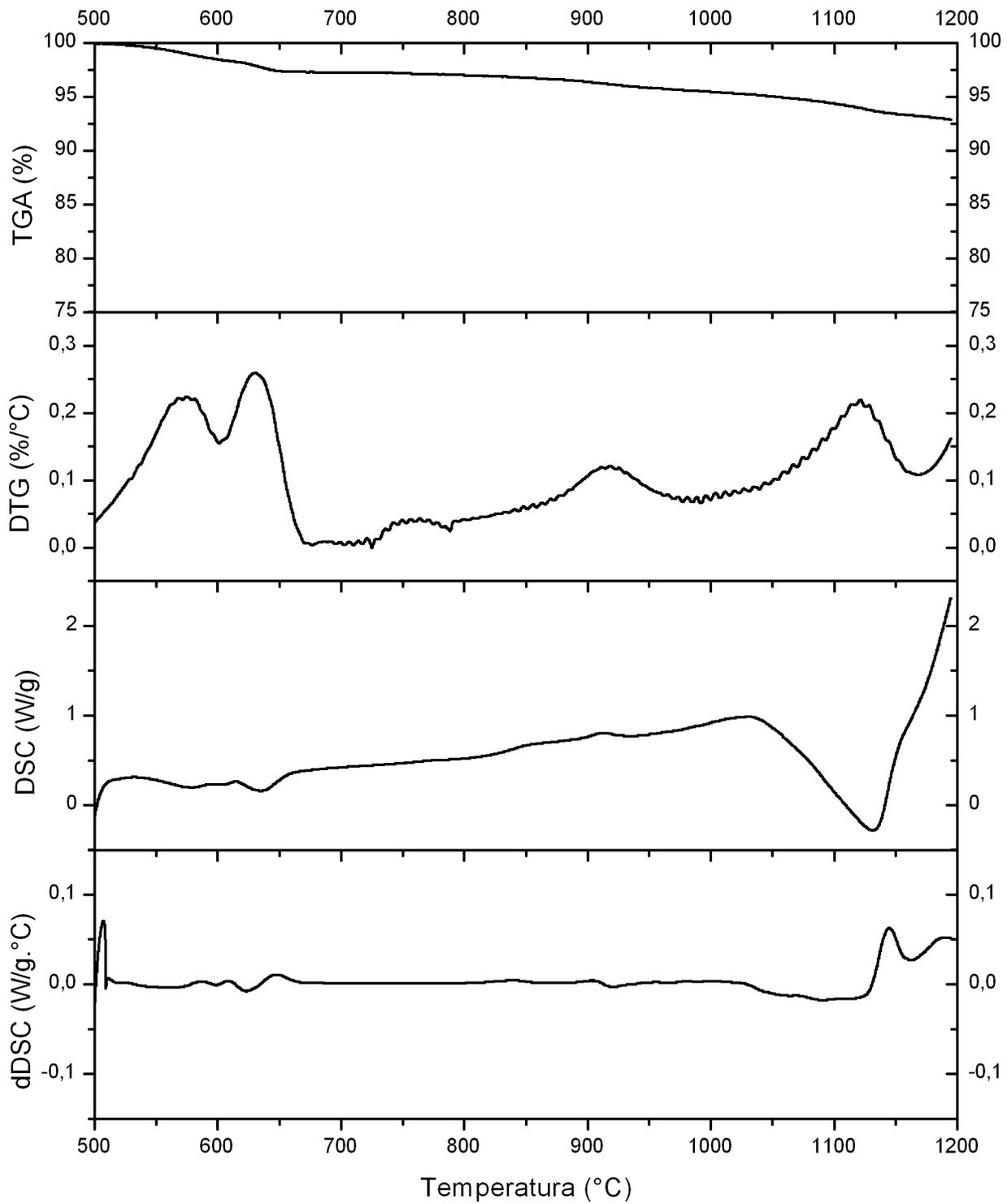


Figura A.24: Análises térmicas das cinzas do lodo orgânico (Versão 2).

