UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA PARA APROVEITAMENTO DE CASCAS DE *EUCALYPTUS* GERADOS NO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE PAINÉIS DE MADEIRA.

FRANCISCO LUIZ SANCHEZ SANTIAGO

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP - Campus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Agronomia – Área de Concentração em Energia na Agricultura

BOTUCATU-SP

Janeiro - 2007

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA PARA APROVEITAMENTO DE CASCAS DE *EUCALYPTUS* GERADOS NO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE PAINÉIS DE MADEIRA.

FRANCISCO LUIZ SANCHEZ SANTIAGO

Orientador: Prof. Dr. Marcos Antonio de Rezende

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP - Campus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Agronomia – Área de Concentração em Energia na Agricultura

BOTUCATU-SP

Janeiro - 2007

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS

CAMPUS DE BOTUCATU

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: **"ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA PARA APROVEITAMENTO DE CASCAS DE EUCALYPTUS GERADOS NO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE PAINÉIS DE MADEIRA"**

ALUNO: FRANCISCO LUIZ SANCHEZ SANTIAGO

ORIENTADOR: PROF. DR. MARCOS ANTONIO DE REZENDE

Aprovado pela Comissão Examinadora

PROF. DR. MARCOS ANTONIO DE REZENDE

PROF. DR. JOSÉ ROBERTO C. SAGLIETTI

PROF. DR. MARCOS VINÍCIUS RODRIGUES

Data da Realização: 19 de janeiro de 2007.

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO
UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

Santiago, Francisco Luiz Sanchez, 1952-
S235e Estudo da viabilidade técnica e econômica para aproveitamento de cascas de *Eucalyptus* gerados no processo de fabricação de painéis de madeira / Francisco Luiz Sanchez Santiago . - Botucatu : [s.n.], 2007.
ix, 89 f. : il. color., gráfs, tabs.

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu, 2007
Orientador: Marcos Antonio de Rezende
Inclui bibliografia.

1. Energia - Fontes alternativas. 2. Energia - Indústria . 3. *Eucalyptus*. 4. Resíduos vegetais. 5. Viabilidade econômica. I. Rezende, Marcos Antonio. II. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agronômicas. III. Título.

SUMÁRIO

Lista de Figuras v

Lista de tabelas vii

Simbologia viii

Resumo 1

Summary 3

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO 5

1.1. Objetivos 6

1.2. Hipóteses 7

1.3. Aplicação dos resultados 7

CAPÍTULO 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 8

2.1. Aspectos da produção de chapa de fibra de madeira 8

2.1.1. Histórico 8

2.1.2. Definição e característica da chapa de fibra de madeira 9

2.1.2.1. Chapa dura 10

2.1.2.2. Chapa de média densidade (MDF) 10

2.1.2.3. Chapa de alta densidade (HDF) 11

2.1.3. Produção de painéis de aglomerado chapa de média densidade (MDF) e chapa dura no Brasil 11

2.1.4. Exploração florestal no Brasil 12

2.2. Etapas do processamento da matéria-prima *Eucalyptus grandis* 17

2.2.1. Características do *Eucalyptus grandis* utilizado 17

2.2.2. Colheita e transporte do *Eucalyptus grandis* na lavoura 22

2.2.3. Estocagem de madeira na fábrica 23

2.2.4. Picagem das toras 27

2.2.5. Processos de fabricação de chapa de fibras de madeira 28

2.3 Cenário das fontes energéticas: energia elétrica e lenha no Brasil 31

2.3.1. Energia elétrica 31

2.3.2. Lenha 33
2.4. Importância do aproveitamento dos resíduos de *Eucalyptus* 34
2.4.1. Características físico-químicas dos resíduos 35
2.4.2. Estimativa da quantidade de resíduos gerados 39
CAPÍTULO 3. MATERIAIS E MÉTODOS 43
3.1. Identificação e caracterização da unidade industrial onde foi aplicada a pesquisa 43
3.1.1. Ciclo termodinâmico 44
3.1.2. Dados e parâmetros do ciclo termodinâmico 46
3.1.3. Consumo de combustíveis 47
3.2. Determinação do peso dos resíduos florestais (cascas) descartados do processo 47
3.2.1. Fluxograma do processo de preparação da madeira 51
3.2.2. Peso das cascas de *Eucalyptus*, descartados do processo 52
3.3. Determinação do poder calorífico das cascas e cavacos de *Eucalyptus grandis* (lenho) 52
3.3.1. Poder calorífico superior (PCS) da casca e do lenho 52
3.3.2. Poder calorífico inferior (PCI) da casca e do lenho 53
3.3.3. Determinação da Umidade a Base Úmida (Ubu) e da umidade com base em massa seca (Ubs) da casca e do lenho (cavacos de madeira) 53
3.3.4. Determinação da densidade do Lenho 54
3.4. Metodologia para elaboração de planilha de custo da casca e madeira utilizada para produção da energia térmica 56
3.5. Procedimentos para elaboração dos cálculos para aproveitamento das cascas e dos custos da madeira na geração de energia térmica da empresa 58
CAPÍTULO 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO 60
4.1. Informações gerais sobre consumo e preços 60

4.2. Cálculo do aproveitamento das cascas como combustível para geração de energia térmica requerida pela unidade industrial 61
4.2.1. Geração média de cascas 61
4.2.2. Poder Calorífico Superior das cascas geradas e dos cavacos de *Eucalyptus grandis* 61
4.2.3. Poder Calorífico Inferior (PCI) da casca de *Eucalyptus grandis* 62
4.2.4. Poder Calorífico Inferior (PCI) do lenho (cavacos de madeira) de *Eucalyptus grandis* 62
4.2.5. Quantidade de vapor que pode ser produzido com a queima das cascas 63
4.2.6. Massa de madeira (cavacos), que se pode economizar com a queima das cascas 64
4.2.7. Conversão de massa para volume de madeira a ser economizada 64
4.3. Aferição da viabilidade econômica comparativa entre o aproveitamento dos resíduos florestais e a madeira utilizada na geração de energia térmica da empresa 65
4.3.1. Investimentos necessários para implantação do projeto 65
4.3.2. Despesas anuais decorrentes da implantação do projeto 66
4.3.2.1. Depreciação 66
4.3.2.2. Sobressalentes 67
4.3.2.3. Manutenção 67
4.3.3. Custo evitado com a madeira para geração de energia térmica com a implantação do projeto 68
4.3.4. Custo atual com madeira para geração de energia térmica 68
4.3.5. Custo previsto com madeira para geração de energia térmica com a implantação do projeto, sem levar em consideração as despesas com manutenção e sobressalentes 69
4.3.6. Custo previsto com madeira para geração de energia térmica com a implantação do projeto, levando-se em consideração as despesas de manutenção e sobressalentes 69

4.4. Análise da viabilidade econômica da aplicação das cascas para geração de energia térmica 69

4.4.1.Resultados obtidos da planilha de cálculo – Tabela 4.3. 70

5. CONCLUSÕES 72

5.1. Aspectos técnicos 72

5.1.1. Poder calorífico da madeira e da casca de *Eucalyptus grandis* 72

5.1.2. Quanidade de cascas de *Eucalyptus* grandis geradas 73

5.1.3. Volume de madeira que se pode economizar com a queima das cascas 73

5.2. Aspectos econômicos 73

REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS 74

ANEXOS 80

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1.: Produção de painéis de fibra de madeira no Brasil. Fonte: ABIPA (2006). 11

Figura 2.2.: Cadeia produtiva da madeira. Fonte: Juvenal (2002). 13

Figura 2.3.: Uso do solo brasileiro. Fonte: ABIMCI (2003). 14

Figura 2.4.: Área de floresta de *Pinus* e *Eucalyptus* do Brasil – por estado Fonte: ABIMCI (2003). 14

Figura 2.5.: Distribuição das áreas de florestas de *Pinus* no Brasil – por estado. Fonte: ABIMCI (2003). 15

Figura 2.6.: Distribuição das áreas de florestas de *Eucalyptus* do Brasil – por estado. Fonte: ABIMCI (2003). 16

Figura 2.7.: Investimento do setor florestal no Brasil – por estado. Fonte: ABIMCI (2003). 16

Figura 2.8.: Sistema de colheita e transporte de toras na Duratex S.A. Fonte: Elo (2005) 24

Figura 2.9.: Distribuição de freqüência de abrasividade nos painéis de chapas duras de fibra de madeira. Fonte: Duratex Jundiaí – 1988, 1989, 2001 (Documento interno TE 11/88; TE 3-6/88; TE 02/89; TE 3-01/89; planilha de controle de qualidade (2001). 25

Figura 2.10.: Pátio de toras. Fonte: Duratex S.A. (2006). 26

Figura 2.11.: Pátio de cavacos ao ar livre. Fonte: Duratex S.A. (2006). 26

Figura 2.12.: Pátio de cavacos em silos. Fonte: Duratex S.A. (2006). 27

Figura 2.13.: Picador de toras. Fonte: Duratex S.A.(2006). 27

Figura 2.14.: Representação esquemática dos processos de fabricação de painéis. Fonte: Kollmann et al. (1975). 29

Figura 2.15.: Estrutura da oferta interna de energia elétrica no Brasil ano de2004. Fonte: Ben (2005). 32

Figura 2.16.: Participação percentual do consumo de lenha por setores no Brasil. Fonte: Ben (2005). 33

Figura 2.17.: Poder calorífico da casca em função do teor de umidade. Fonte: LIMA et al. (1988). 38

Figura 2.18.: *Eucalyptus grandis.* Variação da percentagem de casca no sentido base-topo. Fonte: SCQE – Setor de Química, Celulose e Energia – ESALQ – USP (1983). 42

Figura 3.1.: Ciclo termodinâmico da Duratex – Unidade Botucatu Fonte: Duratex S.A. (2006). 45

Figura 3.2.: Mesa alimentadora de toras do picador número 1. Fonte: Duratex S.A. (2006). 48

Figura 3.3.: Mesa alimentadora de toras do picador número 2 Fonte: Duratex S.A. (2006). 49

Figura 3.4.: Peneira de discos do processo de fabricação de chapa dura. Fonte: Duratex S.A. (2006). 49

Figura 3.5.: Peneira de discos do processo de fabricação de MDF e HDF. Fonte: Duratex S.A. (2006). 50

Figura 3.6.: Monte de cascas de *Eucalyptus.* Fonte: Duratex S.A. (2002). 50

Figura 3.7.: Fluxograma do processo de preparação de madeira. Fonte: Duratex S.A. (2006). 51

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1.: Produção anual de painéis de fibra de madeira da Duratex S.A. Fonte: Junior, (2005). 12

Tabela 2.2.: Divisão florestal da Duratex S.A. Fonte: Junior (2005). 17

Tabela 2.3.: Consumo de madeira (processo e energia) na Duratex S.A. Fonte: Duratex Florestal (2005). 18

Tabela 2.4.: Rendimento em plantio de *Eucalyptus grandis* no Estado de São Paulo. Fonte: Lima et al. (1988). 19

Tabela 2.5.: Poder calorífico superior de algumas espécies de madeira: base seca. Fonte: Pera (1990). 36

Tabela 2.6.:Poder calorífico inferior (PCI), peso específico e umidade de alguns resíduos da indústria madeireira. Fonte: Pera (1990). 37

Tabela 2.7.:Quantidade de árvores cubadas e valores médios de volume de casca (m^3) e percentagem de casca por espécie, idade, local e método de regeneração. Fonte: NETO et al. (1991). 40

Tabela 2.8.:Valores médios de volumes totais e volumes de casca, em m^3, dos plantios de *Eucalyptus* de diferentes idades e condições de local, espécie e método de regeneração. Fonte: NETO et al. (1991) 41

Tabela 2.9.:Teor de cascas de espécies de *Eucalyptus*. Fonte: SCQE – Setor de Química, Celulose e Energia – ESALQ – USP (1983). 42

Tabela 3.1.: Principais características da Fábrica Duratex – Botucatu. Fonte: Duratex S.A. (2006). 44

Tabela 3.2.: Dados das caldeiras que operam na unidade industrial. Fonte: Duratex S.A. (2006) 46

Tabela 4.1.: Investimento necessário (R$) 66

Tabela 4.2.: Demonstrativo de despesas (R$/ano) 68

Tabela 4.3.: Viabilidade técnico econômico para aproveitamento de cascas de *Eucalyptus grandis* como combustível 71

SIMBOLOGIA

D: depreciação anual do bem, (R$/ano);

I: taxa de desconto relevante para a empresa, (%);

%CV: percentagem de casca em volume, (%);

Vc/c: volume da amostra com casca, (m^3);

Vs/c: volume da amostra sem casca, (m^3);

PCS: poder calorífico superior, (cal/g);

K: idade do bem, (anos);

Lt: valor resultante do fluxo de caixa no período em análise, (R$);

Lv: calor latente de vaporização da água: 540 kcal/kg;

Ma: massa de água, (g);

Mcasca: massa de casca úmida, (kg/dia);

Mmadeira: massa de madeira úmida, (kg/dia);

Mo: massa seca, (g);

Ms: massa seca da amostra, (g);

Mu: massa úmida, (g);

n: horizonte do projeto, (anos);

PCS: poder calorífico superior, (kcal/kg);

PCI: poder calorífico inferior, (kcal/kg);

PCIcavaco: poder calorífico inferior do cavaco de madeira, (kcal/kg);

PCIcasca: poder calorífico inferior da casca, (kcal/kg);

Ubu: umidade a base úmida, (%);

T: ano em análise;

V: vapor que se pode obter com a queima das cascas, (kg/dia);

Vf: valor final ou residual (sucata) do bem, (R$);

Vi: valor inicial (de compra) do bem, (R$);

Vmadeira: volume equivalente de madeira úmida, (m^3(sólido)/dia);

Vpl: valor presente líquido, (R$).

Letras Gregas:

ρmadeira: densidade da madeira: 774,5 kg/m^3;

Δh: diferença das entalpias entre o vapor na saída das caldeiras: 559,31 kcal/kg;

μ: rendimento das caldeiras (adotado como premissa 80%);

Δt: gradiente de temperatura antes e após a combustão (°C).

RESUMO

A crise de combustíveis derivados de petróleo a partir do ano de 1970 levou as empresas brasileiras a avaliar a viabilidade econômica de aproveitamento inteligente e racional de resíduos industriais como insumos energéticos, até então descartados em seus processos de fabricação. A segurança da economia brasileira impõe medidas de aproveitamento mais eficaz do combustível e exige providências para intensificar a utilização de outras fontes energéticas e abundantes, (Pêra 1990). Os custos da energia podem ser reduzidos pelo emprego de combustíveis mais econômicos e de produtos residuais Andritz (1997). Em industrias de produção de chapas de fibras de madeira, o *Eucalyptus grandis* é utilizado como fonte de matéria prima e também como combustível (biomassa) para geração de energia térmica em forma de vapor, água quente e ar quente. A possibilidade do aproveitamento da casca de *Eucalyptus* para a geração de energia nessa unidade industrial, foi que motivou a realização deste trabalho, que teve os seguintes objetivos:

a) quantificar as cascas geradas nas etapas de movimentação de toras e preparação de cavacos de madeira;

b) avaliar a viabilidade técnico-econômica para aproveitamento das cascas como combustível necessário à geração de energia térmica.

A pesquisa foi desenvolvida na empresa Duratex S.A., unidade fabril localizada no município de Botucatu no Estado de São Paulo, onde foram analisados os locais e as quantidades de geração de resíduos, cascas, bem como a verificação de seu poder calorífico e sua respectiva umidade. Foi analisada a necessidade energética da unidade fabril, sob o aspecto de energia térmica. Através dos índices de consumo da empresa foram determinadas as quantidades e os tipos de combustíveis utilizados na produção de calor e vapor demandados pelos processos. Os principais resultados mostraram que a implantação da alternativa proposta de utilização dos resíduos florestais (cascas) para a produção de vapor representa um investimento de R$ 850.500,00 (US$ 386.590,00). A principal conclusão obtida no trabalho foi de que a proposta é viável, indicando o retorno do capital em 2,43 anos, o que significa uma taxa de retorno sobre o capital investido de 76,43% ao ano.

Palavras chaves: balanço de energia, balanço econômico, viabilidade técnica e econômica, poder calorífico, aproveitamento de cascas de *Eucalyptus*.

SUMMARY

The oil derivated fuel crisis, in the beginning of 1970, conduced the Brazilian companies to evaluate the economic viability of intelligent and rational utilization of industrial residues as energetic fuels, until then discarded in its manufature processes. According to Pera (1990), the security guard of the Brazilian economy imposes ways of more efficient use of fuel and demands steps to intensify the use of other abundant energy sources. Following Andritz (1997), the costs of the energy can be reduced by the use of more economic fuels and residual products. In Duratex S/A, industry located in Botucatu, State of São Paulo, the *Eucalyptus grandis* is mostly used as raw material source and also as fuel (biomass) for thermal energy generation in form of steam, hot water and hot air. The possibility to use *Eucalyptus* barks to generate energy at this industrial unit, is that motivated the accomplishment of this work, which contains the following objectives:

a) to quantify the amount of barks generated at log handling and wood chips preparison steps;

b) to evaluate the technical and economic viability to use barks as necessary fuel to generate thermal energy.

The research was developed in Duratex S/A, a manufacturing unit located in Botucatu, State of São Paulo, where the places and the amounts of bark and residues generation had been analyzed, as well as the verification of its calorific power and its respective humidity. The energy needs of this manufacturing unit was analyzed under the thermal energy´s aspect. Through the indices of control of the company, the amounts and the

types of fuels used to produce heat and steam demanded by the process had been determined. The main results show that the implantation of the proposed alternative to use forest residues to produce steam, represents an investment of R$ 850.500,00 (US$ 386.590,00). The main conclusion of this job shows that the proposal is viable and indicating that the investiment returns in 2,43 years, which means a return tax over the invested capital of 76,43% per year.

Keywords: energetic balance, economic balance, economic and technical viability, calorific power, *Eucalyptus*.barks utilization.

1 INTRODUÇÃO

A crise de combustíveis derivados de petróleo, iniciada no ano de 1970 levou as empresas brasileiras a avaliar a viabilidade econômica de aproveitamento inteligente e racional de resíduos industriais como insumos energéticos, até então descartados em seus processos de fabricação.

A redução das quantidades disponíveis de fontes de energias convencionais, torna viável o aproveitamento racional de inúmeras outras substâncias combustíveis alternativas (resíduos florestais, bagaço de cana de açúcar, etc.), considerados impraticáveis, sob o ponto de vista econômico e ecológico. A previsão para a duração das reservas de carvão, petróleo e gás natural já esta definida para a humanidade. A utilização destas fontes consagradas, embora em processo de crescente limitação, continuarão a ser utilizado pelo ser humano. A segurança da economia brasileira impõe medidas de aproveitamento mais eficaz do combustível e exige providências para intensificar a utilização de outras fontes energéticas e abundantes no país, conforme relata (Pera 1990).

Processos industriais em plantas químicas de papel e celulose, açúcar e álcool, painéis de chapas de fibras de madeira e outras, demandam quantidades significativas de energia térmica em forma de vapor, ar quente e água quente. Impulsionados pelo crescente custo dos insumos energéticos, como dos combustíveis utilizados na geração da energia térmica, e da energia elétrica adquirida das concessionárias, as indústrias devem buscar de

forma permanente o meio mais econômico de utilização das fontes energéticas disponíveis em seus processos produtivos.

Segundo Andritz (1997), os custos da energia em processos industriais podem ser reduzidos pelo emprego de combustíveis mais econômicos. O aproveitamento dos combustíveis próprios, característicos de cada nação, é para muitos países uma obrigação econômica, sendo relevante à necessidade de se aferir a possibilidade de obtenção de energia de produtos residuais.

No processo produtivo de painéis de chapa dura de fibra de madeira, HDF e MDF, na unidade de fabricação da Duratex S/A, localizada em Botucatu, Estado de São Paulo, o *Eucalyptus grandis* é utilizado como fonte de matéria prima e também como combustível (biomassa) para geração de energia térmica em forma de vapor, ar quente e água quente. Para a geração da energia térmica, também é utilizado o óleo combustível de baixo ponto de fulgor (BPF), tipo 2A.

Durante as atividades operacionais de movimentação de toras e preparação de cavacos de *Eucalyptus grandis*, são separados por equipamentos de transporte os resíduos florestais, em sua maioria cascas e lascas refugadas, que podem ser reaproveitados como combustível (biomassa), ou mesmo matéria-prima para o processo produtivo.

1.1 Objetivos.

Considerando-se a produção de resíduos e a necessidade de redução de custos para a produção de energia, elaborou-se esta pesquisa, que contém os seguintes objetivos:

a) Quantificar os resíduos florestais gerados nas etapas de movimentação de toras e preparação de cavacos de madeira;

b) Avaliar a viabilidade técnico-econômica para aproveitamento dos resíduos florestais como combustível necessário à geração de energia térmica.