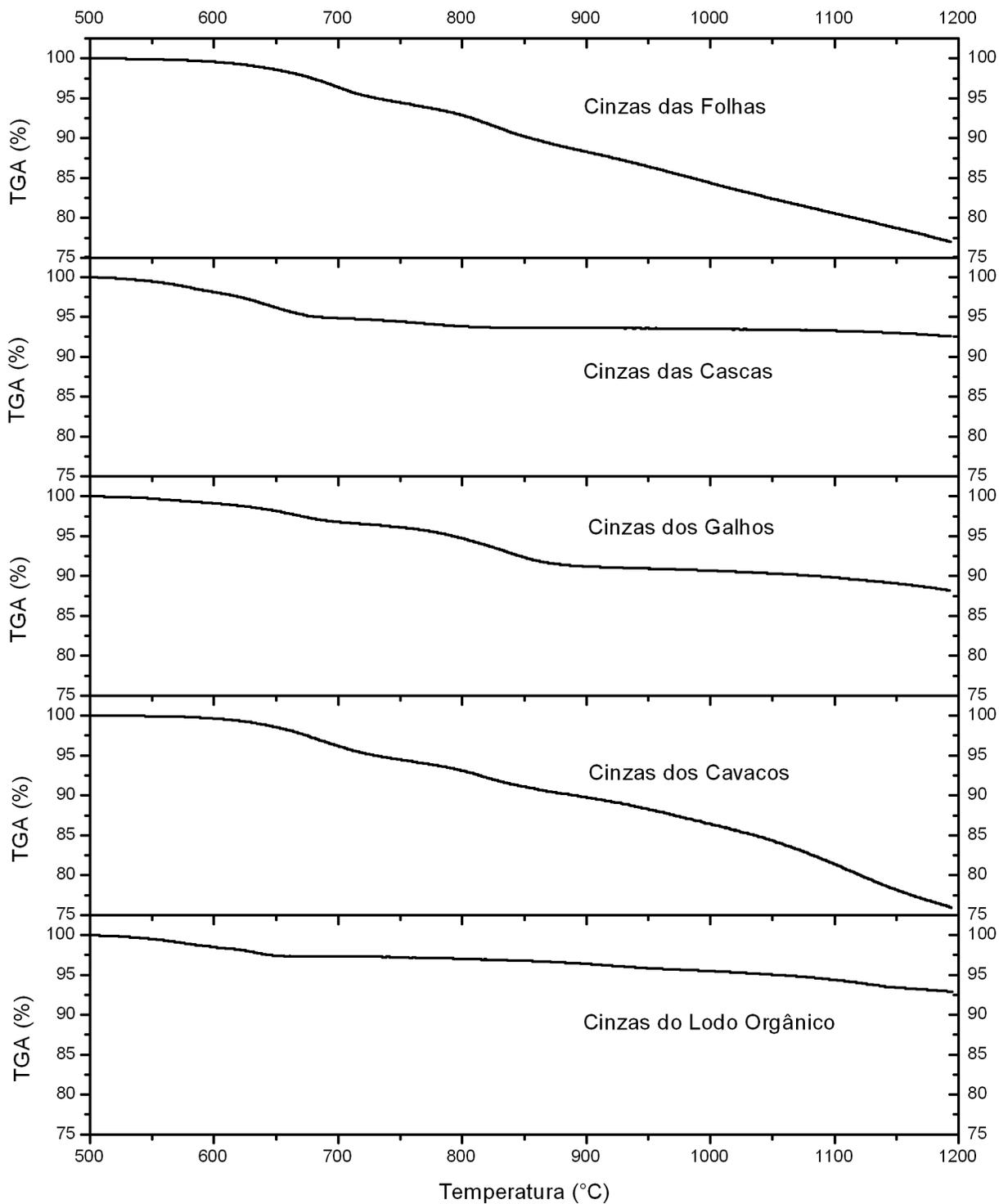


Figura A.25: TGA comparativa das cinzas.