1.2 Hipóteses.

A vivência no processo de preparação de cavacos de *Eucalyptus*, com acompanhamento permanente sobre o volume de resíduos gerados nesta etapa do processo, permitem destacar duas hipóteses fundamentais:

a) Ser viável ou inviável, sob o ponto de vista técnico, o aproveitamento dos resíduos florestais como matéria-prima no processo produtivo para obtenção de energia térmica;

b) Considerando-se os investimentos e custos operacionais para o processamento dos resíduos florestais, ser viável ou inviável, sob o ponto de vista econômico a implantação do projeto. É possível que a taxa de retorno sobre o investimento apresente satisfatória atratividade.

1.3 Aplicação dos resultados

Os resultados obtidos neste trabalho poderão ser aplicados, na tomada de decisão quanto ao destino dos resíduos florestais gerados nas atividades de processamento de matéria-prima da unidade de fabricação em estudo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Aspectos da produção de chapa de fibra de madeira

2.1.1. Histórico

Segundo Benaduce (1998), a indústria de painéis reconstituídos de madeira foi desenvolvida com intuito de converter madeira barata ou de baixa qualidade, resíduos agrícolas, florestais e de serrarias em produtos com maior valor agregado. Porém as flutuações nas safras, dificuldades de estocagem destas matérias-primas, distância entre madeireiras e indústrias de painéis e, sobretudo, a expansão desta indústria, propiciou a utilização de madeira reflorestada como fonte de matéria-prima. O nível de transformação sofrido pela matéria prima é determinante na classificação dos painéis reconstituídos de madeira, se em fibras, serão painéis de fibras – chapa dura, MDF (Medium Density Fiberboard, chapa de fibra de média densidade), HDF (High Density Fiberboard, chapa de fibra de alta densidade), que na verdade é um MDF com espessura fina e com as características similares ás das chapas duras de fibras.

Ainda segundo Benaduce (1998),as primeiras chapas de fibras que se tem notícia foram feitas no Japão por volta do Século VI A.C. e ficaram conhecidas pelo nome de “papeis duros”, os quais eram usados na construção de paredes de pequenas habitações. Após isso, foi somente em 1772, na Inglaterra, que foi dado o primeiro impulso ao emprego de

chapas leves em construção, quando se patenteou o *"papier maché"* para aplicação não somente em divisórias, portas e móveis, mas também em carruagens. Somente no século XIX é que começou realmente a ser desenvolvido o processo de produção de chapas de fibras, quando foi instalada uma fábrica para produção de chapas semi-duras, a empresa "The Patent Imperable Millboard Co", que utilizava uma máquina para produção de papelão com quatro cilindros formadores. Entretanto, o grande desenvolvimento da indústria de chapas de fibras se deu após a instalação do processo Masonite e Asplund (Defibrator), em 1926 e 1931, respectivamente.

Segundo Maloney (1993), as chapas de média densidade (MDF), somente surgiram na década de 60, considerado, este, o mais recente desenvolvimento na indústria de chapas. O produto foi desenvolvido por Miller Hofft Company of Richomond, sendo que a primeira chapa comercial foi produzida em Deposit, New York. Harry Raddin foi o criador do nome do produto. Baseado na descrição do processo, a partir de 1967 as iniciais MDF passaram a identificar o termo Médium Density Fiberboard (Chapa de Média Densidade). Na década de 80 surgiu no mercado o produto HDF (High Density Fiberboard).

O rápido desenvolvimento experimentado pela indústria de chapas de fibras, com várias alterações no processo, associado à boa aceitação do produto no mercado, fez com que fosse aumentada a necessidade da matéria-prima. Diante disso, as reservas florestais providas de madeira para tal fim foram ampliadas e, hoje em dia, essa indústria não depende de resíduos de serraria ou agrícolas, utilizando madeira reflorestada como fonte de matéria-prima, como é o caso da Duratex, que utiliza o *Eucaliptus grandis* no processo de fabricação de chapas de fibras de madeira.

2.1.2. Definição e característica da chapa de fibra de madeira

A ASTM-D1554 "Standadard Definitions of Terms Relating to Wood-Base Fiber and Particle Panel Material" define os termos usuais e "famílias" de painéis de materiais lignocelulósicos para utilização industrial como componentes de móveis, em construção civil e componentes estruturais. As "famílias" estão compreendidas em dois tipos: painéis de fibras e painéis de partículas. Este termo genérico é aplicado a materiais

manufaturados da madeira ou outras fibras lignocelulósicas ou partículas, onde agentes ligantes ou outros materiais podem ser adicionados durante a fabricação. Este trabalho aborda somente o processo de fabricação de painéis formado de fibras, que são materiais de fibra lignocelulósicas refinadas ou parcialmente refinadas, produzidas por interligação das fibras, por exemplo os painéis de Chapa Dura, MDF e HDF. Os painéis fabricados de materiais lignocelulósicos (usualmente madeira), na forma de pedaços ou partículas, distintas de fibras, combinadas com resina sintética ou outro ligante, mantidas juntas após aquecimento e pressão como é o caso do Aglomerado, OSB e outros, não fazem parte do escopo deste trabalho.

2.1.2.1. Chapa dura

A ABIPA (2006) define a chapa dura como uma chapa plana, produzida com fibras de madeira aglutinadas pelo processo de alta temperatura (calor) e pressão. Não recebe resina sintética, pois é prensada a quente pelo processo úmido que reativa os aglutinantes naturais da própria madeira. O resultado é uma chapa plana de alta densidade (1,0 a 1,15 g/m³), que pode ter várias opções de revestimentos. Estas chapas têm como características serem versáteis para fabricação de uma série de produtos e de aplicações (revestimentos de portas, moveis, divisórias, etc). Possuem superfície lisa e podem receber corte em qualquer direção e serem trabalhadas de diversas formas: estampadas, curvadas, moldadas, usinadas, cizalhadas e pintadas. Isso porque as chapas são produzidas com as fibras do *Eucalyptus* que são aglutinadas pela própria resina natural da madeira (lignina), além de serem termoplásticas e por possuirem alta densidade.

2.1.2.2 Chapa de média densidade (MDF)

O MDF é definido como uma chapa plana de média densidade (0,5 a 0,8 g/cm³), produzida a partir de fibras de madeira (ABIPA, 2006). As fibras aglutinadas com resina sintética são submetidas à alta temperatura e pressão. A característica principal do MDF é sua estabilidade dimensional e excepcional capacidade de usinagem, tanto nas bordas, quanto nas faces. Com densidade adequada e perfeita homogeneidade proporcionada pelas fibras, a chapa de MDF pode ser facilmente pintada e revestida, torneada, entalhada e perfurada. Além disso, por não possuir nós, veios e imperfeições típicas de uma madeira

natural, a chapa tem a vantagem de poder ser usinada de diferentes formas. Tem como matéria-prima básica o *Pinus* e também o *Eucalyptus.*

2.1.2.3 Chapa de alta densidade (HDF)

O HDF é definido como uma chapa plana de alta densidade (0,8 a 0,9 g/cm³), espessura fina (2,5 a 4,0 mm), produzida em processo similar ao do MDF, e com características tecnológicas da chapa dura. A matéria prima em sua fabricação é o *Eucalyptus*.

2.1.3 Produção de painéis de aglomerado, chapa de média densidade (MDF) e chapa dura no Brasil

O Brasil é considerado um dos mais avançados do mundo na fabricação de painéis de madeira aglomerada e de MDF, chapa de fibra de média densidade (ABIPA, 2006). É também o país com maior número de fábricas de última geração. Entre o ano de 1995 até 2004 as empresas investiram mais de US$ 1,2 bilhão destinados à instalação de novas unidades, à atualização tecnológica das plantas já existentes, à implantação de linhas contínuas de produção e aos novos processos de impressa, de impregnação de revestimento e de pintura. A Figura 2.1 ilustra a produção de painéis de madeira aglomerada, painéis de média densidade (MDF) e chapa dura de fibras de madeira no Brasil entre os anos de 2003 e 2005.

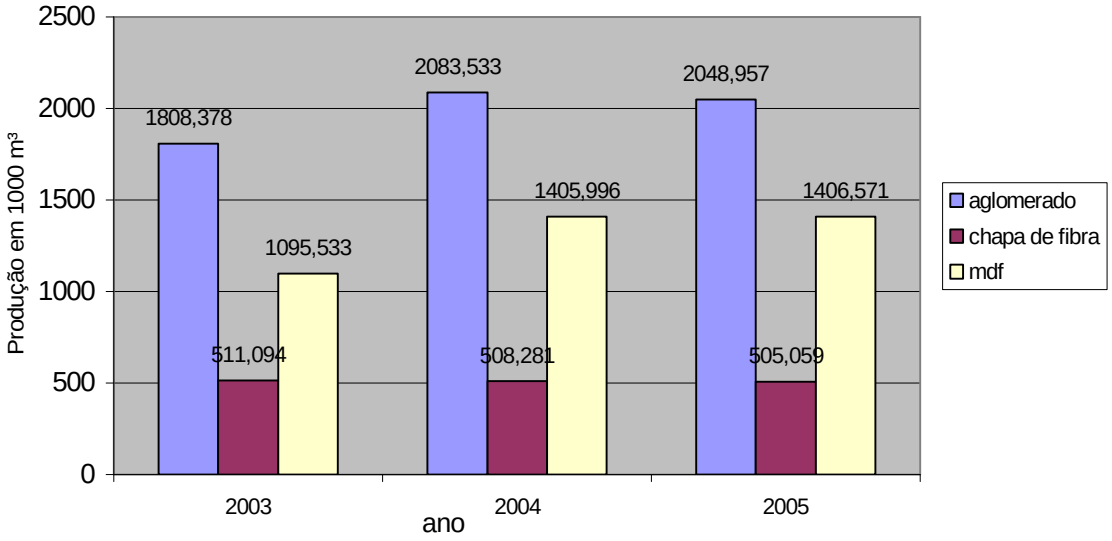


Figura 2.1: Produção de painéis de fibra de madeira no Brasil. Fonte: ABIPA (2006).

O grupo madeira da Duratex, é composto por 4 (quatro) unidades de fabricação de painéis de fibra de madeira, sendo :

- Unidade fabril de Itapetininga, SP – produção de painéis do tipo Aglomerado;
- Unidade fabril de Agudos, SP – produção de painéis dos tipos Média Densidade (MDF) e Alta Densidade (HDF);
- Unidade fabril de Botucatu, SP – produção de painéis dos tipos Chapa Dura (Duratree), Média Densidade (MDF) e Alta Densidade (HDF);
- Fábrica de Jundiaí, SP – produção de painéis do tipo Chapa Dura (Duratree).

A Tabela 2.1 ilustra a capacidade anual de produção de painéis de fibras de madeira das unidades fabris da Duratex S.A.

Tabela 2.1: Produção anual de painéis de fibra de madeira da Duratex S.A.
Fonte: Junior (2005).

Produto	**Unidades**	**Produção**	**Unidade Fabril**
Aglomerado	m³/ano	350.000	Itapetininga SP
Chapa dura	t/ano	350.000	Botucatu SP Jundiaí SP
Média densidade (MDF)	m³/ano	440.000	Botucatu SP Agudos Sp
Alta densidade (HDF)	m³/ano	110.000	Botucatu SP Agudos Sp

2.1.4. Exploração florestal no Brasil

O Brasil além de possuir a segunda maior cobertura florestal do mundo, desenvolveu tecnologia avançada para exploração de florestas e para transformação industrial da madeira (Juvenal & Mattos, 2002). Para efeito de análise e adotando o conceito utilizado para várias organizações internacionais, a atividade florestal é definida como a

extração de madeira para fins industriais e geração de energia, excluindo-se os produtos não madeireiros. A Figura 2.2 ilustra a cadeia produtiva da madeira, contempla a produção de madeira para energia (carvão vegetal e lenha), serrados, painéis e polpa para produção de papel e outras finalidades. A polpa considerada será a celulose utilizada para fabricação de papel.

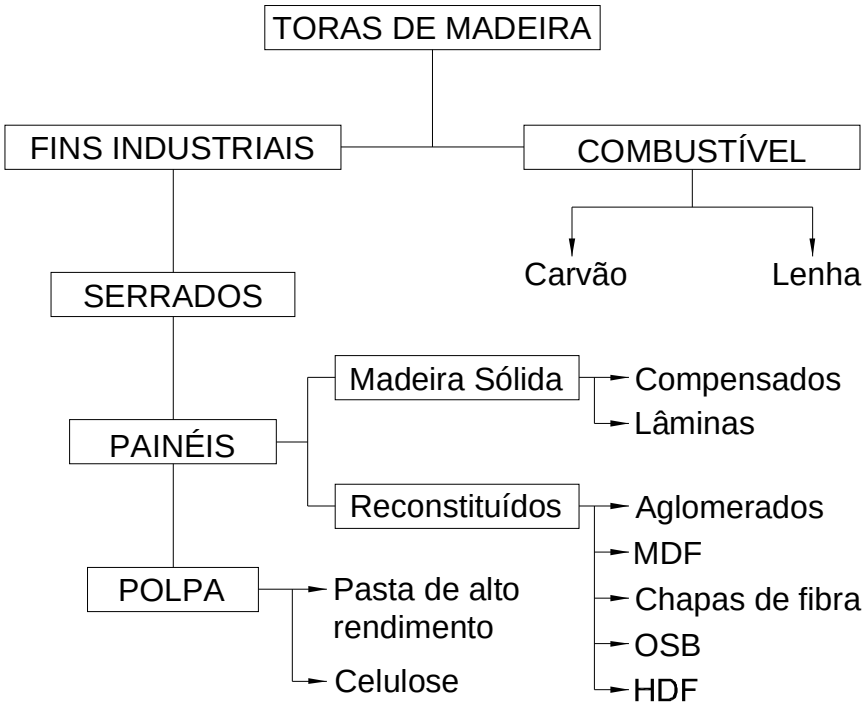


Figura 2.2: Cadeia produtiva da madeira. Fonte: Juvenal & Mattos (2002).

De acordo com a ABIMCI (2003), a base florestal brasileira contempla florestas naturais e plantadas. Da área total do território nacional, cerca de 66% são cobertas por florestas naturais, 0,5% por florestas plantadas e o restante, 33,5% por outros usos, tais como: agricultura, pecuária, áreas urbanas e infra-estrutura dentre outros, conforme é apresentado na Figura 2.3.

Em relação às áreas plantadas, as principais espécies são do gênero *Pinus* e *Eucalyptus*. Entre as outras espécies plantadas encontram-se Acácias, Teca e Araucária. Atualmente o Brasil possui cerca de 4,7 milhões de hectare com plantio das espécies *Pinus* e *Eucalyptus*, sendo que deste total o *Eucalyptus* responde por aproximadamente 64% e o *Pinus* aproximadamente por 36%. A maior concentração em

termos de área plantada está em Minas Gerais, seguida por São Paulo e Paraná conforme ilustra a Figura 2.4.

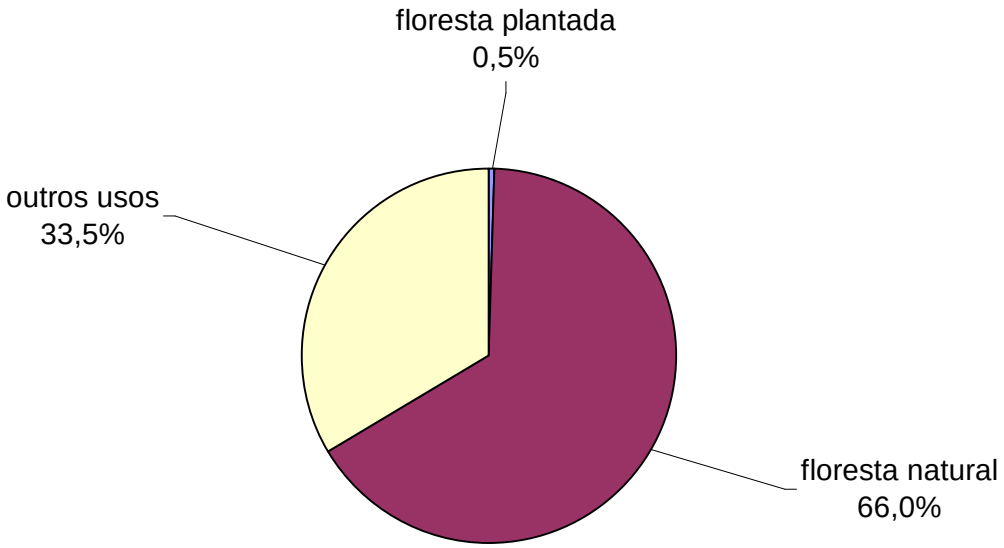


Figura 2.3: Uso do solo brasileiro. Fonte: ABIMCI (2003).

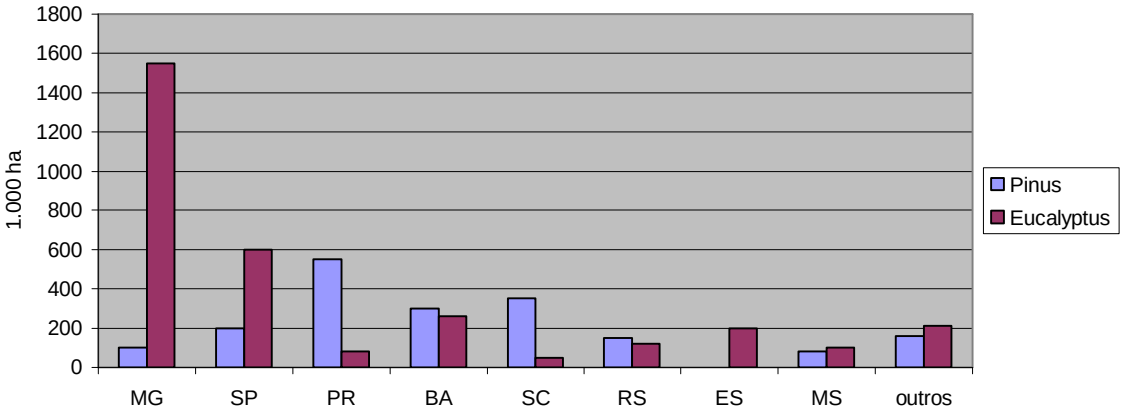


Figura 2.4: Área de floresta de *Pinus* e *Eucalyptus* do Brasil – por estado
Fonte: ABIMCI (2003).

Os Estados que mais destacam em áreas plantadas de *Pinus* são o Paraná, Santa Catarina, Bahia e São Paulo, que juntos somam aproximadamente 73% do total plantado para aplicação principalmente na produção de papel e celulose e de produtos de madeira sólida. As áreas de plantio de *Eucalyptus* concentram-se na Região Sudeste do país, sendo o Estado de Minas Gerais responsável por aproximadamente 51% do total plantado que somado ao Estado de São Paulo, respondem a 70% da plantação total de *Eucalyptus* no Brasil. Esta distribuição esta justificada pela concentração de indústrias de papel e celulose e siderurgia na respectiva região. As Figuras 2.5 e 2.6 apresentam a distribuição das áreas de florestas de *Pinus* e *Eucalyptus* por estado no Brasil.

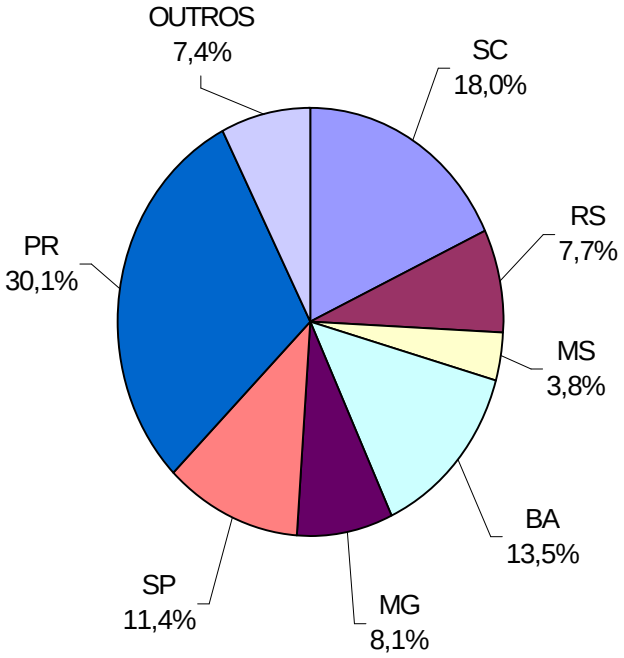


Figura 2.5: Distribuição das áreas de florestas de Pinus no Brasil – por estado.
Fonte: ABIMCI (2003).