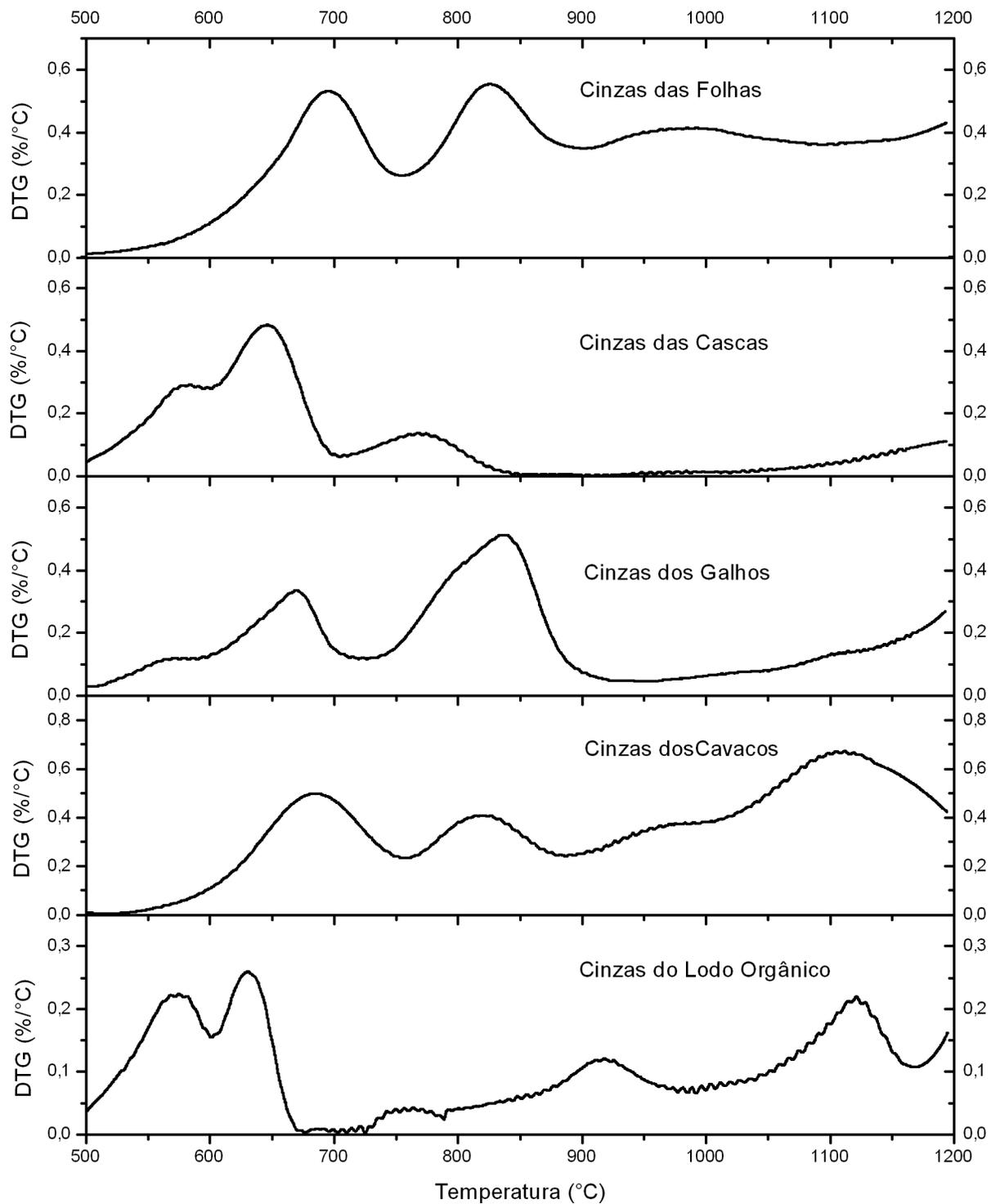


Figura A.26: DTG comparativa das cinzas.

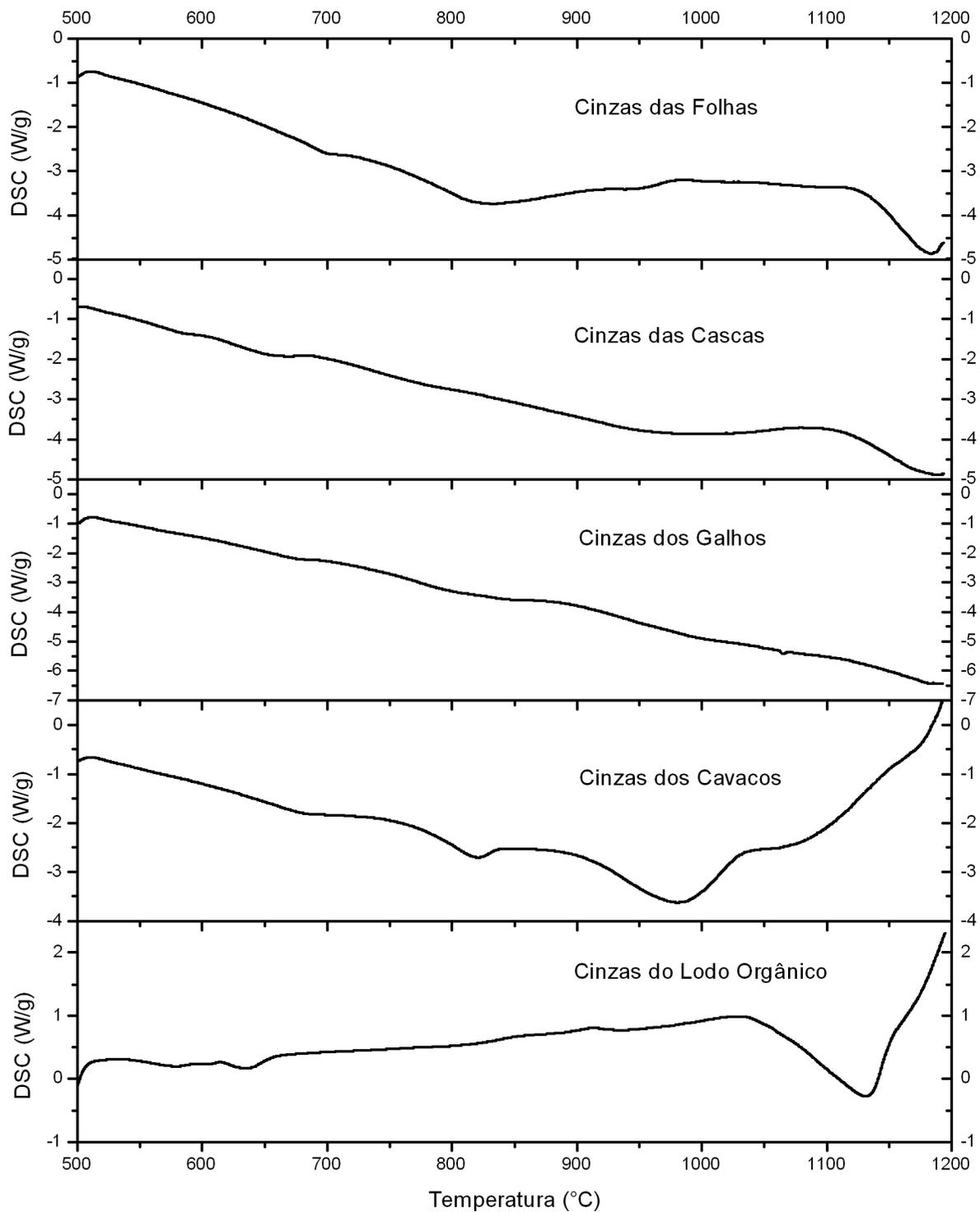


Figura A.27: DSC comparativa das cinzas.