O investimento programado até o ano de 2005 pelo setor florestal (madeira, moveis, papel), foi de US$ 12,0 bilhões. Com este montante, o respectivo grupo se classifica entre os doze maiores investidores, ficando a frente de setores como comunicação, bebidas e fumo, financeira, mineração entre outros. Dentre os estados que registram os maiores volumes de previsão de investimentos no respectivo setor, destacam-se: Bahia, Paraná, Minas Gerais, São Paulo, Rio Grande do Sul e Maranhão, conforme ilustra a Figura 2.7.

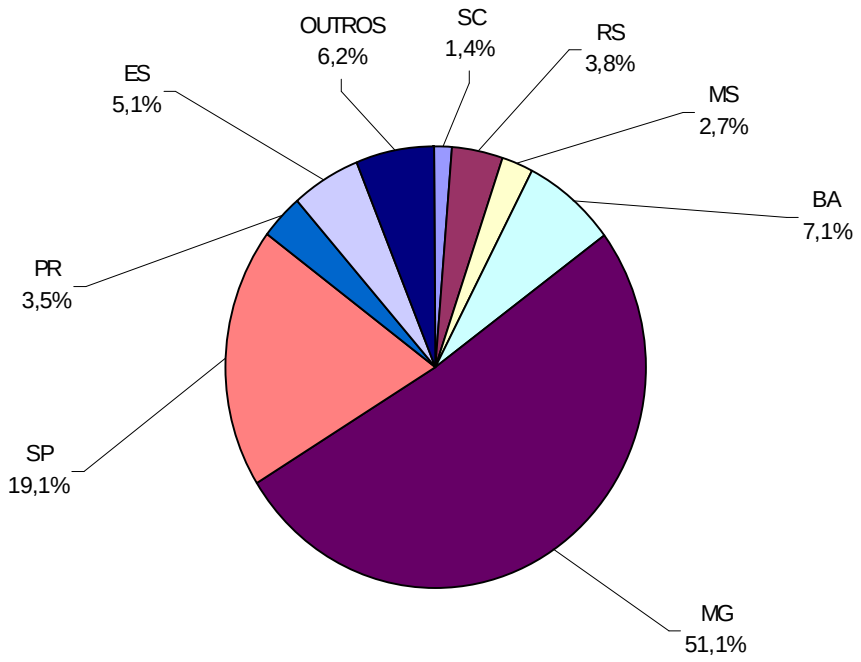


Figura 2.6: Distribuição das áreas de florestas de *Eucalyptus* do Brasil – por estado. Fonte: ABIMCI (2003).

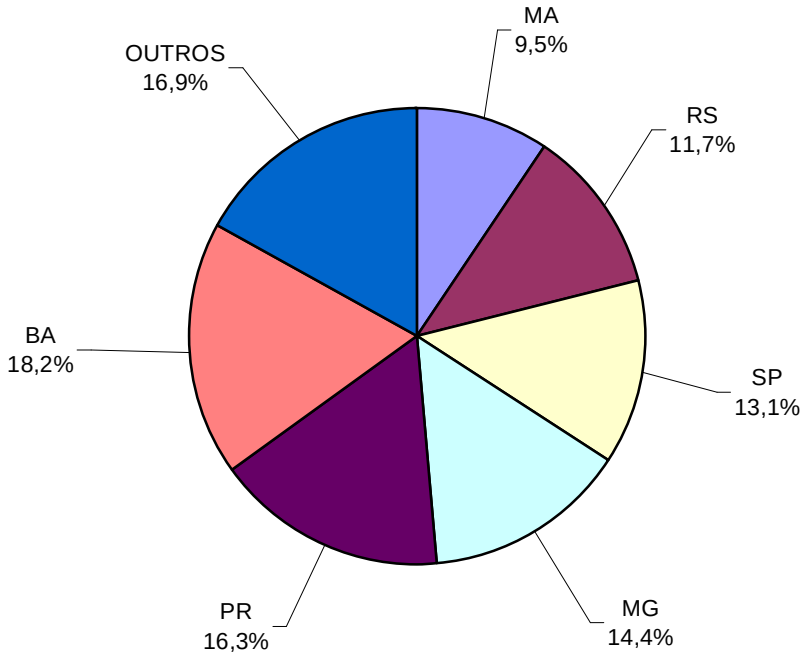


Figura 2.7: Investimento do setor florestal no Brasil – por estado. Fonte: ABIMCI (2003).

Segundo Junior (2005), as florestas de *Eucalyptus* e *Pinus* do grupo madeira da Duratex S.A. estão distribuídas nas regiões de Itapetininga SP, Botucatu SP, Lençóis Paulista SP e Agudos SP, para atender a demanda de consumo de madeira das unidades de produção concentradas no Estado de São Paulo. A Tabela 2.2 apresenta a divisão florestal da Duratex S.A. em números.

Tabela 2.2: Divisão florestal da Duratex S.A. Fonte: Junior (2005).

Área total (ha)	86.000
Área plantada (ha)	65.000
Área de fomento (ha)	1.500
Nº de Fazendas	54
Consumo de Madeira (m^3/ano)	2.900.000
Cultivo de mudas para plantio (ano)	16.000.000

2.2. Etapas do processamento da matéria-prima *Eucalyptus grandis*

2.2.1.Características do *Eucalyptus grandis* utilizado

Em princípio todo e qualquer material lignocelulósico pode ser utilizado como matéria-prima na fabricação de chapas duras, entre eles:

- Resíduos agrícolas (bagaço de cana, fibras de linho, talo de milho, bambu, etc.);
- Resíduos de serraria (pedaços de madeira, serragens e maravalhas);
- Madeira (árvores de várias espécies).

No Brasil, a amplitude e adaptabilidade do *Eucalyptus grandis*, têm incentivado o plantio desta madeira em áreas de reflorestamento. Confirmando isto, Lima (1993), comenta que no Brasil, aumentos significativos de ganho em produtividade vêm sendo obtidos graças a um trabalho cuidadoso de melhoramento desenvolvido principalmente a partir de 1967. Antes dessa data a média de produtividade estava, em geral ao redor de 15 $m^3.ha^{-1}.ano^{-1}$ à idade de sete anos. Com a adoção de técnicas silviculturais mais intensivas

(preparo do solo, fertilização mineral, proteção florestal, etc.) a produção saltou para 21 $m^3.ha^{-1}.\ ano^{-1}$. Com a re-introdução de novos materiais, a partir de escolha criteriosa de procedência mais adequada, chegou-se ao patamar de 40 $m^3.ha^{-1}.ano^{-1}$.

Segundo Junior (2005), a evolução tecnológica e científica, o melhoramento genético, as produções de sementes melhoradas e a clonal fizeram que os patamares da produtividade do setor florestal da Duratex S.A. saltassem de 25 para 45 e, até 65 $m^3.ha^{-1}.ano^{-1}$, e podem aumentar ainda mais com o conhecimento do genoma do *Eucalyptus*, cujo sequenciamento e pesquisas estão sendo realizados.

O volume anual da espécie de *Eucalyptus grandis* utilizado para fabricação de chapas, e geração de energia térmica da unidade de fabricação em estudo esta apresentado na Tabela 2.3.

Tabela 2.3: Consumo de madeira (processo e energia) na Duratex S.A.- Unidade Botucatu
Fonte: Duratex Florestal (2005).

Espécie de *Eucalyptus*	**Volume anual (m^3)**	**Participação (%)**
Grandis	967.998	95
Urograndis	50.947	5
Total	1.018.945	100

O rendimento de uma floresta, em termos gerais, é a quantidade de material lenhoso produzido como colheita florestal, em determinada época do crescimento da árvore (Lima et al., 1988). O rendimento é variável mesmo para uma mesma espécie, em função das condições do meio ambiente em que a árvore se desenvolva, sendo os seguintes fatores que influenciam o desenvolvimento: clima (temperaturas, chuvas, etc.); solo (profundidade, nutrientes disponíveis, permeabilidade à passagem de água, penetrabilidade, conteúdo de matéria orgânica etc.); topografia (altura, exposição ao sol, declividade, etc.).

O rendimento é normalmente medido em volume de madeira produzido em uma unidade de superfície. A unidade de medida mais utilizada é o metro

cúbico de madeira produzida em um hectare plantado (m^3/ha). A Tabela 2.4 ilustra os rendimentos observados em plantios de *Eucalyptus grandis* no estado de São Paulo, e são superiores aos observados em outros países.

Tabela 2.4: Rendimento em plantio de *Eucalyptus grandis* no Estado de São Paulo.
Fonte: Lima et al. (1988).

Tipos de solos	**Rendimento (m^3/ha)**
Solos ricos	
Corte aos 7 anos de idade (talhadia)	375
Corte aos 20 anos de idade (rotação)	631
Corte aos 35 anos de idade (rotação)	774
Solos médios	
Corte aos 7 anos de idade (talhadia)	214
Corte aos 20 anos de idade (rotação)	329
Solos fracos	
Corte aos 7 anos de idade (talhadia)	153
Corte aos 20 anos de idade (rotação)	220
Corte aos 35 anos de idade (rotação)	290

Goes (1985) apresenta a descrição botânica para a espécie de *Eucalyptus grandis*. Alguns itens da descrição são:

Nome científico: *Eucalyptus grandis (Hill) Maiden*;

Porte: É uma árvore de fuste direito, que atinge 40 a 60 m de altura;

Casca: Lisa, de cor esbranquiçada com reflexos alaranjados ou azulados, destacando-se em placas alongadas; quando nova é branca em virtude de um pó que sai com a mão, ficando depois o tronco com a cor esverdeada, sendo seu volume 7,3% e peso de 7,1% da árvore.

Área de cultura: Por ser uma espécie de crescimento rápido é bastante cultivada nos países tropicais e sub tropicais. É sem dúvida, no Brasil, que esta espécie teve maior expansão,

ocupando cerca de 70% da área total de eucaliptal, e concentrando nos estados de São Paulo, Minas Gerais e Espírito Santo, sendo hoje sua madeira utilizada principalmente pela indústria de papel e celulose.

Andrade (1961) relata que o *Eucalyptus* da espécie *grandis* se destaca quanto a sua aplicação na produção de lenha, celulose e chapas de fibras, sendo uma das espécies que mais se desenvolvem no Estado de São Paulo.

Segundo Panshim & Zeeuw (1970), a densidade é uma propriedade que expressa a quantidade de substância por unidade de volume, isto é, peso da madeira por unidade de volume, sendo definida pela relação entre peso da madeira absolutamente seca e o seu volume saturado (umidade acima do ponto de saturação das fibras), expressa em g/cm^3. Essa propriedade é de fácil determinação e representa um excelente índice para a análise da viabilidade do emprego da madeira nas mais diversas finalidades.

Hillis (1978) relata que a densidade básica é um dos principais parâmetros para a determinação da qualidade da madeira, pelo fato de estar correlacionada a diversas características e propriedades de uso do produto final e pela simplicidade de sua determinação. A densidade básica é uma característica passível de melhoramento genético por ser considerada altamente herdável (Baez, 1993).

No gênero *Eucalyptus*, observa-se que a densidade básica pode variar de uma espécie para outra, entre árvores de uma mesma espécie, dentro de uma mesma árvore, com relação à idade do povoamento e ainda com as condições ecológicas da floresta onde esta localizada (Ferreira & Kageiama, 1978). Portanto, os fatores que influenciam essas variações podem ser de ordem genética, ambiental ou resultado da interação entre seus efeitos. Os autores agrupam as espécies de *Eucalyptus* da seguinte forma para as condições brasileiras: madeiras de densidade baixa, variando de 0,430 a 0,500 g/cm^3 no caso dos *Eucalyptus grandis*, *saligna*, *dunnii* e *botryoides*; madeiras de densidade média, variando de 0,500 a 0,580 g/cm^3 para os *Eucalyptus pilularis*, *resinifera*, *propinqua* e *urophyla*, e madeiras de densidade alta apresentando valores acima de 0,580 g/cm^3, observados em *Eucalyptus microcorys* e *cloenziana*.

A umidade natural da madeira é uma propriedade de elevada importância na determinação da qualidade da madeira, ou seja, a umidade da madeira das

árvores vivas, expressa pela relação entre o peso da água contida na madeira recém abatida e o peso da madeira seca (Lopes, 2000).

Acredita-se que a primeira propriedade da madeira descoberta pelo homem foi o seu teor de umidade. A madeira verde era mais mole, enquanto que a mais seca era mais leve e produzia fogo com maior facilidade.

É provável que tenha sido a primeira propriedade da madeira a ser efetivamente investigada, e uma das mais importantes quando se relaciona às múltiplas utilizações da madeira, como na indústria de construção civil e mobiliário. Para indústria de papel e celulose, no entanto, essa propriedade parece não representar influência negativa. Porém, levando-se em conta aspectos como custo de transporte de uma madeira mais pesada e eventual exportação de água da floresta, com reflexos negativos à disponibilidade de água para a segunda rotação, a umidade da madeira passa a ganhar maior importância.

Garcia & Lima (1990), relatam que a exemplo do que ocorre com a densidade básica, a umidade natural da madeira é uma propriedade de fácil determinação e altamente herdável, podendo ser utilizada como bom indicador e seleção genética. Os autores estudando o *Pinus escarpa* e o *Eucalyptus grandis*, constataram variação altamente significativa e correlação inversa entre a densidade básica (Db) e a umidade natural (Un). Árvores de *Eucalyptus grandis* com densidade básica em torno de 0,49 g/cm^3 apresentaram umidade natural de 72,89% e árvores com Db em torno de 0,38 g/cm^3 apresentaram umidade variando de 101,58% a 123,89%, demonstrando haver também grande variabilidade nos resultados. Os pesquisadores concluíram que as árvores selecionadas, em programas de melhoramento, para altas densidades devem apresentar menores teores de umidade natural.

Segundo Costa (2005), a determinação da densidade básica da madeira é um dos principais ensaios tecnológicos realizados nas plantações comerciais para o gênero *Eucalyptus*, e um dos mais importantes parâmetros para avaliação da qualidade da madeira. É um índice utilizado para análises econômicas da floresta, e em termos práticos pode nortear a aplicação final da madeira. Os métodos utilizados para obtenção de amostras objetivando a determinação da densidade básica da madeira são:

a) Método destrutivo: Neste método é necessário o abate das árvores para retirada de discos ou cavacos (amostras) das árvores;

b) Métodos não destrutivos: Nos métodos não destrutivos são efetuadas pequenas inserções, e ou, pequenas quantidades de amostras são retiradas da árvore sem que seja necessário o abate da mesma. Os principais métodos aplicados neste grupo são: método de imersão, método do máximo teor de umidade, método de medição direta do volume, método da flutuação e método raio X.

2.2.2. Colheita e transporte do *Eucalyptus grandis* na lavoura.

No setor florestal, a colheita e o transporte de madeira são etapas mais importantes, economicamente, dada a sua alta participação no custo final do produto e os riscos de perdas envolvidas nessas atividades (Machado & Lopes 2000).

Segundo Andrade (1998), em torno de 40 a 50% dos custos de produção de celulose é devido ao produto florestal e, destes cerca de 50% referem-se aos custos de colheita e transporte.

No Brasil, os sistemas manuais e semi-mecanizados de colheita foram amplamente utilizados por faltas de alternativas, empregando-se grande número de mão-de-obra, tornando a operação onerosa e muito perigosa Duratex (1997).

Com o aumento da demanda dos produtos florestais, necessidade de maior rendimento das operações, escassez de mão-de-obra, aumento dos custos sociais e abertura do mercado às importações de máquinas de alta tecnologia, houve uma intensificação da mecanização do setor florestal. Estes fatores levaram a mecanização a priorizar a busca do aumento da produtividade e do controle mais efetivo dos custos (Mendonça Filho, 1997). A mecanização possibilitou o aumento da produtividade das operações de colheita, e a diminuição da participação do homem no processo produtivo (Santos, 1995).

A escolha do sistema operacional a ser empregado varia em função de vários fatores, tais como topografia do terreno, declividade, solo, clima, comprimento da árvore, incremento da floresta e uso da madeira. A sua seleção deve ser baseada em uma criteriosa análise técnica e econômica, conforme mostra (Machado 1985).

Até o ano de 1995, a Duratex Florestal utilizava um sistema semi-mecanizado nas atividades de colheita e transporte de toras de *Eucalyptus grandis*. Na época o

corte e o desgalhamento das árvores eram feitos manualmente com a utilização de moto serra, com comprimento de toras de 2,5 m, até o ano de 1993, e 4,0 m, até o ano de 1994.

A partir do ano de 1994, a empresa adotou como medida para ganhos de rendimentos operacionais com menores custos nas atividades de corte e colheita, a utilização de toras de *Eucalyptus grandis* com 6,0 m de comprimento, e no ano de 1996 optou pela mecanização de todas as atividades na lavoura. Para o abastecimento das toras da unidade produtiva de Botucatu, a Duratex Florestal utiliza o sistema de colheita e transporte de *Eucalyptus grandis*, conforme a Figura 2.8.

O sistema semi-mecanizado, com comprimento de toras mais curto anteriormente aplicado nas atividades de corte e colheita, era mais oneroso em termos operacionais e produtividade, se comparado com o sistema mecanizado, atualmente utilizado pela empresa. Porém, o sistema anterior apresentava vantagens em relação ao sistema atual, no que diz respeito à quantidade de areia impregnada nas toras, proveniente da floresta e aderida às toras durante as atividades de corte e colheita.

Com o corte em manual, e uso de toras com comprimento menores, isto é, 2,5 a 4,0 m, as atividades no campo eram mais cuidadosas e a madeira chegava à fábrica mais limpa, com menor quantidade de areia, principalmente nas cascas das toras que além de ficarem na parte externa, possuem maior facilidade de aderência de areia. Após a implantação do sistema mecanizado e utilização de toras com 6 m de comprimento, notou-se um aumento significativo na quantidade de areia junto à matéria-prima, refletindo diretamente na qualidade do produto no que diz respeito à abrasividade das chapas de fibras produzidas, dificultando ainda mais a recuperação dos resíduos florestais em sua maioria cascas de *Eucalyptus grandis*, devido ao alto índice de areia aderido às mesmas.

A Figura 2.9 ilustra a distribuição de freqüência do comportamento da abrasividade nos painéis de chapas de fibra em situações antes e após a mecanização das atividades de cortes e colheita na floresta.

2.2.3. Estocagem de madeira na fábrica.

Devido à necessidade de adequação do modelo operacional do abastecimento de toras e produção de cavacos com o processo produtivo, faz-se necessário manter na fábrica um estoque mínimo de cavacos e de toras de *Eucalyptus grandis* para

assegurar o funcionamento ininterrupto da produção de chapas. Na Duratex (Unidade de Botucatu), o estoque de cavacos é feito em pilhas ao ar livre e em silos fechados enquanto o estoque de toras é feito somente em pilhas ao ar livre.

- Corte

Equipamento: Harvesters

Perfil da operação : Corte, desgalhamento de *Eucalyptus*

Produção: 150 árvores/h

- Remoção

Equipamento: Forwarders

Perfil da operação: Transporte primário, ou seja, a remoção das toras já cortadas, de dentro da floresta para a periferia dos talhões de modo a evitar tráfego de caminhões dentro da mesma.

Produção: 42 m^3/h

- Carga

Equipamento: Carregador Florestal

Perfil da operação: Carregamento de toras nos reboques de Transporte dentro da floresta.

Produção: 65 m^3/h

- Transporte

Equipamento: Caminhão (cavalo mecânico + reboque + semi-reboque)

Perfil da operação: Transporte de toras da floresta para a fábrica

Produção: 54 m^3/viagem

Figura 2.8: Sistema de colheita e transporte de toras na Duratex S.A. Fonte: Junior (2005).