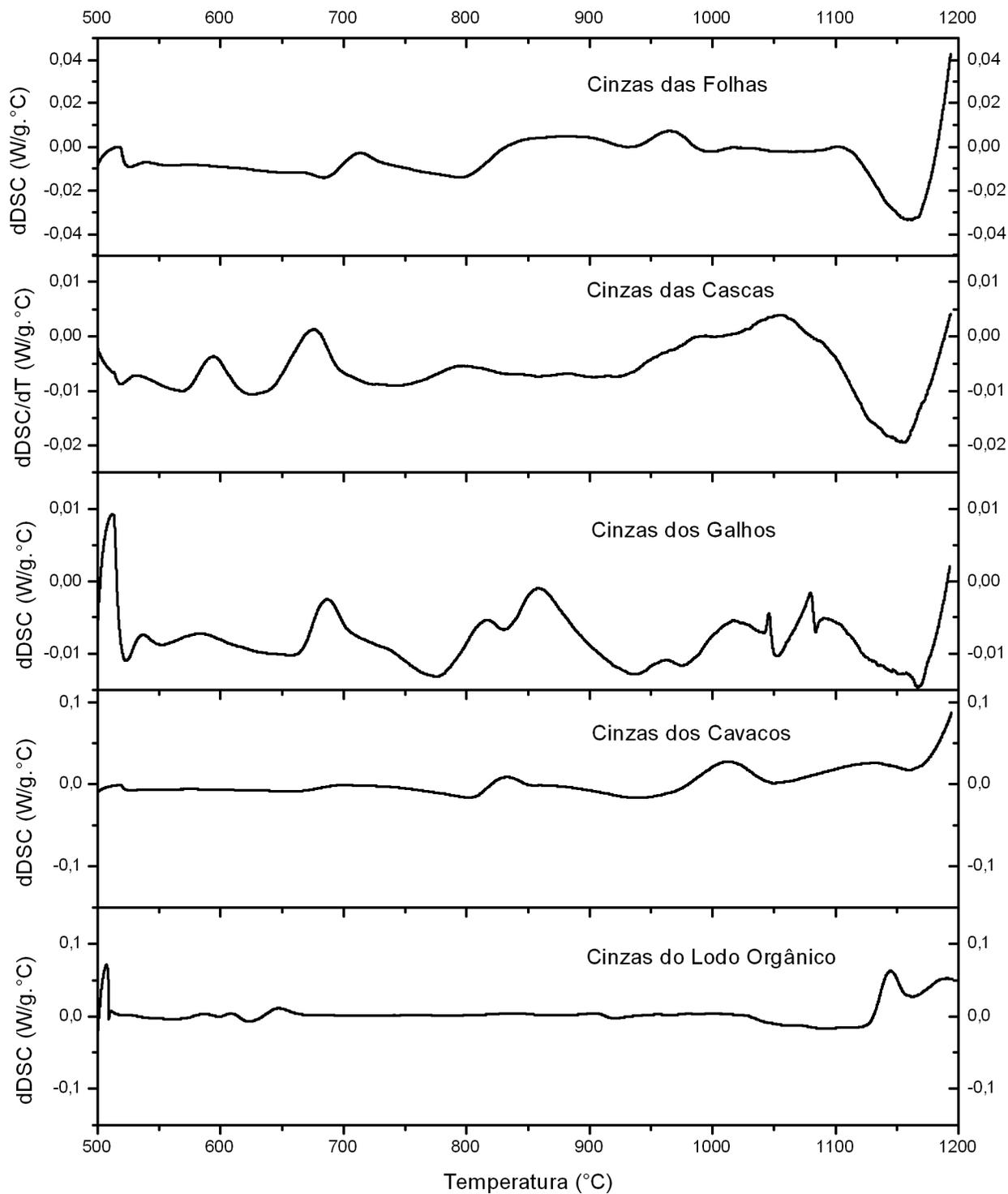
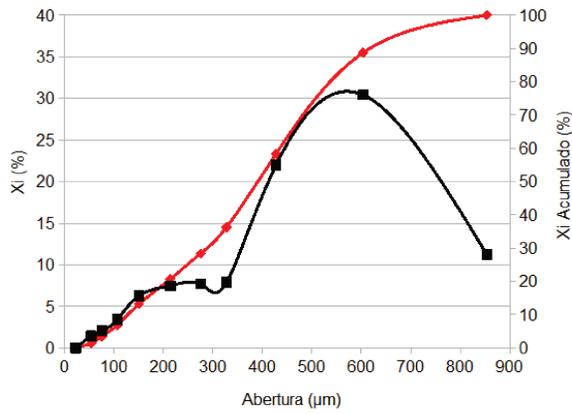