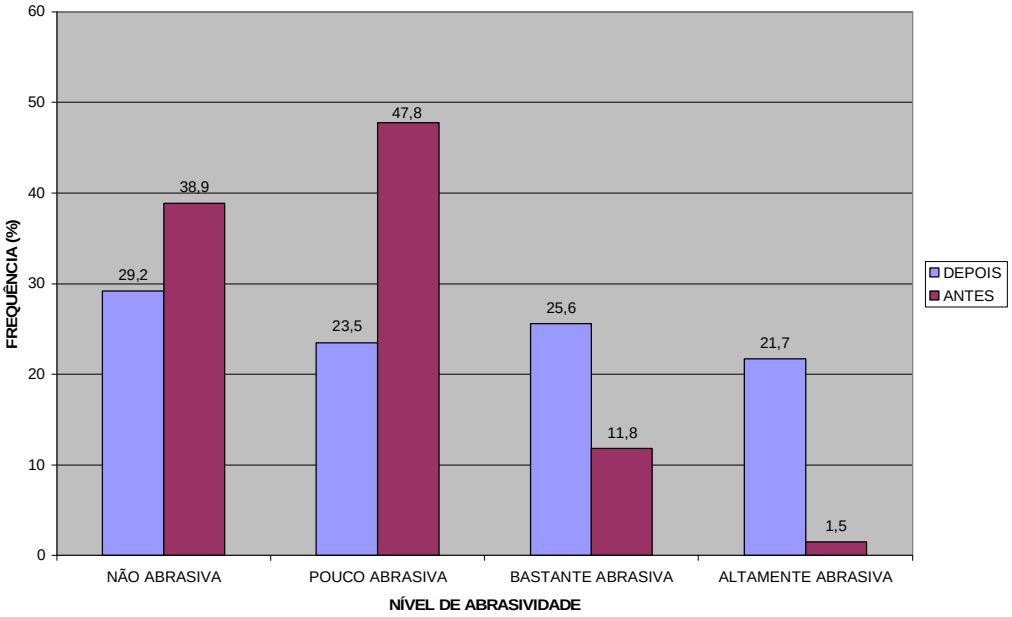


Figura 2.9: Distribuição de freqüência de abrasividade nos painéis de chapas duras de fibra de madeira antes e após a implantação do sistema mecanizado. Fonte: Duratex Jundiaí 1988, 1989, 2001 (Documento interno TE 11/88; TE 3-6/88; TE 02/89; TE 3-01/89; planilha de controle de qualidade (2001).

Segundo Ponce & Watal (1985), o principal objetivo da secagem da madeira ao ar livre é fazer com que a maior quantidade possível de água evapore naturalmente.

Santini (1985), afirma que o pátio de secagem ao ar livre deve ser, preferencialmente junto às serrarias ou indústrias que utilizarão a madeira, reduzindo o custo com o transporte. Deve estar situado em lugar alto, seco, bem ventilado, com pouco desnível e longe dos rios, brejos e lagos. A vegetação da área e a matéria orgânica em decomposição devem ser eliminadas, sendo possível encascalhar o pátio, prevendo a localização de pilhas, das áreas de circulação, de transporte e manuseio da madeira.

Embora não seja objetivo da Duratex estocar a madeira ao ar livre para secagem da mesma, a evaporação da água contida na madeira durante o período de estocagem contribui significativamente para aumento de seu poder calorífico inferior, ou seja, aumento na quantidade de energia que se pode retirar da madeira e cascas. As Figuras 2.10, 2.11 e 2.12, mostram os modelos de estocagem de toras e cavacos utilizados no processo de fabricação de chapas em Botucatu, SP.

Figura 2.10: Pátio de toras. Fonte: Duratex S.A. (2006).

Figura 2.11: Pátio de cavacos ao ar livre. Fonte: Duratex S.A. (2006).

Figura 2.12: Pátio de cavacos em silos. Fonte: Duratex S.A. (2006).

2.2.4. Picagem das toras

A picagem das toras é a primeira fase do processamento da madeira dentro da indústria de chapas de fibras de madeira, conforme a Figura 2.13. Nessa fase a tora de madeira é submetida à ação de facas que a transforma em pequenos fragmentos denominados cavacos, cuja área superficial média oscila entre 6 e 10 cm^2 e a espessura média é inferior a 1 cm.

Figura 2.13: Picador de toras. Fonte: Duratex S.A.(2006).

2.2.5. Processos de fabricação de chapa de fibras de *madeira*.

Kollmann et al. (1975), classificam os métodos de fabricação dos painéis em úmido, semi-seco e seco. A tecnologia de fabricação de painéis é de domínio público e utilizado em função de suas particularidades. A geração de efluente altamente poluente foi fator predominante na inviabilização do processo úmido em alguns países do mundo. Pelos processos úmido e semi-seco são fabricados painéis formados de fibra – chapa dura de fibras. No processo seco há a necessidade de utilização de resinas na proporção de até 10% sobre o peso final da chapa, o que onera o produto final. Entretanto, este processo é largamente utilizado, para fabricação de chapas de partículas e MDF. Os processos de fabricação de painéis estão ilustrados na Figura 2.14.

Benaduce (1998) relata a descrição sucinta dos processos de fabricação de painéis de madeira da seguinte forma:

a) Processo úmido.

Pelo processo úmido é fabricada a chapa dura de fibras. O material lignocelulósico é transformado em cavacos, os quais são pré-aquecidos com vapor d'água saturado, a temperatura entre 120 e 180º.C, ocorrendo o amolecimento da camada ligante das fibras do material. No desfibramento, por ação mecânica, geralmente aplicada aos cavacos entre dois discos ranhurados, há a separação da madeira em fibras, produzindo a denominada polpa "*Asplund*". Eventualmente, pode haver refinação com o objetivo de diminuir o comprimento das fibras produzidas. A polpa obtida sofre uma série de diluições em água até atingir concentração de cerca de 1%, após a adoção de aditivos no processo, tais como: sulfato de alumínio e parafina, podendo-se também adicionar resinas, para se obter melhoria tecnológica da chapa. A polpa é enviada para uma máquina formadora, onde é conformada em uma manta de fibras. A passagem subseqüente por calandras expulsa, através de ação mecânica, parte da água desta manta. A água retirada é enviada, em parte, para os tanques de diluição, e outra parte para o esgoto. O colchão de fibras que sai da máquina formadora contém, geralmente, três partes de água e uma de fibra e é depositada sob este uma tela de aço suportada por uma bandeja, também de aço, sendo o conjunto prensado a quente, a uma temperatura em torno de 200 ºC. Cerca de dois terços de água contida no colchão é expulsa

mecanicamente durante a prensagem e vai tornar efluente, sendo o restante evaporado na operação de prensagem.

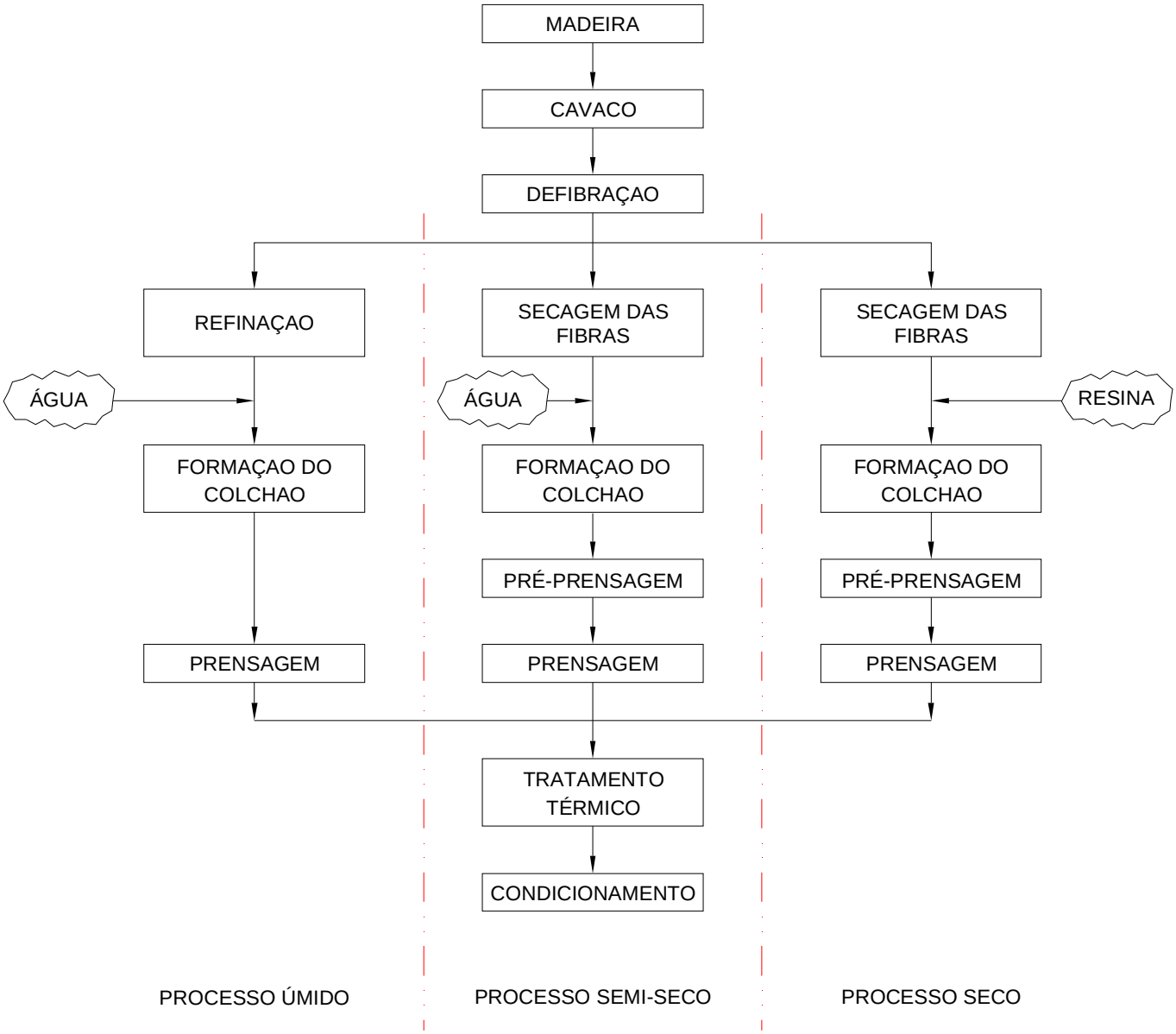


Figura 2.14: Representação esquemática dos processos de fabricação de painéis.
Fonte: Kollmann et al. (1975).

Após a prensagem, a chapa passa para o tratamento térmico, onde adquire resistência à água e posteriormente a um sistema de umidificação, objetivando um melhor condicionamento do material ao meio ambiente ao qual ele ficará exposto. Apesar de universalmente aceito e conhecido, o processo úmido tem uma série de desvantagens, a saber:

- altamente poluente, devido aos açúcares contido no seu efluente industrial;
- consumo elevado de energia calorífica, devido à necessidade de se secar um colchão de fibras, contendo três partes de água e apenas uma parte de fibras de material lignocelulósico;
- facilidade de corrosão dos equipamentos devido à agressividade do meio, proveniente dos ácidos gerados na hidrólise da madeira;
- elevação de ônus no custo de instalações e equipamentos em função da operação complementar de refinação;
- necessidade de tanques com volume apreciável para armazenamento de água e polpa, devido aos grandes volumes de água envolvido no processo úmido;
- possibilidade de contaminação do processo por microorganismos.

b) Processo semi-seco.

Na fabricação de painéis pelo processo semi-seco, algumas etapas são iguais ao processo úmido, tais como: a preparação da polpa, a prensagem do colchão, o tratamento térmico das chapas e o tratamento de umidificação. A diferença é que após a desfibração dos cavacos, a polpa resultante é enviada a um túnel de secagem onde entra com umidade entre 40 e 50%, saindo com umidade entre 10 e 35%. Após a saída do túnel, a polpa é enviada a um silo de armazenamento, cuja finalidade é suprir de modo constante e uniforme, a máquina formadora de colchão de fibras. Neste equipamento, o colchão é umidificado intensamente na sua superfície, de modo a ter homogeneamente de 50 a 60 kg de água para cada 100 kg de colchão formado.

c) Processo seco.

No processo de fabricação de chapas de material lignocelulósico, por via seca, a polpa também é produzida através de um desfibrador pressurizado, semelhante ao processo úmido. A polpa ao sair do desfibrador, passa por um secador, onde vai perder quase que completamente a umidade, a qual estará entre 4 e 0%. Após a perda da umidade, a polpa

recebe as resinas que irão consolidar as fibras durante a prensagem, há a formação do colchão e posteriormente a prensagem a 200°c.

O processo seco também apresenta uma série de incovenientes:

- necessidade da secagem completa das fibras do material lignocelulósico;
- risco de incêndio nas instalações, devido à baixa umidade das fibras;
- necessidade de adição de resinas às fibras, para que estas possam aderir umas as outras durante a prensagem;
- resinas, que podem ser dos tipos uréia, fenólica, melamínica, chegam à proporção de até 8 a 10% em peso sobre o peso final da chapa;
- elevado preço das resinas em algumas regiões do mundo, o que pode inviabilizar uma fábrica de chapas de fibras pelo processo seco.

2.3 Cenário das fontes energéticas: energia elétrica e lenha no Brasil

2.3.1 Energia elétrica

Segundo Ben (2005), a geração de energia elétrica no Brasil, em centrais de serviço público e de autoprodutoras, atingiu 387,5 TWh em 2004, resultando 6,3% superior ao ano de 2003, repetindo a performance do ano anterior. Compõem este resultado as seguintes fontes de geração:

- Geração hidráulica pública de 308.6 TWh, com 4,9% de acréscimo;
- Geração térmica pública de 41,0 TWh, com significativos 17% de acréscimo;
- Geração de autoprodutores de 37,9 TWh, com 8,1% de acréscimo.

A geração em centrais termoelétricas a partir da fonte nuclear em 2004 novamente declinou, passando de 13,4 TWh em 2003 para 11.6 TWh, com taxa negativa de 13,1% em relação ao ano anterior. Já a geração em centrais termoelétricas a gás natural continuou a trajetória de forte crescimento, saltando de 13,14 TWh em 2003 para 19,28 TWh em 2004, representando 5% da geração de energia elétrica do país. A Figura 2.15 apresenta a estrutura da oferta interna de energia elétrica no ano de 2004.

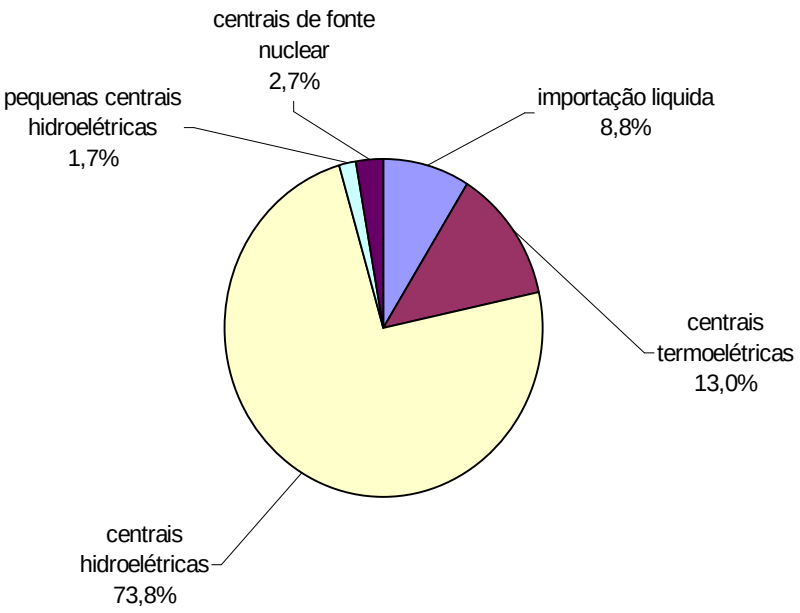


Figura 2.15: Estrutura da oferta interna de energia elétrica no Brasil ano de 2004.
Fonte: Ben (2005).

O consumo de eletricidade no Brasil atingiu 359,6 TWh em 2004, montante de 5,1% superior ao ano de 2003. Em 2004, com acréscimo de 4,2 GW, a capacidade instalada das centrais de geração de energia elétrica do Brasil atingiu o montante de 90,7 GW, incluindo centrais de serviço público e autoprodutoras. As principais usinas que entraram em operação foram:

- UTE Norte Fluminense, RJ – unidades 1 e 2 (857 MW);
- UHE Tucuruí, PA – unidades 16 e 17 (750 MW);
- UTE Termopernambuco, PE (534 MW);
- UTE Nova Piratininga, SP (385 MW);
- UTE Três Lagoas, MG – unidade 1 (258 MW);
- UTE Termorio, RJ – unidade 1 (219 MW);
- UTE Termobahia, BA (186 MW).

Em 2004 a energia hidráulica contribuiu com 14,4% da Matriz Energética Brasileira, resultado semelhante ao do ano anterior. Já a eletricidade contribuiu 16,2% do consumo final de energia.

2.3.2. Lenha.

De acordo com Ben (2005), a utilização da lenha no Brasil é ainda significativa, principalmente nas carvoarias para produzir carvão vegetal e na cocção de alimentos nas residências. Em 2004, o setor residencial consumiu cerca de 26 milhões de toneladas de lenha (1,4% superior ao consumo de 2003), na cocção de alimentos. Já o carvão vegetal apresentou um consumo de 40 milhões de toneladas, em razão do forte crescimento da produção do ferro gusa a carvão vegetal. A lenha e o carvão vegetal representaram 13,2% da Matriz Energética Brasileira de 2004, resultando 0,3% acima de 2003. A Figura 2.16 ilustra a participação percentual do consumo de lenha por setores durante o ano de 2004 no Brasil.

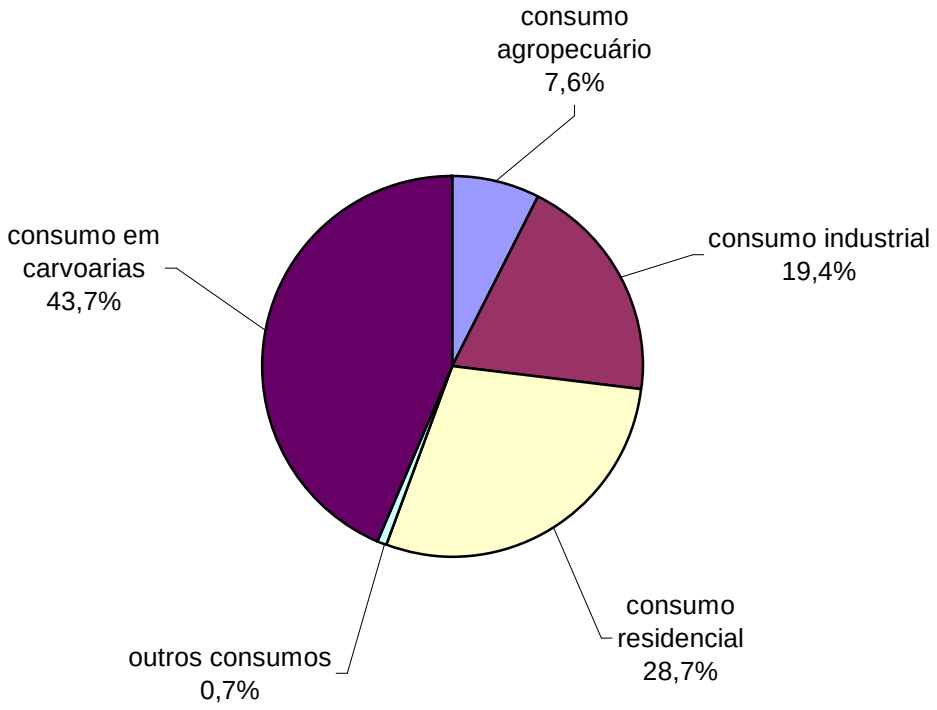


Figura 2.16: Participação percentual do consumo de lenha por setores no Brasil.

Fonte: Ben (2005).

2.4. Importância do aproveitamento dos resíduos de *Eucalyptus*.

Pera (1990) relata que os bio-combustíveis são combustíveis resultantes da biomassa. Considera-se biomassa, toda matéria orgânica capaz de ser utilizada como fonte energética renovável, proveniente das plantas, seus resíduos naturais ou decorrentes de beneficiamento, resíduos animais e despejos urbanos. De acordo com essa definição a biomassa pode ser proveniente de:

- Florestas plantadas ou naturais;
- Outras formações arbóreas naturais;
- Culturas agrícolas;
- Resíduos (agrícolas, naturais ou beneficiados, florestas naturais ou beneficiadas, animais);
- Despejos industriais (efluentes), urbanos (lixos e esgotos).

As limitações das fontes de energia no mundo trouxeram como conseqüências a necessidade de aproveitamento integral da biomassa de origem florestal, contida nas cascas, ponteiros, galhos, nós, folhas, raízes e a própria serragem.

Segundo Berle (1992), a biomassa é um termo genérico para qualquer produto natural que se decomponha por fotossíntese. Essa fonte de energia renovável é derivada de restos de madeira, sobras de colheita (cana de açúcar, cascas de arroz, etc), excreções animais e lixo orgânico. Ela pode estar em forma líquida, gasosa ou sólida. Em todo o mundo somente 15% da biomassa disponível é usada para gerar energia, sendo 8% utilizado pelas indústrias norte americanas. Os países que são grandes produtores de subprodutos de madeira, como Escandinávia, Rússia e Canadá, utilizam a biomassa em processos de geração conjunta de energia e calor.