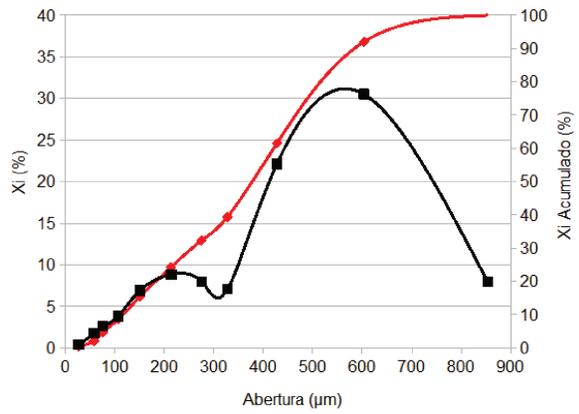
Figura A.28: dDSC comparativa das cinzas.

## **B. Distribuição granulométrica**

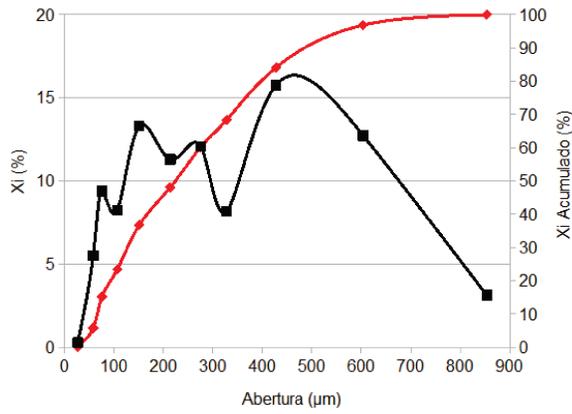
Em este apêndice são apresentados os gráficos correspondentes à distribuição granulométrica e acumulativa das amostras de biomassa. A distribuição de tamanhos das partículas foi determinada no Laboratório de Combustíveis - FEM - Unicamp pelo método de peneiramento. Na análise foram empregadas 10 peneiras de aberturas entre Tyler 24 ( $707 \mu m$ ) e 325 ( $45 \mu m$ ) segundo a designação Tyler, uma balança analítica OHAUS GA200 (resolução de  $\pm 1$  mg) e sistema vibratório Produtest.



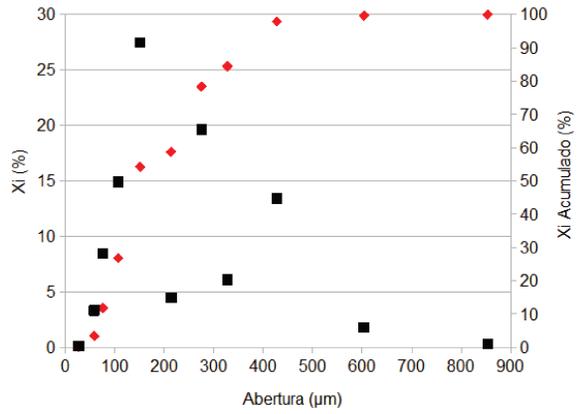
(a) Folhas do dia



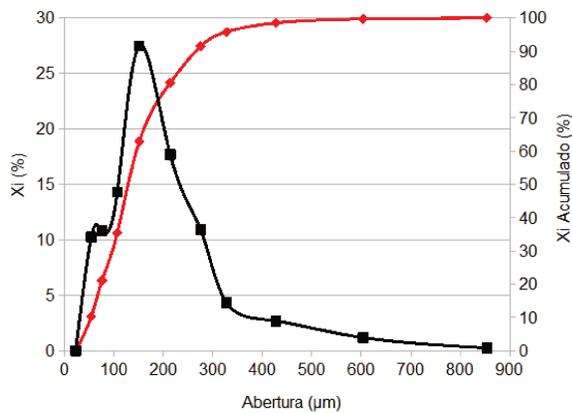
(b) Folhas de 32 dias



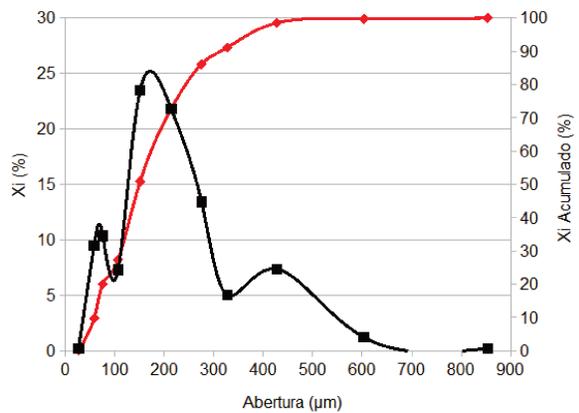
(c) Folhas de 94 dias



(d) Casca do dia

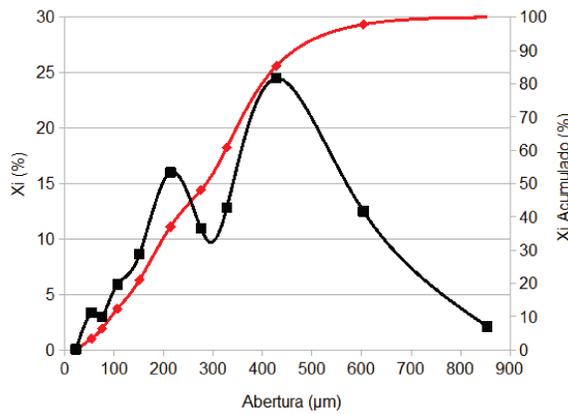


(e) Casca de 32 dias

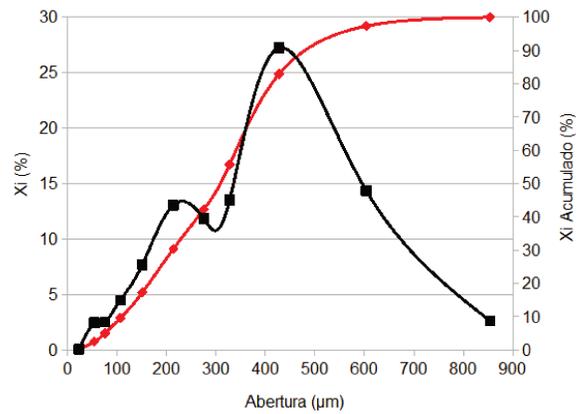


(f) Casca de 94 dias

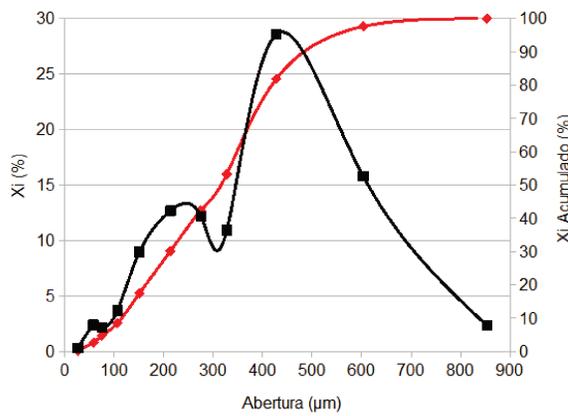
Figura B.1: Distribuição granulométrica das folhas e cascas.