Gonçalves & Rufino (1989) afirmam que para as indústrias madeireiras, é conveniente e necessário o emprego dos resíduos do processo, pois acarretam em redução de áreas de estocagem, menores custos de movimentação, redução da poluição ambiental e de fábrica, redução dos custos de produção e maior eficiência na utilização da matéria-prima. Para utilização de insumos energéticos nos processos, os resíduos promovem uma economia na compra de combustíveis utilizados pela indústria na produção de energia elétrica e calor.

A revista Timberjack News (2002), relata que o uso da energia renovável acelera a cada ano. A opinião pública e os tratados internacionais que requerem o uso reduzido de energia fóssil impulsionaram o desenvolvimento tecnológico para o uso de fontes renováveis na produção de energia. Há um número crescente de fábricas prontas para usar os resíduos florestais como fonte de energia.

2.4.1. Características físico-químicas dos resíduos.

A biomassa essencialmente é uma forma de energia solar armazenada, isto é, as árvores utilizam à luz solar, na fotossíntese, para converter o CO_2 e H_20 em produtos de alto teor energético que são carboidratos e oxigênio, como mostraram (Karchesy et al. 1979).

Brito (1986), relata que no processo de combustão, a energia armazenada nos carboidratos é liberada e aproveitada para geração de calor, vapor ou eletricidade. A quantidade de energia liberada pela madeira na combustão é conhecida como poder calorífico da madeira. Esta energia pode ser expressa como poder calorífico superior ou inferior, dependendo se o calor liberado pela condensação da água de constituição do combustível é ou não considerada.

Na determinação do poder calorífico do combustível florestal geralmente usa-se o calorímetro. Os valores obtidos por esse instrumento correspondem ao poder calorífico superior, e são ligeiramente superiores aos valores observados na prática, porque o calorímetro é fechado e os produtos da combustão permanecem enclausurados. Assim, ao se resfriar o vapor d´água é condensado e libera o calor latente da vaporização. Em uma fornalha industrial este calor de vaporização é perdido para atmosfera, como mostram (Karchesy et al. 1979). Na prática, deve-se trabalhar com poder calorífico efetivo, que é obtido subtraindo-se do poder calorífico superior o calor latente de vaporização da água formada durante o processo de combustão.

A energia gerada pelo combustível florestal depende do poder calorífico e do conteúdo de umidade do mesmo. O poder calorífico depende em primeiro lugar, da composição química do combustível. Elevados conteúdos de carbono e hidrogênio significam elevado poder calorífico, enquanto o oxigênio apresenta efeito contrário. A

composição química da madeira, excluída a água, é aproximadamente a seguinte: carbono – 50,8%, oxigênio – 3,8%, hidrogênio – 6,0%, nitrogênio – 0,4% e cinzas – 1,0%, (Hakkila 1984).

Segundo Ferrari (1988), a diferença entre o poder calorífico superior e o poder calorífico inferior da madeira seca, isto é, a 0% de umidade, é de 1,36 MJ/kg.

Howard (1973), afirma que, a 0% de umidade, para folhosas o poder calorífico varia entre 19,3 MJ/kg a 20,1 MJ/kg e, para coníferas, de 20,9 MJ/kg a 22,6 MJ/kg.

Farinhaque (1981), apresentou variação do poder calorífico das espécies folhosas e coníferas, para madeira seca a 0% de umidade, na faixa de 19,7 MJ/kg a 20,9 MJ/kg.

Brito (1986), relata que a variação do poder calorífico da madeira seca está entre 14,7 MJ/kg a 20,9 MJ/kg, podendo ser considerado para efeito prático a média de 18,8 MJ/kg. Para madeiras com maior teor de resinas, os valores são mais elevados pela presença dessas substâncias, e seu poder calorífico pode chegar até 37,7 MJ/kg.

Pera (1990) relata que o poder calorífico superior da madeira varia de acordo com a espécie como mostra a Tabela 2.5.

Tabela 2.5: Poder calorífico superior de algumas espécies de madeira: base seca.
Fonte: Pera (1990).

Espécie	**Poder calorífico superior (MJ/kg)**
Eucalyptus grandis	15,9
Pinho	18,8
Bracatinga	13,8
Acácia Negra	14,4
Canelinha	16,8
Peróba	15,6

A Tabela 2.6 apresenta o poder calorífico inferior (PCI), peso específico aparente e umidade de alguns resíduos florestais gerados na indústria madeireira.

Tabela 2.6: Poder calorífico inferior (PCI), peso específico e umidade de alguns resíduos da indústria madeireira. Fonte: Pera (1990).

Resíduo	**Umidade (%)**	**Peso específico (kg/m^3)**	**PCI (MJ/kg)**
Serragem	30	185	10,0
Pó de lixa (aglomerado)	10	265	14,7
Pó de lixa (madeira)	10	250	13,6
Casca de *Eucalyptus*	30	320	8,4
Casca de pinho	50	360	7,9
Viruta	20	110	11,7
Sobra de carpintaria	20	120	11,7
Recortes (chapa prensada)	8	110	14,0
Recortes (agromerado)	8	120	14,0
Madeira triturado	10	175	13,6
Lâmina de torno	50	115	7,5

Conforme mostra Pera (1990), o poder calorífico da madeira pode ser determinado, teoricamente, a partir de sua composição química elementar, pela aplicação da seguinte Equação: PCS = 81C + 340 (H – O/8), onde: C, H e O são teores de carbono, hidrogênio e oxigênio em percentagem.

O teor de umidade é um fator que exerce elevada influência sobre o uso da madeira para energia. A presença de água representa poder calorífico negativo, porque parte da energia liberada é gasta na vaporização da água, e se o teor de umidade variar muito pode dificultar o processo de combustão, havendo necessidade de constantes ajustes no sistema, como estudou Brito (1986).

Segundo Hakkila (1984), para certos tipos de fornalha, o conteúdo de umidade mais eficiente em termos de combustão varia entre 43 a 54% (em relação ao seu peso seco). Se a madeira estiver mais seca, a combustão pode ser muito explosiva, resultando em maior perda de energia para a atmosfera e aumentando significativamente a emissão de partículas de carbono. Se a umidade da madeira aumentar para 100 a 150% (em relação ao peso seco) a eficiência da combustão diminuiu drasticamente; se ela exceder 150% a 230%, o processo de combustão não pode ser mantido.

Segundo Lima et al. (1988), o poder calorífico das cascas de madeira é influenciado logicamente pelo seu teor de umidade que, por sua vez, depende da quantidade de água utilizada durante o processo de descascamento. A Figura 2.17 apresenta a relação do poder calorífico por quilo de casca úmida em função do teor de umidade do material. Embora sejam valores para espécies estrangeiras, os números podem ser utilizados com certo fator de segurança para as espécies brasileira. As cascas de *Eucalyptus grandis* seca apresentam um poder calorífico da ordem de 16,7 MJ/kg.

Ainda segundo Lima et al. (1988), quando o processo de descascamento for a úmido, recomenda-se, para a queima da casca, uma diminuição prévia do teor de água do material, o que pode ser alcançado por meio de prensas ou por secagem empregando os gases de exaustão das caldeiras.

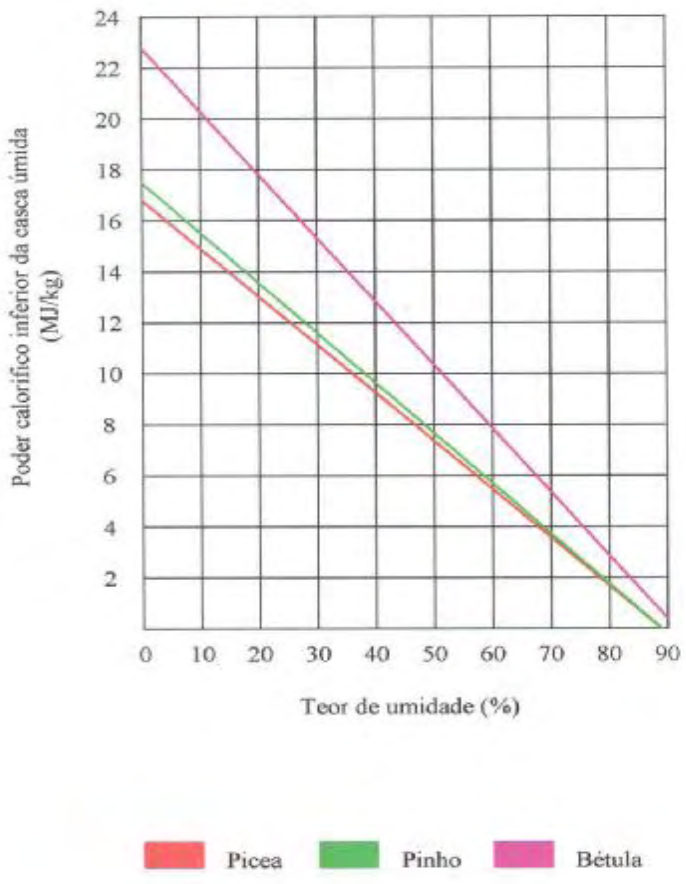


Figura 2.17: Poder calorífico da casca em função do teor de umidade.
Fonte: Lima et al. (1988).

2.4.2. Estimativa da quantidade de resíduos gerados.

Os resíduos florestais gerados durante os processos com as indústrias do ramo celulose e chapas de fibra, compõem-se em sua maior parte de cascas de *Eucalyptus*. Segundo Neto et al. (1991), a percentagem de cascas na madeira varia com a espécie, entre árvores de uma mesma espécie e ao longo do tronco de uma árvore, sendo sensível de local para local.

Loestsch et al. (1973), relatam que algumas espécies de *Eucalyptus* possuem uma percentagem de casca constante da base até o topo da árvore, enquanto que outras apresentam grande variação na percentagem de casca, ao longo do fuste.

Figueiredo & Bernardi (1993), mostram que a casca pode representar de 6% a 40% do volume total de uma árvore, sendo este percentual maior em árvores jovens de rápido crescimento e menor em árvores mais velhas.

Segundo Pera (1990), o *Eucalyptus* proporciona de seu peso, 66% no tronco, 16% de galhos, 10% de cascas e 8% de folhas, sendo que estes três últimos resíduos estão sendo objetos de estudo para aproveitamento como combustíveis.

Lima et al. (1988), afirmam que as indústrias madeireiras se defrontam com um problema adicional: o que fazer com o grande volume de cascas gerado, já que a casca constitui de 10% a 20% da madeira total. Atualmente, e principalmente devido à crise energética, as fábricas estão utilizando as cascas como combustível em suas caldeiras para geração de vapor necessário ao processo.

Nunes (1981), estudando o *Eucalyptus Alba* e *Eucalyptus grandis* de origem híbrida, concluiu que as percentagens de cascas observadas nas várias alturas do tronco das árvores diferiram estatisticamente entre si. Foram maiores em árvores baixas, tendendo a estabilizar a partir de aproximadamente quatro metros de altura.

Neto et al. (1991), estudando o volume de cascas das espécies *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus Alba* e *Eucalyptus saligna*, nos municípios de Coronel Fabriciano, Dionísio e São Pedro dos Ferros, localizados no Distrito Florestal do Vale do Rio Doce, Minas Gerais, determinaram o volume e percentagem de cascas. O povoamento variou de idade de três a oito anos, desenvolvendo em regime de alto fuste e de primeira talhadia (rotação) conforme ilustrado na Tabela 2.7.

Tabela 2.7: Quantidade de árvores cubadas e valores médios de volume de casca (m^3) e percentagem de casca por espécie, idade, local e método de regeneração.
Fonte: Neto et al. (1991).

Espécie	**Idade (anos)**	**Local**	**Método de regeneração**	**Árvores cubadas**	**Volume de Casca (m^3)**	**Percenta-gem de casca (%)**
E. grandis	5	Dionísio	alto fuste	40	0,0255	14,96
E. grandis	7	Coronel Fabriciano	alto fuste	50	0,0424	16,07
E. grandis	3	Dionísio	1ª. Talhadia	20	0,0091	15,78
E. grandis	4	Dionísio	1ª. Talhadia	25	0,0132	14,77
E. grandis	5	Dionísio	1ª. Talhadia	30	0,0196	16,04
E. grandis	6	São Pedro dos Ferros	1ª. Talhadia	35	0,0253	16,94
E. grandis	7	Dionísio	1ª. Talhadia	40	0,0279	12,17
E. alba	5	Coronel Fabriciano	alto fuste	40	0,0305	16,19
E. alba	6	Coronel Fabriciano	alto fuste	35	0,0233	15,10
E. alba	7	Dionísio	alto fuste	50	0,0381	15,37
E. alba	8	Coronel Fabriciano	alto fuste	45	0,0370	14,26
E. alba	3	São Pedro dos Ferros	1ª. Talhadia	20	0,0095	15,33
E. alba	4	Dionísio	1ª. Talhadia	20	0,0099	16,17
E. alba	5	Coronel Fabriciano	1ª. Talhadia	30	0,0187	15,63
E. alba	6	Dionísio	1ª. Talhadia	30	0,0179	16,19
E. alba	7	Coronel Fabriciano	1ª talhadia	40	0,0257	12,69
E. alba	8	Coronel Fabriciano	1ª. Talhadia	45	0,0425	15,29
E. saligna	8	Dionísio	alto fuste	50	0,0378	14,51
E. saligna	3	Dionísio	1ª. Talhadia	20	0,0079	15,47
E. saligna	6	São Pedro dos Ferros	1ª. Talhadia	35	0,0231	15,51
E. saligna	7	Coronel Fabriciano	1ª. Talhadia	40	0,0299	14,69
TOTAL				740		

A Tabela 2.8 ilustra a associação média do volume total e do volume de cascas das árvores por idade.

Tabela 2.8: Valores médios de volumes totais e volumes de casca, em m^3, dos plantios de *Eucalyptus* de diferentes idades e condições de local, espécie e método de regeneração.
Fonte: Neto et al. (1991)

Idade (anos)	**Volume Total (m^3)**	**Volume de casca (m^3)**	**Percentagem de casca (%)**
A) E. *grandis*, em 1ª. Talhadia, Dionísio, MG			
3	0,0573	0,0091	15,78
4	0,0896	0,0132	14,77
5	0,1222	0,0196	16,04
7	0,2301	0,0279	12,17
B) *E; Alba*, em alto fuste, Coronel Fabriciano, MG			
5	0,1881	0,0305	16,19
6	0,1541	0,0233	15,10
8	0,2596	0,0370	14,26
C) *E. Alba*, em 1ª. Talhadia, Coronel Fabriciano, MG			
5	0,1196	0,0187	15,63
7	0,2023	0,0257	12,69
8	0,2778	0,0425	15,29

Segundo o Setor de Química Celulose e Energia da ESALQ (1983), a determinação da percentagem de casca é importante sob o ponto de vista florestal e industrial (produção de celulose chapas de fibra, energia, etc.). Através da metodologia clássica o teor de casca é determinado cubicando-se a madeira com e sem casca, sendo a seguinte expressão de cálculo:

$$\%CV = \frac{Vc/c - Vs/c}{Vc/c} \cdot 100, \text{ onde :}$$

%CV = percentagem de casca em volume (%);

Vc/c = volume da amostra com casca (m^3);

Vs/c = volume da amostra sem casca (m^3).

Ainda, segundo o Setor de Química Celulose e Energia da ESALQ (1983), as diferentes espécies de *Eucalyptus* apresentam grande diversidade quanto ao tipo e quantidade de cascas. Na maioria dos casos, dentro da árvore, a percentagem é elevada tendendo a decrescer em direção ao meio da árvore e aumentando para o topo. Algumas espécies, todavia mostram um modelo marcadamente crescente ou decrescente no sentido base-topo. A Tabela 2.9 ilustra os teores de casca em diferentes espécies de *Eucalyptus* e a Figura 2.18, ilustra a variação da percentagem de casca no sentido base-topo para o *Eucalyptus grandis.*

Tabela 2.9: Teor de cascas de espécies de *Eucalyptus.* Fonte: SCQE – Setor de Química, Celulose e Energia – ESALQ – USP (1983)

Espécie	**Percentagem de massa**		
	Média	**Máxima**	**Mínima**
E. grandis	12,65	15,45	10,62
E. saligna	14,19	16,25	11,25
E. globulus	14,32	16,45	11,90
E. pellita	25,61	32,08	16,39
E. gummifera	29,53	40,40	22,46
E. microcarys	21,02	25,73	16,90
E. pilularis	20,66	29,46	17,99
E. triantha	23,09	30,27	17,80

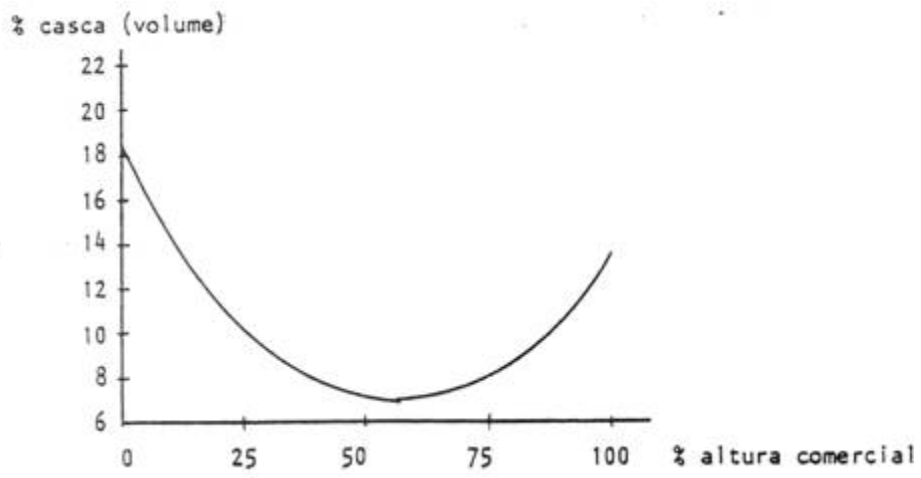


Figura 2.18: *Eucalyptus grandis.* Variação da percentagem de casca no sentido base-topo. Fonte: SCQE – Setor de Química, Celulose e Energia – ESALQ – USP (1983).

3. MATERIAIS E MÉTODOS.

A pesquisa foi desenvolvida na empresa Duratex S.A., unidade fabril localizada no município de Botucatu no Estado de São Paulo, onde foram analisados os locais e as quantidades de geração de resíduos florestais, bem como a verificação de seu poder calorífico e sua respectiva umidade. Foi analisada a necessidade energética da unidade fabril, sob o aspecto de energia térmica. Através dos índices de controle da empresa foram determinadas as quantidades e os tipos de combustíveis utilizados na produção de calor e vapor demandados pelo processo.

3.1. Identificação e caracterização da unidade industrial onde foi aplicada a pesquisa.

A unidade industrial de chapas de fibra de madeira da Duratex S.A. esta localizada no município de Botucatu, na Fazenda Santa Luzia, distante 15 km do centro urbano. A fábrica possui florestas própria, sendo 95% da área plantada de *Eucalyptus grandis e 5% de outras espécies*, que são sua única matéria-prima, operando com 4 linhas de produção desde o ano de 1973, sendo: 3 linhas de produção de chapa dura e 1 linha de produção de chapa de média densidade (MDF) e chapa de alta densidade (HDF). Na Tabela 3.1, observa-se as principais características da unidade industrial em estudo.

Tabela 3.1: Principais características da Fábrica Duratex – Botucatu.
Fonte: Duratex S.A. (2006)

Item	**Valor**
Área total	1.167 ha
Área construída	113.152 m^2
Número de funcionários	724
Número de linhas de produção	4
Capacidade produtiva	700 t/dia (Chapa Dura)
	1.000 m^3/dia (MDF e HDF)
Tipo de produto	Chapa Dura de Fibra de Madeira
	Chapa de Média Densidade (MDF)
	Chapa de Alta Densidade (HDF)
Volume de madeira consumida	1.025.848 m^3/ano
Potência elétrica instalada	52 MW
Número de caldeiras instaladas	5
Capacidade de produção de vapor	(125 tv/h) vapor saturado a 2,2 MPa
Capacidade de produção de ar quente	(750.000 m^3/h) ar quente a 350 ºC
Tensão de entrada	138 Kv
Subestação de entrada	37,5 MVA (138 kV para 3,8 kV)
(transformadores de entrada)	40 MVA (138 kV para 13,8 kV)

3.1.1. Ciclo termodinâmico.

O ciclo termodinâmico existente na fábrica de chapas de Botucatu é composto basicamente por 5 caldeiras para geração de vapor saturado a pressão de 2 MPa e ar quente a temperatura de 350 ºC. Tem por finalidade promover o aquecimento nos pontos de prensagem, secagem das fibras, tratamento térmico e tratamento de umidificação. No processo de fabricação de chapas dura, o vapor é introduzido em acumuladores de água quente que operam a 2,0 MPa e dos quais através de bombas centrífugas, é feita a circulação para os pontos de utilização para aquecimento.

Nos processos de chapa dura e chapas de média e alta densidade de fibra o vapor produzido pelas caldeiras é também utilizado para o pré-aquecimento dos

cavacos de madeira nos desfibradores. Uma válvula redutora de pressão possibilita o uso do vapor na desfibração dos cavacos a uma pressão de 1,0 MPa. Após a utilização no pré-aquecimento dos cavacos na desfibração o vapor é disperso na atmosfera.

No processo de chapas de média densidade (MDF) e alta densidade (HDF), o ar quente a 350 ºC é introduzido junto às fibras após a desfibração dos cavacos, com a finalidade de baixar a umidade das fibras de 45% para 9%.A Figura 3.1 demonstra o ciclo termodinâmico atual da unidade industrial em estudo.

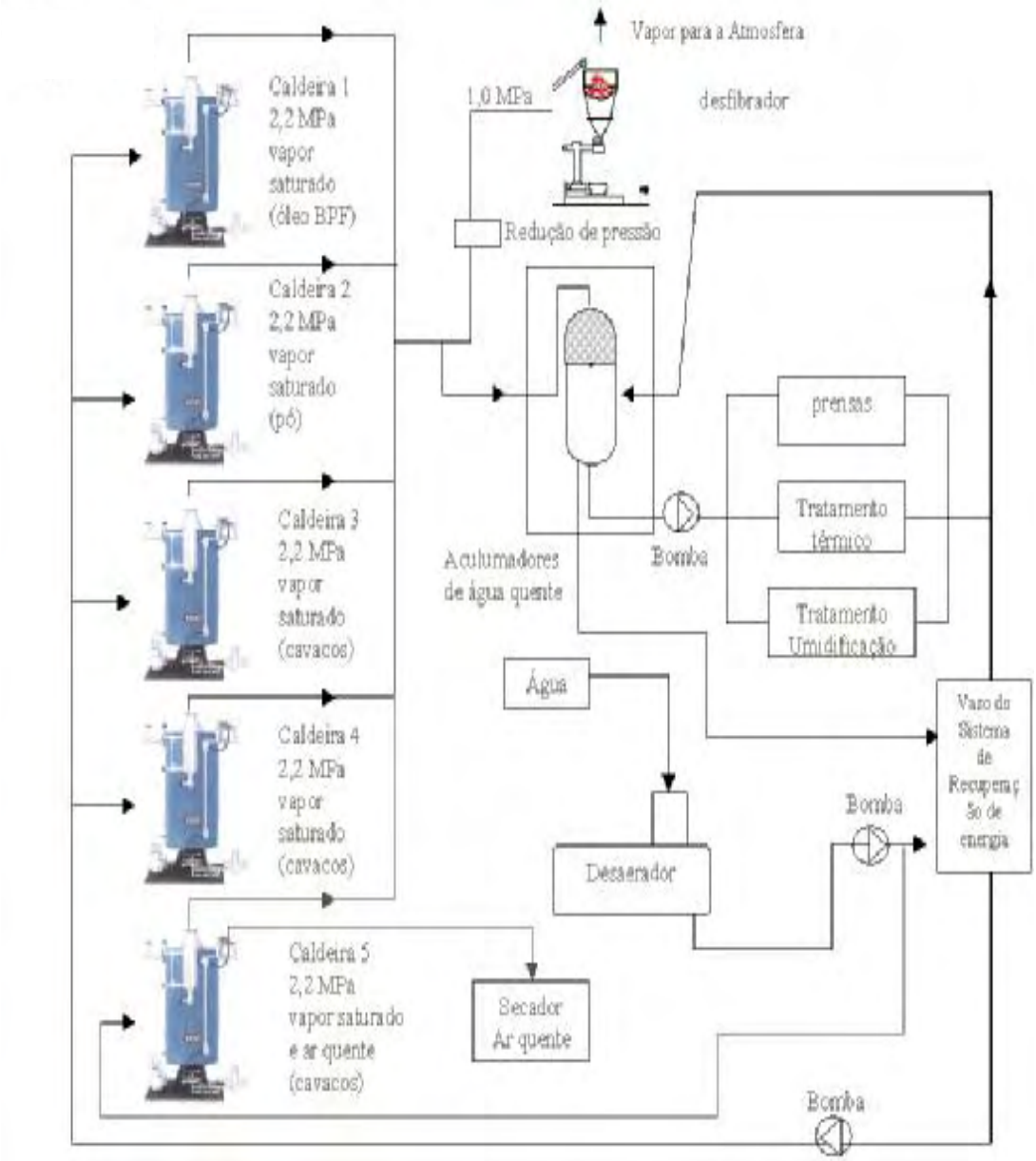


Figura 3.1: Ciclo termodinâmico da Duratex – Unidade Botucatu
Fonte: Duratex S.A. (2006).

3.1.2. Dados e parâmetros do ciclo termodinâmico.

A entalpia do vapor na saída das caldeiras é de 668,30 kcal/kg (2,2 MPa, 214°C) e a entalpia da água de alimentação das caldeiras é de 108,99 kcal/kg (108,8 ºC). São consumidos em média 70,33 toneladas de vapor por hora, conforme dados coletados entre janeiro a dezembro de 2005 e apresentados nos ANEXOS I e II. O calor produzido não é transformado em trabalho, apenas utilizado com a finalidade de cozimento da matéria-prima no processo de desfibração dos cavacos, agente catalisador nas prensas de chapa dura, secagem das fibras nas linhas de MDF e HDF, câmaras de tratamento térmico e como agente nebulizador nas câmaras de umidificação. Na Tabela 3.2 podem ser observados os principais informes sobre as caldeiras que operam o clico atual.

Tabela 3.2: Dados das caldeiras que operam na unidade industrial.
Fonte: Duratex S.A. (2006).

Caldeiras	Combustível	Produção de vapor (tv/h)	Eficiência (%)	Observação
1	Óleo BPF (tipo 2A) + Pó (resíduos do processo)	15	80	Caldeira reserva
2	Pó (resíduos do processo) + Óleo BPF	30	80	Opera com 70% de sua capacidade
3	Cavacos de madeira + Pó (resíduos do processo)	30	80	Opera com 75% de sua capacidade
4	Cavacos de madeira + Pó (resíduos do processo)	35	80	Opera com 75% de sua capacidade
5	Cavacos de madeira + pó (resíduos) + Óleo BPF(tipo 2 A)	15 + (ar quente 750.000 m³/h)	80	Opera com 70% de sua capacidade

3.1.3. Consumo de combustíveis.

Para a produção de energia térmica e vapor, utilizam-se caldeiras aquatubulares, sendo seus principais combustíveis, pó e partículas de chapas de fibra provenientes de lixamento e corte, chapas de fibras reprovadas quanto a sua qualidade e cavacos de *Eucalyptus* em sua maior parte da espécie *grandis*. O óleo BPF (baixo ponto de fluidez), tipo 2A, é utilizado como combustível somente em três caldeiras, sendo uma mantida como reserva. Nas demais caldeiras o óleo BPF é utilizado somente como chama piloto.

As quantidades utilizadas de cavacos de *Eucalyptus grandis* necessárias para produção de chapas e geração de energia térmica foram obtidas através de planilhas de controle de consumo durante os anos 2003, 2004 e 2005. As planilhas são apresentadas nos ANEXOS III e IV.

3.2. Determinação do peso dos resíduos florestais (cascas) descartados do processo.

Os resíduos florestais descartados do processo de fabricação de chapas, compõem-se em sua maior parte de cascas de *Eucalyptus grandis*.

A madeira é recebida na fábrica em forma de toras com casca, sendo que o transporte da região florestal até a fábrica é feito por meio rodoviário. Após a chegada à fábrica, a madeira pode ser processada imediatamente ou, então, ser mantida em estoque para utilização futura.

Para serem transformadas em cavacos de madeira, as toras são picadas em picadores de facas. Na unidade de fabricação em estudo estão instalados 2 picadores, sendo que o picador número 1 encontra-se parado e utilizado somente em caso de emergência. Em situações normais a fábrica utiliza o picador número 2 no processo de produção de cavacos de madeira.

As toras são transportadas através de uma mesa alimentadora até o picador. Neste trajeto, desde a descarga dos caminhões, até a entrada no picador, uma parte das cascas das toras acaba caindo no chão e outra parte em um transportador de taliscas instalado sob as mesas alimentadoras de toras.

As cascas que caem no transportador de taliscas, em seguida passam por transportadores de correia e são amontoadas na periferia do pátio de estocagem de cavacos

de madeira. As cascas que acabam caindo no chão são coletadas manual e mecanicamente e transferidas para o mesmo monte de cascas coletadas pelo transportador de taliscas.

Todos os cavacos produzidos a partir da picagem das toras, que são destinadas à produção de chapas, passam por uma peneira de discos que retira cascas maiores que 50 mm de comprimento. Estas cascas também são amontoadas com aquelas coletadas nas mesas alimentadoras de toras antes dos picadores.

Devido às condições de tamanho, entrelaçamento, as cascas retiradas das peneiras de discos e das mesas transportadoras de toras não são utilizadas como combustível, pois os transportadores de cavacos (biomassa) para as Caldeiras não estão preparados para o transporte das cascas até a Caldeira 5 .As cascas precisam ser picadas antes de seu transporte para queima na Caldeira 5 que dispõe de grelha rotativa (auto limpante). As Caldeiras números 1, 2 , 3 e 4 não possuem grelhas rotativas (são fixas), inviabilizando a queima das cascas nas mesmas, motivado pela quantidade de areia contida nas cascas e dificuldade de limpeza nas grelhas.

Diariamente caminhões retiram estas cascas, que são doadas a terceiros que se responsabilizam pela retirada e transporte.

As Figuras 3.2, 3.3, 3.4 e 3.5 apresentam as mesas alimentadoras de toras dos picadores números 1 e 2 e peneiras de discos onde são descartadas as cascas.

Figura 3.2: Mesa alimentadora de toras do picador número 1. Fonte: Duratex S.A. (2006).

Figura 3.3: Mesa alimentadora de toras do picador número 2
Fonte: Duratex S.A. (2006).

Figura 3.4: Peneira de discos do processo de fabricação de chapa dura.
Fonte: Duratex S.A. (2006).

Figura 3.5: Peneira de discos do processo de fabricação de MDF e HDF.
Fonte: Duratex S.A. (2006).

A figura 3.6 apresenta o monte de cascas que são retiradas da fábrica por terceiros.

Figura 3.6: Monte de cascas de *Eucalyptus*. Fonte: Duratex S.A. (2002).

3.2.1. Fluxograma do processo de preparação da madeira.

A Figura 3.7 ilustra o fluxograma do processo de preparação da madeira, identificando os pontos no processo onde ocorre o descarte dos resíduos (cascas).

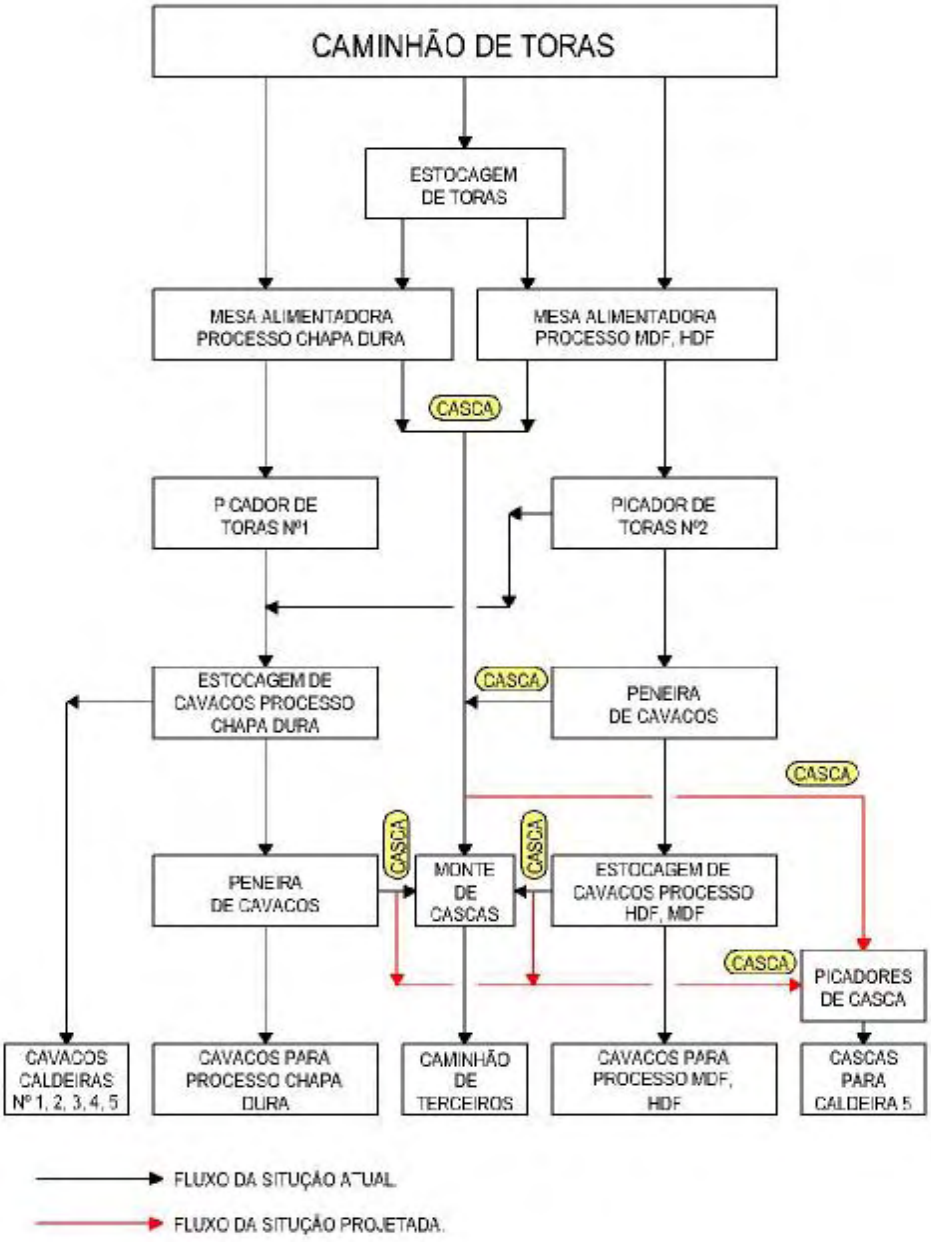


Figura 3.7: Fluxograma do processo de preparação de madeira.
Fonte: Duratex S.A. (2006).

3.2.2. Peso das cascas de *Eucalyptus*, descartados do processo.

O peso dos resíduos foi obtido com o auxílio de balança rodoviária. Os caminhões foram pesados em vazio e com carga, sendo obtido o peso dos resíduos através da diferença de pesagem dos caminhões com e sem as cascas.

Os dados obtidos cobrem um período de aproximadamente 68 horas de pesagens, pois tais medições aconteceram nos dias 18, 19 e 20 de Julho de 2006, tendo como resultado da geração horária no período, 1.161 kg/h de massa seca de cascas de *Eucalyptus*.

3.3. Determinação do poder calorífico das cascas e cavacos de *Eucalyptus grandis* (lenho).

3.3.1.Poder calorífico superior (PCS) da casca e do lenho.

O poder calorífico superior (PCS) foi determinado pelo método da bomba calorimétrica, e suas determinações foram realizadas no Laboratório de Física Aplicada do Departamento de Física e Biofísica, do Instituto de Biociência da Unesp de Botucatu – SP.

O PCS da casca e lenho da espécie estudada foi determinado segundo norma ABNT NBR 8693, e pelo manual de operações do calorímetro PARR 1201.

Para o cálculo do PCS, foram coletadas amostras de cascas e lenho na unidade de fabricação da Duratex S.A. em estudo, e utilizou-se a Equação (1):

$$PCS = \frac{(K + Ma)}{Ms} \cdot \Delta t \qquad (1)$$

Onde:

PCS é o poder calorífico superior (cal/g);

Ma a massa de água utilizada no Calorímetro (g);

Δt o gradiente de temperatura antes e após a combustão (°C);

K a constante do calorímetro (g);

Ms a massa seca da amostra (g).

A massa de água (Ma), utilizada no Calorímetro foi de 2.500g e os valores da constante do Calorímetro (K), foram previamente determinados na calibração do Calorímetro, sendo de 488,9 g.

3.3.2. Poder calorífico inferior (PCI) da casca e do lenho.

O poder calorífico inferior (PCI) foi determinado descontando-se a fração da massa de água das amostras da casca e do lenho, já que esta não é aproveitada na combustão, pois a água não é queimada e não fornece calor neste caso (Rezende,1977). O Poder Calorífico Inferior decresce com a umidade da casca e lenho, e foi calculado com a aplicação da Equação (2):

$$PCI = PCS \cdot \left(1 - \frac{Ubu}{100}\right) - \left(\frac{Ubu}{100}\right) \cdot Lv \qquad (2)$$

Sendo:

PCS o poder calorífico superior (kcal/kg);

PCI o poder calorífico inferior (kcal/kg);

Ubu a umidade a base úmida (%);

Lv o calor latente de vaporização da água: 540 (kcal/kg).

3.3.3. Determinação da Umidade a Base Úmida (Ubu) e da umidade com base em massa seca (Ubs) da casca e do lenho (cavacos de madeira).

Para obtenção da umidade, foram coletadas 10 amostras de cascas com volume de 300 cm³, sendo levadas à estufa para secagem, em uma temperatura de 105 ± 5ºC, durante um período de 24h.

A umidade da amostra com base em massa úmida foi determinada de acordo com as Equações (3) e (4):

$$Ma = Mu - Mo \qquad (3)$$

$$Ubu = \frac{Ma}{Mu} \cdot 100 \qquad (4)$$

Onde:

Ubu é a umidade a base úmida (%);

Ma a massa de água (g);

Mu a massa úmida (g);

Mo a massa seca (g).

A determinação da umidade com base em massa seca foi determinada a partir da umidade com base em massa úmida usando a Equação (5).

$$Ubs = \frac{100.Ubu}{100 - Ubu} \qquad (5)$$

Sendo:

Ubs a umidade em base seca (%);

Ubu a umidade em base úmida (%).

A massa úmida de cascas geradas no processo de fabricação e geração de energia térmica foi determinada pela Equação (6).

$$Mu_{casca} = \frac{M_{0Casca}}{\left(\frac{100 - Ubu}{100}\right)} \qquad (6)$$

Sendo:

Mu_{casca} a massa de casca úmida (kg/dia);

Ubu a umidade da casca a base úmida (%);

Mo_{casca} a massa seca de casca seca (kg/dia).

3.3.4. Determinação da densidade do Lenho.

Na empresa em pesquisa, a densidade do lenho (madeira), utilizada no processo de fabricação e na geração de energia térmica foi determinada pelo Método de Imersão. As amostras são coletadas diariamente na chegada dos caminhões de transporte da madeira na fábrica. Neste método, a massa é determinada com auxílio de uma balança, com

precisão de 0,001 g e o volume é determinado pela variação de peso ocasionada quando a madeira é submersa na água. A determinação do volume baseia-se no princípio de Arquimedes: a perda aparente do peso de um corpo em um líquido é igual ao peso do líquido deslocado. Essa é uma das maneiras mais precisas para determinação do volume e pode ser usada para amostras com formato irregular. A água e o mercúrio são os líquidos mais freqüentemente utilizados (Vital, 1984).

A densidade básica da madeira é definida pela Equação (7):

$$\rho b_{madeira} = \frac{M_{0madeira}}{Vv_{madeira}} \qquad (7)$$

Sendo:

$\rho b_{madeira}$ a densidade básica da madeira (kg/m^3);

$M_{0madeira}$ a massa de madeira seca (kg);

$Vv_{madeira}$ o volume de madeira verde ou saturado (m^3).

A densidade da madeira seca pode ser determinada pela Equação (8):

$$\rho_{0madeira} = \frac{M_{0madeira}}{V_{0madeira}} \qquad (8)$$

Sendo:

$\rho_{0madeira}$ a densidade da madeira à umidade 0% (kg/m^3);

$M_{0madeira}$ a massa de madeira à umidade 0% (kg);

$V_{0madeira}$ o volume de madeira à umidade 0% (m^3).

Outra forma para determinação da densidade da madeira pode ser desenvolvida pela Equação (9):

$$\rho u_{madeira} = \frac{Mu_{madeira}}{Vu_{madeira}} \qquad (9)$$

Sendo:

$\rho u_{madeira}$ a densidade da madeira para uma certa umidade com base em massa seca (kg/m^3);

$Mu_{madeira}$ a massa de madeira para uma certa umidade com base em massa seca (kg);

$Vu_{madeira}$ o volume de madeira para uma certa umidade com base em massa seca (m^3).