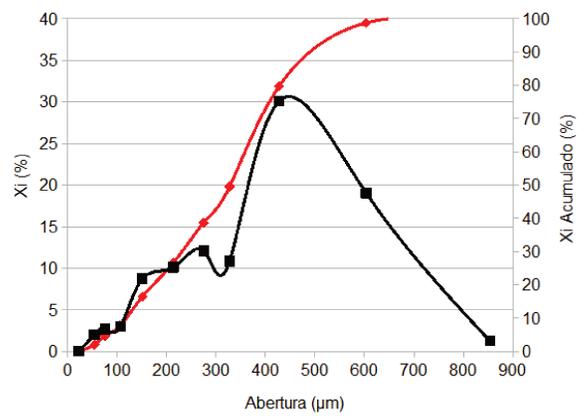
(a) Galhos do dia



(b) Galhos de 32 dias

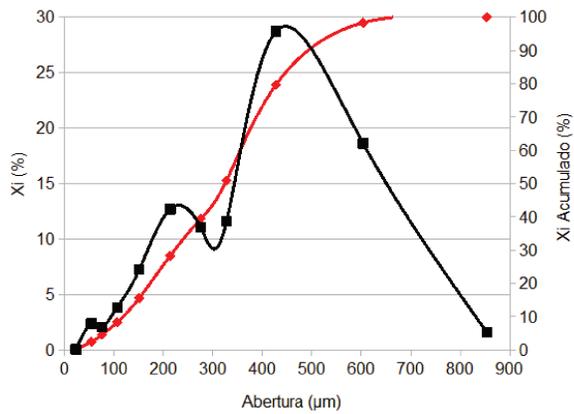


(c) Galhos de 94 dias

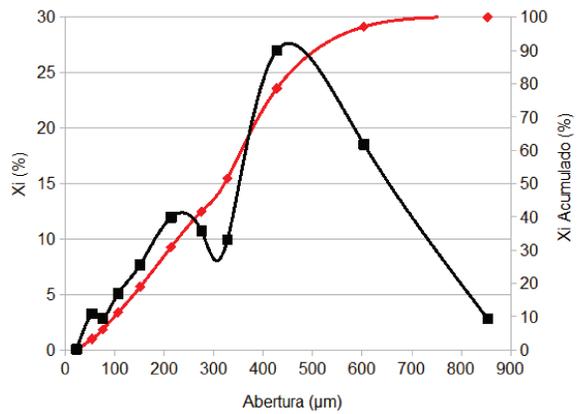


(d) Cavacos

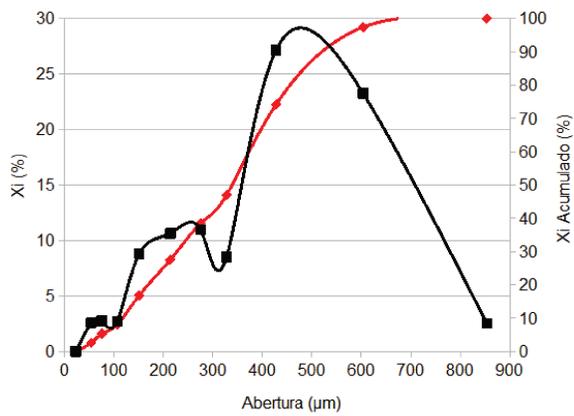
Figura B.2: Distribuição granulométrica dos galhos e cavacos.



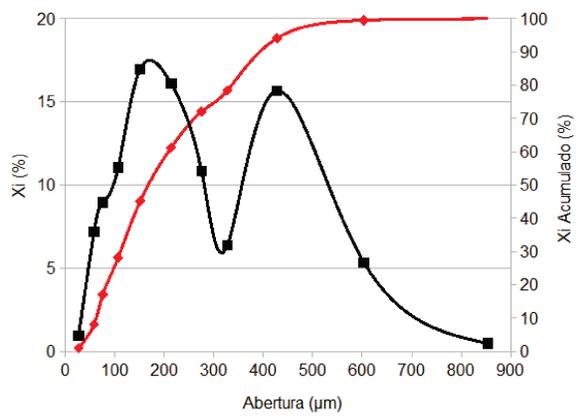
(a) Pontas do dia



(b) Pontas de 32 dias



(c) Finos



(d) Casca+Lascas

Figura B.3: Distribuição granulométrica das pontas, finos e casca + lascas.