No presente trabalho a umidade da madeira com base em massa seca apresentou valor médio de 63,9%. Desta forma, a densidade $\rho_{63,9}$ foi obtida com aplicação de Equação (9) com parâmetros modificados, sendo:

$$\rho_{63,9} = \frac{M_{63,9}}{V_{63,9}}$$

Onde:

$\rho_{63,9}$ o valor da densidade das amostras de madeira na umidade a base em massa seca: 63,9%;

$M_{63,9}$ a massa das amostras de madeira na umidade a base seca de 63,9%;

$V_{63,9}$ o volume das amostras de madeira na umidade a base seca de 63,9%.

3.4. Metodologia para elaboração de planilha de custo da casca e madeira utilizada para produção da energia térmica.

A determinação dos custos diretos e indiretos para recuperação das cascas foi obtida através de índices praticados pela empresa, ou seja, custo de manutenção 1,5% ao ano e custo de sobressalentes 1,0% ao ano, ambos com relação ao investimento.

O custo médio da madeira utilizada para geração de energia térmica foi obtido através dos resultados mensais do preço médio da madeira (planilha de controle de custos da empresa) durante o período de agosto de 2005 a julho de 2006. No ANEXO VI verificam-se os preços médios mensais da madeira no período.

Os custos de investimentos foram estimados a partir de propostas técnicas e comerciais fornecidas pelas empresas Demuth, Máquinas Industriais Ltda e Montag,

Montagem Engenharia e Construções. O cálculo da depreciação do investimento foi elaborado conforme orientação de Ulbanere & Castro (1997), de acordo com a Equação (10).

$$D = (Vi - Vf) \cdot \frac{(n - k + 1)}{n \cdot (n + 1)} \cdot 2 \qquad (10)$$

Onde:

D é a depreciação anual do bem, (R$/ano);

Vi o valor inicial (de compra) do bem (R$);

Vf o valor final ou residual (sucata) do bem, depois de consumida sua vida útil (R$), isto é, para máquinas e equipamentos sem motor o valor é de 10% (dez por cento) do valor inicial (Vi), e de 20% (vinte por cento) quando o bem possui algum tipo de motor;

K a idade do bem (ano), para o projeto, em que o bem é novo este valor é igual a zero;

n a vida útil do bem (ano1); para o projeto foi adotada uma vida útil de 15 anos.

O custo financeiro do investimento foi obtido através de índice praticado pela empresa na avaliação econômica de projetos, ou seja, 8% ao ano.

No estudo da análise econômica financeira utilizou-se a taxa interna de retorno (TIR), metodologia de análise de valor presente líquido (VPL) e regra do “pay back” descontado. Estes indicadores e instrumentos de análise de custos ajudaram a orientar as conclusões sobre a viabilidade de implantação do projeto (Noronha, 1981). Com aplicação do fluxo de caixa do projeto como mostra a Equação (11).

$$Vpl = \sum_{t=0}^{n} \frac{Lt}{(1 + i)^t} \qquad (11)$$

Onde:

Vpl é o valor presente líquido;

n o horizonte do projeto;

t o ano em análise;

i a taxa de desconto relevante para a empresa e;

Lt o valor resultante do fluxo de caixa no período em análise.

3.5. Procedimentos para elaboração dos cálculos para aproveitamento das cascas e dos custos da madeira na geração de energia térmica da empresa.

A quantidade de vapor que pode ser obtida com a queima das cascas foi abordada conforme recomendado por Pera (1990), com a utilização da Equação (12).

$$V = \frac{Mcasca \cdot \mu \cdot PCIcasca}{\Delta h} \qquad (12)$$

Onde:

V é a quantidade de vapor que se pode obter com a queima das cascas (kg/dia);

M_{casca} a massa de casca úmida (kg/dia);

μ o rendimento das caldeiras (adotado como premissa 80%);

PCI_{casca} o poder calorífico inferior da casca (kcal/kg);

Δh a diferença das entalpias entre o vapor na saída das caldeiras e a água de alimentação nas condições operacionais das caldeiras descritas no Item 3.1.2. (559,31 kcal/kg).

Os valores de entalpias do vapor na saída das caldeiras e água de alimentação foram obtidos através do diagrama de Mollier, apresentado por Perry et al. (1980).

A equivalência em madeira obtida com a queima das cascas foi calculada aplicando-se a Equação (12), recomendada por Pera (1990), invertendo-se a incógnita conforme a Equação (13).

$$Mmadeira = \frac{V \cdot \Delta h}{\mu \cdot PCIcavaco} \qquad (13)$$

Onde:

Δh a diferença das entalpias entre o vapor na saída das caldeiras e a água de alimentação nas condições operacionais das caldeiras descritas no Item 3.1.2. (559,31 kcal/kg).

$M_{madeira}$ é a massa equivalente em madeira úmida a 63,9% (base seca), com a queima das cascas (kg/dia);

V o vapor que se pode obter com a queima das cascas (kg/dia);
PCIcavaco o poder calorífico inferior do cavaco de madeira (kcal/kg).

Para o cálculo do custo do volume de madeira (metros cúbicos), obtido com a queima das cascas foi utilizado a densidade média da madeira a base seca, ou seja, $\rho_{63,9}$ = 774,5 kg/m^3, valor este adotado pela empresa como fator de conversão de peso para volume de madeira, conforme descrito no Item 3.3.4.

A conversão de massa úmida de madeira para volume de madeira úmida a ser economizada foi obtida com a aplicação da Equação (14).

$$V_{madeira} = \frac{M_{madeira}}{\rho_{63,9}} \qquad (14)$$

Onde:
$V_{madeira}$ é o volume equivalente de madeira úmida a 63,9% (base seca) em (m³/dia);
$M_{madeira}$ a massa de madeira úmida a 63,9% (base seca) em (kg/dia);
$\rho_{63,9}$ a densidade da madeira na umidade a base seca: (kg/m$^{3)}$.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.

4.1. Informações gerais sobre consumo e preços.

Os dados de consumo de vapor e índice de consumo de produção de chapas são apresentados nos Anexos I e II. Os Anexos III e IV apresentam os consumos de cavacos de madeira para queima e processo de fabricação de chapas. O preço médio da madeira destinada ao processo de fabricação de chapas e geração de energia térmica está apresentado no Anexo VI. A umidade média das amostras de cascas de *Eucalyptus grandis* está apresentado no Anexo V.

Nos Anexos VII e VIII e IX estão apresentados os fluxogramas simplificados das instalações propostas para recuperação das cascas, sendo que o Anexo VII apresenta as instalações para picagem das cascas geradas na peneira de discos do processo de fabricação de chapa dura e os Anexos VIII e IX apresentam as instalações para picagem das cascas geradas nos transportadores de alimentação de toras e peneiras de discos do processo de fabricação de chapas de média (MDF) e alta (HDF) densidade de fibras.

4.2. Cálculo do aproveitamento das cascas como combustível para geração de energia térmica requerida pela unidade industrial.

4.2.1. Geração média de cascas.

Com base nos dados apresentados no Item 3.2.2., e no ANEXO V, foi determinada a geração média diária de cascas de *Eucalyptus grandis* úmidas, com aplicação da Equação (6).

Geração de cascas = 1.161 kg/h em massa seca (Item 3.2.2.).

Regime operacional da fábrica = 24 h/dia.

$Mo_{casca} = 1.161 \cdot 24$

$Mo_{casca} = 27.864$ kg/dia (massa seca).

$Ubu_{casca} = 20,21\%$ (calculado no anexo V).

$$Mu_{casca} = \frac{27.864}{\left(\frac{100 - 20,21}{100}\right)}$$

$Mu_{casca} = 34.921,67$ kg/dia (casca úmida).

4.2.2. Poder Calorífífico Superior das cascas e dos cavacos de *Eucalyptus grandis*.

Os valores obtidos do Poder Calorífico Superior (PCS), foram:

PCScasca = 17,54 MJ/kg = 4.189 kcal/kg;

PCScavaco = 18,84 MJ/kg = 4.500 kcal/kg

4.2.3. Poder Calorífico Inferior (PCI) da casca de *Eucalyptus grandis*.

Aplicando-se a Equação (2) tem-se:

PCS_{casca} = 4.189 kcal/kg;
Ubu_{casca} = 20,21%;
Lv = 540 kcal/kg.

$$PCI_{casca} = 4.189.\left(1-\frac{20,21}{100}\right)-\left(\frac{20,21}{100}\right).540$$

PCI_{casca} = 3.233,27 kcal/kg.

4.2.4. Poder Calorífico Inferior (PCI) do lenho (cavacos de madeira) de *Eucalyptus grandis*.

De maneira similar (aplicação da Equação 2) ao procedimento adotado para o cálculo para a casca, foram considerados os seguintes valores:

$PCS_{madeira}$= 4.500 kcal/kg;
Lv = 540 kcal/kg.
$Ubu_{madeira}$ = 39 %;

$$PCI_{madeira} = 4.500.\left(1-\frac{39,0}{100}\right)-\left(\frac{39,0}{100}\right).540$$

$PCI_{madeira}$= 2.534,40 kcal/kg

O ANEXO V apresenta os resultados das análises de umidade das amostras. A média da umidade base úmida do lenho foi obtida através de relatórios da área de controle de qualidade da empresa em estudo, tendo como resultado: $Ubu_{madeira}$ = 39 %.

4.2.5. Quantidade de vapor que pode ser produzido com a queima das cascas.

Nas condições operacionais das caldeiras, foram determinadas as entalpias do vapor na saída e da água de alimentação, conforme o seguinte procedimento:

Pressão do vapor na saída = 2,2 MPa (22,43 kgf/cm^2).

Temperatura do vapor na saída da caldeira = 214°C.

Entalpia do vapor na saída da caldeira = 668,3 kcal/kg

Temperatura da água de alimentação = 108,8°C

Entalpia da água de alimentação = 108,99 kcal.kg

Aplicando-se a Equação (12) foi determinada a quantidade de vapor que pode ser produzido com a queima das cascas.

$$V = \frac{M_{casca} . m . PCI_{casca}}{\Delta h}$$

onde:

M_{casca} = 34.921,67 kg./dia = 34,92 t/dia (cascas);

μ = 0,8 (rendimento das caldeiras = 80%);

PCI_{casca} = 3.233,27 kcal/kg;

Δh = 668,3 – 108,99 = 559,31 kcal/kg.

Portanto:

$$V = \frac{34.921,67 \cdot 0,80 \cdot 3.233,27}{559,31}$$

V = 161.500,69 kg/dia (vapor saturado, 2,2 MPa)

4.2.6. Massa de madeira (cavacos), que se pode economizar com a queima das cascas.

Com a aplicação da Equação (13) foi calculada a massa de madeira economizada, utilizando-se o PCI do cavaco de madeira.

$$M_{madeira} = \frac{V.\Delta h}{\mu.PCI_{cavaco}}$$

Onde:

$M_{madeira}$ = massa equivalente em madeira úmida com a queima das cascas (kg/dia);

V = vapor que se pode obter com a queima dos resíduos = 161.500,69 kg/dia;

PCI_{cavaco} = poder calorífico inferior do cavaco de madeira = 2.534,40 Kcal/kg;

Δh = 559,31 kcal/kg;

μ = 0,80 (rendimento 80%).

$$M_{madeira} = \frac{161.500,69 \cdot 559,31}{0,80 \cdot 2.534,40}$$

$M_{madeira}$ = 44.551,45 kg/dia.

4.2.7. Conversão de massa para volume de madeira a ser economizada.

O valor médio encontrado para a densidade da madeira na umidade a base seca de 63,9% foi de: $\rho_{63,9}$ = 774,5 kg/m^3.

A densidade básica da madeira foi determinada pela Equação (7):

$$\rho_b = \frac{M_{0madeira}}{V_{63,9}}$$

Onde $V_{63,9}$ é o volume máximo ou volume saturado, pois, este valor de umidade esta bem acima do “Ponto de Saturação de Fibras” da madeira.

O valor da densidade básica encontrado para as amostras de madeira no trabalho foi de 484 kg/m^3.

Para conversão de massa para volume de madeira foi utilizada a Equação (14).

$$V_{madeira} = \frac{M_{madeira}}{\rho_{63,9}}$$

Onde:

$V_{madeira}$ o volume equivalente de madeira úmida em m³(sólido)/dia;

$M_{madeira}$ a massa de madeira úmida = 44.551,45 kg/dia;

$\rho_{63,9}$ a densidade da madeira: 774,5 kg/m^3 (sólido).

$$V_{madeira} = \frac{44.551,45}{774,5}$$

$V_{madeira}$ = 57,52 m³/dia

Adotando-se um período de 360 dias por ano, obteve-se uma economia anual de madeira de:

$V_{madeira} = 57,52 \cdot 360$

$V_{madeira}$ = 20.707m^3 /ano

Os ANEXOS III e IV, apresentam valores médios de consumo de madeira (*Eucalyptus grandis*), destinado à queima nas caldeiras, obtendo-se os seguintes resultados:

Madeira para queima = (8.918,60 + 3.841,83) · 12 = 153.125 m³/ano.

A madeira para geração de energia térmica economizada com a queima das cascas representa 13,52 % do volume anual de madeira para queima.

4.3. Aferição da viabilidade econômica comparativa entre o aproveitamento das cascas e a madeira utilizada na geração de energia térmica da empresa.

4.3.1. Investimentos necessários para implantação do projeto.

A implantação da alternativa proposta de utilização das cascas para a produção da energia térmica representa um investimento de R$ 850.500,00. Os equipamentos com motor apresentam o maior investimento, alcançando R$ 574.000,00. Os equipamentos

sem motor, compreendendo as estruturas, materiais elétricos e a rubrica diversos, somam R$ 136.220,00. Os serviços de engenharia e montagem representam R$ 140.280,00 conforme tabela 4.1.

Tabela 4.1 Investimento necessário (R$). Fonte: Fornecedores Demuth (2006).

Equipamento	**Custo Parcial**	**Custo Total**
Equipamentos com motor:		
Picador de cascas	310.000,00	
Transportadores e peneiras	264.000,00	
Sub Total		574.000,00
Equipamentos sem motor:		
Estruturas metálicas	56.650,00	
Estruturas civis	20.000,00	
Materiais elétricos	23.570,00	
Diversos	36.000,00	
Sub Total		136.220,00
Serviços:		
Engenharia	46.000,00	
Montagens	94.280,00	
Sub Total		140.280,00
Total		**850.500,00**

4.3.2. Despesas anuais decorrentes da implantação do projeto.

4.3.2.1. Depreciação.

Aplicando-se a Equação 10, obtêm-se:

a) Equipamentos com motor:

Vi = R$ 574.000,00

Vf = R$ 574.000,00 · 0,20 = R$ 114.800,00

n = 15 anos

k = 0 (equipamentos novos)

$$D = (574.000,00 - 114.800,00) \cdot \frac{(15 - 0 + 1)}{15 \cdot (15 + 1)} \cdot 2$$

$$D = R\$\ 61.227,00 / \text{ano}$$

b) Equipamentos sem motor

Vi = R$ 136.220,00

Vf = 136.220,00 · 0,10 = R$ 13.622,00

n = 15 anos

k = 0 (equipamentos novos)

$$D = (136.220,00 - 13.622,00) \cdot \frac{(15 - 0 + 1)}{15 \cdot (15 + 1)} \cdot 2$$

$$D = R\$16.346,00/\text{ano}$$

Depreciação total:

Dtotal = 61.227,00 + 16.346,00

Dtotal = R$ 77.573,00/ano.

4.3.2.2. Sobressalentes.

O custo adotado foi de 1% ao ano com relação ao custo total do investimento. Portanto:

Custo = 850.500,00 · 0,01

Custo = R$ 8.505,00/ano.

4.3.2.3. Manutenção.

O custo adotado foi de 1,5% ao ano com relação ao investimento, sendo:

Custo = 850.500,00 · 0,015

Custo = R$ 12.758,00/ano.

A Tabela 4.2 destaca o demonstrativo de despesas anuais com a implantação do projeto, sendo que a depreciação atinge R$ 77.573,00; as despesas sobressalentes correspondem a R$ 8.505,00 e a manutenção, R$ 12.758,00.

Tabela 4.2: Demonstrativo de despesas (R$/ano).

Despesas	**Valor**
Depreciação total	77.573,00
Sobressalentes	8.505,00
Manutenção	12.758,00
Total	**98.836,00**

4.3.3. Custo evitado com a madeira para geração de energia térmica com a implantação do projeto.

O custo evitado representa a economia de madeira atualmente utilizada para queima nas caldeiras aproveitando-se as cascas de *Eucalyptus* como combustíveis. O resultado, conforme o procedimento adotado foi de:

Custo unitário médio da madeira = R$ 36,21/m^3 - Anexo VI.

Economia em madeira = 20.707 m^3 /ano – Item 4.2.7.

Custo evitado = 36,21 · 20.707

Custo evitado = R$ 749.800,00/ano.

4.3.4. Custo atual com madeira para geração de energia térmica.

Dos Anexos III e IV, obtêm-se o valor médio de consumo atual de madeira para geração de energia térmica, que é de 12.760,43 m^3(sólido)/mês.

Convertendo-se este valor para consumo anual, obtêm-se:

Consumo = 12.760,43 · 12

Consumo = 153.125 m^3/ano.

Custo unitário médio da madeira = R$ 36,21/m^3 (sólido) – Anexo VI.

Custo atual = 153.125 · 36,21

Custo atual = R$ 5.544.656,00/ano.

4.3.5. Custo previsto com madeira para geração de energia térmica com a implantação do projeto, sem levar em consideração as despesas com manutenção e sobressalentes.

O custo previsto com madeira sem considerar as despesas foi determinado utilizando-se a Equação 15.

Custo previsto = custo atual da madeira – custo evitado com madeira (15)

Custo atual = R$ 5.544.656,00/ano – Item 4.3.4.

Custo evitado = R$ 749.800,00/ano – Item 4.3.3.

Custo previsto = 5.544.656,00 – 749.800,00

Custo previsto = R$ 4.794.856,00/ano.

4.3.6. Custo previsto com madeira para geração de energia térmica com a implantação do projeto, levando-se em consideração as despesas de manutenção e sobressalentes.

Este custo foi determinado com a aplicação da Equação 16, sendo:

Custo previsto = Custo previsto sem despesas + Custo das despesas (16)

Custo previsto sem despesas = R$ 4.794.856,00/ano – item 4.3.5.

Custo das despesas (manutenção + sobressalentes) = R$ 21.263,00/ano.

Custo previsto = 4.794.856,00 + 21.263,00

Custo previsto = R$ 4.816.119,00/ano

4.4. Análise da viabilidade econômica da aplicação das cascas para geração de energia térmica.

Para a análise econômico-financeira, foram considerados os resultados dos cálculos elaborados, ou seja:

Custo atual com madeira para queima = R$ 5.544.656,00/ano – Item 4.3.4.

Custo previsto com madeira para queima = R$ 4.816.119,00/ano (com despesas de manutenção e sobressalentes)-Item 4.3.6.

Depreciação total = R$ 77.573,00/ano – Item 4.3.2.1.

Com a entrada desses valores na planilha de cálculo apresentada na Tabela 4.3, que utiliza a Equação 11, foram obtidos os índices financeiros necessários para avaliação econômica do empreendimento.

4.4.1.Resultados obtidos da planilha de cálculo – Tabela 4.3.

Os resultados obtidos foram:

Valor presente líquido (VPL) = R$ 28.613.419,19;

Taxa interna de retorno (TIR) = 76,43% ao ano;

Payback descontado = 2,43 anos.

TABELA 4.3.: AVALIAÇÃO DE PROJETO.
PROJETO: VIABILIDADE TECNICO ECONOMICA PARA APROVEITAMENTO DE CASCAS DE *EUCALYPTUS GRANDIS* COMO COMBUSTÍVEL.
METODO: PAY-BACK DESCONTADO, VALOR PRESENTE E TIR.

		ANOS														
DESCRIÇÃO	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
CUSTO ATUAL		R$5.544.656,00	R$5.544.656,00	R$5.544.656,00	R$5.544.656,00	R$5.544.656,00	R$5.544.656,00	R$5.544.656,00	R$5.544.656,00	R$5.544.656,00	R$5.544.656,00	R$5.544.656,00	R$5.544.656,00	R$5.544.656,00	R$5.544.656,00	R$5.544.656,00
CUSTO PREVISTO - QUEIMA CASCAS		(R$4.816.119,00)	(R$4.816.119,00)	(R$4.816.119,00)	(R$4.816.119,00)	(R$4.816.119,00)	(R$4.816.119,00)	(R$4.816.119,00)	(R$4.816.119,00)	(R$4.816.119,00)	(R$4.816.119,00)	(R$4.816.119,00)	(R$4.816.119,00)	(R$4.816.119,00)	(R$4.816.119,00)	(R$4.816.119,00)
DEPRECIAÇÃO		(R$77.573,00)	(R$77.573,00)	(R$77.573,00)	(R$77.573,00)	(R$77.573,00)	(R$77.573,00)	(R$77.573,00)	(R$77.573,00)	(R$77.573,00)	(R$77.573,00)	(R$77.573,00)	(R$77.573,00)	(R$77.573,00)	(R$77.573,00)	(R$77.573,00)
LUCRO TRIBUTÁVEL		R$650.964,00	R$650.964,00	R$650.964,00	R$650.964,00	R$650.964,00	R$650.964,00	R$650.964,00	R$650.964,00	R$650.964,00	R$650.964,00	R$650.964,00	R$650.964,00	R$650.964,00	R$650.964,00	R$650.964,00
ATIVO IMOBILIZADO	(R$850.500,00)	R$0,00	R$0,00	R$0,00	R$0,00	R$0,00	R$0,00	R$0,00	R$0,00	R$0,00	R$0,00	R$0,00	R$0,00	R$0,00	R$0,00	R$0,00
FLUXO DE CAIXA S/ DESCONTO	(R$850.500,00)	R$650.964,00	R$650.964,00	R$650.964,00	R$650.964,00	R$650.964,00	R$650.964,00	R$650.964,00	R$650.964,00	R$650.964,00	R$650.964,00	R$650.964,00	R$650.964,00	R$650.964,00	R$650.964,00	R$650.964,00
FLUXO DE CAIXA S/ DESC. ACUMUL	(R$850.500,00)	(R$199.536,00)	R$451.428,00	R$1.102.392,00	R$1.753.356,00	R$2.404.320,00	R$3.055.284,00	R$3.706.248,00	R$4.357.212,00	R$5.008.176,00	R$5.659.140,00	R$6.310.104,00	R$6.961.068,00	R$7.612.032,00	R$8.262.996,00	R$8.913.960,00
FLUXO DE CAIXA DESCONTADO A UMA TAXA DE 8 % a.a.		8,00														
FATORES DE DESCONTO	1,000	0,926	0,857	0,794	0,735	0,681	0,630	0,583	0,540	0,500	0,463	0,429	0,397	0,368	0,340	0,315
FLUXO DE CAIXA DESCONTADO	(R$850.500,00)	(R$184.755,56)	R$387.026,75	R$875.114,31	R$1.288.769,00	R$1.636.339,79	R$1.925.347,18	R$2.162.560,11	R$2.354.066,07	R$2.505.334,87	R$2.621.276,80	R$2.706.295,45	R$2.764.335,88	R$2.798.928,37	R$2.813.228,22	R$2.810.051,95
FLUXO DE CAIXA DESCONTADO ACUMULADO		(R$1.035.255,56)	(R$648.228,81)	R$226.885,51	R$1.515.654,51	R$3.151.994,30	R$5.077.341,48	R$7.239.901,59	R$9.593.967,66	R$12.099.302,53	R$14.720.579,32	R$17.426.874,77	R$20.191.210,65	R$22.990.139,02	R$25.803.367,24	R$28.613.419,19

VALOR PRESENTE LIQUIDO (VPI)	R$28.613.419,19
TAXA INTERNA DE RETORNO (TIR)	76,43%
" PAY BACK "	2,43 anos

5. CONCLUSÕES.

Conforme os critérios, metodologia e procedimentos adotados para a realização desta pesquisa, conclui-se:

5.1. Aspectos técnicos.

5.1.1. Poder calorífico da madeira e da casca de *Eucalyptus* grandis.

Os resultados médios de poder calorífico para a madeira determinados neste trabalho foram:

$PCS_{madeira}$ = 4.500 kcal/kg;

$PCI_{madeira}$ = 2.534,40 kcal/kg, ($Ubu_{madeira}$ = 39 %).

Para a casca, os resultados obtidos foram:

PCS_{casca} = 4.189 kcal/kg;

PCI_{casca} = 3.233,27 kcal/kg, (Ubu_{casca} = (20,21%).

Embora o valor do poder calorífico superior da madeira ($PCS_{madeira}$) seja maior que o valor do poder calorífico superior da casca (PCS_{casca}), seu poder calorífico inferior ($PCI_{madeira}$) é menor que o poder calorífico inferior da casca (PCI_{casca}). A inversão dos valores dos resultados obtidos deve-se a umidade a base úmida da casca (Ubu_{casca} =20,21%), menor que a umidade a base úmida da madeira ($Ubu_{madeira}$ = 39 %).

Devido à dificuldade para picagem de cascas de *Eucalyptus* em picadores de facas, as cascas passam várias vezes pelas facas e contra faca no interior do

picador até atingirem a granulometria que permita a passagem pela grelha do picador. Neste processo parte da potencia útil do motor elétrico é transformada em calor que é transferido para as cascas reduzindo sua umidade com a evaporação da água contida nas mesmas.

A quantidade de energia que efetivamente pode ser obtida de um determinado combustível é proporcional ao valor de seu poder calorífico inferior (PCI), portanto a casca nas condições operacionais estudadas neste trabalho é um combustível mais atrativo que a madeira (lenho).

5.1.2. Quatidade de cascas de *Eucalyptus* grandis geradas.

A quantidade média de cascas geradas na unidade de fabricação em estudo e descartadas do processo de fabricação apresentou os seguintes valores:

Massa seca de cascas = 27.864 kg/dia;

Massa úmida de cascas = 34.921,67 kg/dia (umidade com base em massa úmida de 20,21%).

5.1.3. Volume de madeira que se pode economizar com a queima das cascas.

O volume médio anual de madeira utilizada para a queima nas caldeiras é de 153.125 m³/ano. Com a queima das cascas o volume economizado com madeira para esta finalidade é de 20.707 m³/ano, que representa uma economia anual de 13,52% do volume médio anual de madeira para a geração de energia térmica demandada pela empresa em estudo.

5.2. Aspectos econômicos.

a) O projeto é técnico e economicamente viável;

b) A riqueza da empresa aumentará em R$ 28.613.419,19 com a implantação do projeto, conforme resultado obtido pelo cálculo do valor presente líquido (VPL);

c) A taxa interna de retorno do projeto (TIR) equivale a 76,43%, indicando atratividade satisfatória;

d) O retorno do investimento acontecerá em aproximadamente 2 anos e 5 meses.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

ABIMCI; Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente. ESTUDO SETORIAL PRODUTOS DE MADEIRA, 2003, Curitiba, 2003. p.67.

ABIPA; Associação Brasileira da Indústria de Painéis de Madeira**.** RELATÓRIO SETORIAL. São Paulo, 2006.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR (8693**)** 1997. Rio de Janeiro: 1997.

ANDRADE, E.N. **O eucalipto**. 2ª. ed. São Paulo: 1961. 667p.

ANDRADE, S.C. **Avaliação técnica, social, econômica e ambiental de dois sistemas de colheita florestal no litoral Norte da Bahia**. 1998. 125f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1998.

ANDRITZ Redução dos custos de energia na indústria de papel e celulose. In: 10º. CONGRESSO ANUAL DA ABCP. 1977. São Paulo, 1977. Anais 1997. 563p.

BAEZ, M.N. **Variabilidade da densidade básica da madeira em eucalipto spp e sua implicação no melhoramento genético**. 1993. 35f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, ESALQ/LCF, Piracicaba, 1993.

BENADUCE, C. **Fabricação de painéis de média densidade (MDF) a partir de fibras de *Eucalyptus Grandis* W. Hill ex Maiden e pinus caribara var. hondurensis.** 1998. 113f Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 1998.

BERLE, G. **O empreendedor verde: oportunidade de negócios em que você pode ajudar a salvar a terra e ainda ganhar dinheiro**. São Paulo: Makron,Macgraw-Hill, 1992. 296 p.

Bio-combustível: cadeia produtiva da floresta a fabrica de energia, **Revista Timberjack News**. 2002. n.1, p.4-5.

BRITO, J. O. Madeira para a floresta: a verdadeira realidade do uso de recursos florestais. In:. CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO. 1986, Recife, Anais, SOCIEDADE BRASILEIRA DE SILVICULTURA, 1986.p.188-193.

COSTA, V.E. **Caracterização Física da Madeira: um estudo aplicado à qualidade e produtividade de reflorestamento de *Eucalíptus grandis.*** 2005. 113f. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP, Botucatu, 2005.

FARINHAQUE, R**. Influência da umidade no poder calorífico da madeira de bracatinga (Mimosa Scrabella, Benth)** e aspectos gerais de combustão. 1981. Curitiba: FUPEF, Série Técnica, 1981.p.14.

FERRARI, F. Influenza dell'umidita' e della densita' basale sul potere calorífico Del legno. 1988. Centro di sperimentazione agrícola e forestale. **Quaderni di recerca**, n. 21, 1988. p.16.

FERREIRA, M.; KAGEYAMA, P. Y. Melhoramento genético da densidade da madeira de eucalipto. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO 3, 1978, Manaus, Anais. São Paulo: 1978 SBS, v.2, n.14, p.148-152.

FIGUEIREDO, A.; BERNARDI, A. R. Comportamento da casca ao longo do tronco em plantios de pinus elliotii estabelecidos no litoral e planalto do Estado de Santa Catarina. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 7. 1993, Curitiba, Anais. São Paulo: 1993 SBS/SBEF, V. 2, p.495-498.

GARCIA, J. N.; LIMA, I. L. Propriedades físicas e mecânicas como indicadores de seleção. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 6. 1990, Campos do Jordão. Anais. São Paulo: 1990. SBS/SBEF, v.3, p.685-689.

GOES, E. **Os eucaliptos: identificação e monografia de 121 espécies existentes em Portugal**. 1985. 372f. Portugal: Portucel, 1985.

GONÇALVES, M. T. T.; RUFINO, R. T. Aproveitamento de resíduos gerados na indústria madeireira. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRA E EM ESTRUTURAS DE MADEIRAS, 3., 1989, São Carlos. Anais. São Carlos: S.n., 1989. 110 p.

HAKKILA, P. Forest Chips as fuel for heating plants in Finland. **Folia Forestalia No. 586**, 1984. p. 1-62

HILLIS, W.E. Wood quality and utilization. In:*EUCALYPTUS* FOR WOOD PRODUCTION. 1978, Adelaide. p.260-289.

HOWARD, E. T.; Heat of combustion of various southern pine materials. **Wood Science**, p.197. 1973.

Jornal Folha de São Paulo. **Área reflorestada tem queda de 5% em SP**. São Paulo, 09/09/2002, C1 p.

JUNIOR, A.D.S. Duratex expande produção de painéis e frota de equipamentos. **ELO**, Rio de Janeiro, ano.6, n.7, p.34-36, 2005.

JUVENAL, T. L.; MATTOS, R. L. G. Painéis de madeira reconstituída. In: BNDES BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. 2002. Área de setores produtivos 1. São Paulo, 2002. p.21.

KARCHESY, J.; KOCH, P. **Energy production from hardwoods growing in sothern pine sites**. U.S. Forest Service, General Report 50 – 24, 1979. 59 p.

KOOLLMANN, F. F. P.; KUENZI, E. W.; STAMM, A. J. Principles of wood science and technology. **II Wood based material**. New York: Springer – Verlag, 1975. 703 p.

LIMA, A. F.; JARA E. R. P.; AFONSO, V. A. Madeira como matéria prima para fabricação de pasta celulósica. In: **IPT/Escola Senai Theobaldo de Negris**. Celulose e Papel: Tecnologia de fabricação da pasta celulósica. São Paulo: IPT, vol. 1, 1988. 559 p.

LIMA, W. P. **Impacto ambiental do eucalipto**. 2ª. ed., São Paulo: Ed. da Universidade de São Paulo, 1993. 301 p.

LOETSCH, F.; ZOHRER, F.; HALLER, K. **Forest inventory**. Munchen: BLV Verlangscellechaft, 1973. 469 p.

LOPES, G. A. **Qualidade da madeira de eucalipto saligna Smith, de Itatinga, associada aos padrões de casca apresentados pela população**. 2000. 133f. Dissertação (Mestrado em Agromia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2000.

MACHADO, C. C. **Exploração florestal: V parte**. Viçosa: UFV, 1985. 15 p.

MACHADO, C. C.; LOPES, E. S. Análise da influência do comprimento de toras de eucalipto na produtividade e custo da colheita e transporte florestal. In: **Revista CERNE** Lavras, 2000, v. 6, n. 2, p.124–129, 2000.

MENDONÇA FILHO, W. F. Abate de árvores totalmente mecanizado. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE EXPLORAÇÃO, TRANSPORTE, ERGONOMIA E SEGURANÇA EM REFLORESTAMENTO. 1997, Curitiba. Anais Universidade Federal do Paraná/FUPEF, 1997. p.267-280.

NETO, F. de P.; NUNES, J. R. S.; CAMPOS, J. C. C. C.; VALE, A. B. do V. Análise de casca de reflorestamento de eucalipto de diferentes idades e condições de local, espécie e método de regeneração. In: **Revista árvore,** Viçosa, v.15, n.1, p.55-65, 1991.

NORONHA, J. F. **Projetos Agropecuários, administração financeira, orçamentação e avaliação econômica**. São Paulo: Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz, 1981.

NUNES, J. R. S. **Análise do volume e da percentagem de casca em povoamentos de eucaliptos de origem híbrida, segundo a idade, local e espécie de regeneração**. 1981. 120f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1981.

PANSHIM, A. J.; ZEEUW, C. **Textbook of wood technology**. 3.ed. New York: Ed. Macgraw-Hill, 1970.

PERA, H. **Geradores de vapor: um compêndio sobre conversão de energia com vistas à preservação da ecologia**. 2ª. ed., São Paulo: Fama, 1990, 571 p.

PERRY, R. H.; CHILTON, C. H. **Manual de engenharia química**. 5ª. Ed., Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1980, p.3-169.

PONCE, R. H.; WATAI, L. T. Secagem da madeira. INSTITUTO DE PESQUISA TECNOLÓGICA, 1985. Brasília 1985. p.72.

REZENDE, M.A. **Uma abordagem não convencional sobre as principais características físicas da madeira, com ênfase na retratibilidade, massa específica e técnica de atenuação**

da radiação gama. 1997. 138f. Tese (Livre Docência em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP, Botucatu, 1997.

SANTINI, E. J. **Secagem de madeira em estufa solar e sua comparação com os métodos convencionais**. 1985. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal do Paraná Curitiba: 1985.

SANTOS, S. L. M. **Alocação ótima de máquinas na colheita de madeira**. 1995. 99f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa: 1995.

Setor de Química Celulose e Energia – DEPARTAMENTO DE SILVICULTURA DA ESALQ – USP. **Determinação da porcentagem de casca e variação dentro da árvore** . Piracicaba, periódico. n 5, 1983, 4p.

Sistema de colheita e transporte na Duratex. In: **Simpósio brasileiro sobre colheita e transporte florestal**. Vitória:UFV/SJV,1997. Anais. P.24-45.

JUNIOR, A. Duratex expande produção de painéis e frota de equipamentos. **ELO**, Rio de Janeiro, ano.6, n.7, p.34-36, 2005.

ULBANERE, R. C. e CASTRO, R. A. **Auto programa para avaliação econômica preliminar**. Faculdade de Engenharia de Bauru – FEB – UNESP, 1997. 45 p.

VITAL, B.R. Métodos de determinação da densidade da Madeira. SIF – SICIEDADE DE INVESTIGAÇÕES FLORESTAIS. 1984, Viçosa. Boletim Técnico n.1. p.21. 1984.

ANEXOS

Anexo I: Consumo de vapor e índice de consumo do processo de chapa dura no ano de 2005. Fonte: Duratex S.A.(2006).

	PROCESSO DE CHAPA DURA (ÚMIDO)	
MÊS	CONSUMO ton(vapor) / mês	ÍNDICE ton(vapor) / ton(chapa)
Janeiro	44323,10	2,63
Fevereiro	44985,40	2,66
Março	44525,40	2,48
Abril	47878,20	2,53
Maio	45008,50	2,50
Junho	46298,50	2,56
Julho	45308,10	2,43
Agosto	46377,55	2,41
Setembro	40115,50	2,39
Outubro	41878,00	2,33
Novembro	42046,52	2,36
Dezembro	17212,77	2,40
Média	**42163,13**	**2,47**

Consumo médio horário de vapor :

Quantidade de dias por mês = 30 dias;

Regime operacional = 24 h/dia.

$$CONSUMOmédio = \frac{42.163,13}{30 \cdot 24}$$

CONSUMOmédio = 58,56 t/h de vapor saturado.

Anexo II: Consumo de vapor e índice de consumo do processo de chapa MDF e HDF no ano de 2005.
Fonte: Duratex S.A.(2006).

MÊS	**CONSUMO** ton(vapor)/mês	**ÍNDICE** ton(vapor)/m³(chapa)
Janeiro	9566,60	0,51
Fevereiro	9052,30	0,46
Março	9551,40	0,42
Abril	10920,10	0,47
Maio	9299,50	0,44
Junho	7812,80	0,38
Julho	4909,10	0,40
Agosto	5364,80	0,42
Setembro	8226,00	0,48
Outubro	9648,00	0,48
Novembro	12268,00	0,56
Dezembro	5034,00	0,54
Média	**8.471,05**	**0,46**

Consumo médio horário de vapor :

Quantidade de dias por mês = 30 dias;

Regime operacional = 24 h/dia.

$$CONSUMOmédio = \frac{8.471,05}{30 \cdot 24}$$

CONSUMOmédio = 11,77 t/h de vapor saturado.

Anexo III: Consumo médio em m³ (sólido) / mês de *Eucalyptus* grandis do processo de chapa dura.

Índice: m³ (sólido) de madeira / ton de chapa produzida.

a) MADEIRA PARA PRODUÇÃO DE CHAPAS: Fonte: Duratex S.A.(2006).

ANO	**ÍNDICE MÉDIO (m³ / ton)**	**CONSUMO MÉDIO (m³ / mês)**
2003	2,4584	42.012,97
2004	2,4444	38.804,65
2005	2,5903	44.102,91
MÉDIA	**2,4977**	**41.640,18**

b) MADEIRA PARA PRODUÇÃO DE ENERGIA: Fonte: Duratex S.A.(2006).

ANO	**ÍNDICE MÉDIO** (m³ / ton)	**CONSUMO MÉDIO** (m³ / mês)
2003	0,4221	7.238,84
2004	0,5526	8.673,12
2005	0,6393	10.843,84
MÉDIA	**0,5380**	**8.918,60**

Anexo IV: Consumo médio em m³ (sólido) / mês de *Eucalyptus* grandis do processo de MDF e HDF.

Índice: m³ (sólido) de madeira / m³ de chapa produzida.

a) MADEIRA PARA PRODUÇÃO DE CHAPAS: Fonte: Duratex S.A.(2006).

ANO	**ÍNDICE MÉDIO (m³ / m³)**	**CONSUMO MÉDIO (m³ / mês)**
2003	2,0673	25.447,05
2004	1,8798	34.972,10
2005	1,7863	32.841,08
MÈDIA	**1,9111**	**31.086,74**

b) MADEIRA PARA PRODUÇÃO DE ENERGIA: Fonte: Duratex S.A.(2006).

ANO	**ÍNDICE MÉDIO (m³ / m³)**	**CONSUMO MÉDIO (m³ / mês)**
2003	0,4345	4.389,68
2004	0,2097	3.927,19
2005	0,1920	3.208,61
TOTAL	**0,2787**	**3.841,83**

Anexo V: Análise de umidade com base em massa úmida de amostras de cascas de *Eucalyptus* grandis. Fonte: Duratex S.A.(2006).

Número da amostra	Mu (g)	Mo (g)	Ma (g)	Ubu (%)
1	65,46	52,42	13,04	19,92
2	70,59	55,55	15,04	21,31
3	70,56	54,61	15,95	22,60
4	71,22	58,01	13,21	18,55
5	66,54	53,05	13,49	20,27
6	68,94	55,45	13,49	19,57
7	68,00	54,04	13,96	20,53
8	68,35	55,43	12,92	18,90
9	66,22	54,21	12,01	18,14
10	70,95	55,28	15,67	22,09
Média	**68,68**	**54,80**	**13,88**	**20,21**

Obs.: Os resultados foram obtidos com aplicação das seguintes equações:

$$Ma = Mu - Mo \qquad (3)$$

$$Ubu = \frac{Ma}{Mu} \cdot 100 \qquad (4)$$

Sendo:

Ma = Massa de água (g);

Mu = Massa úmida (g);

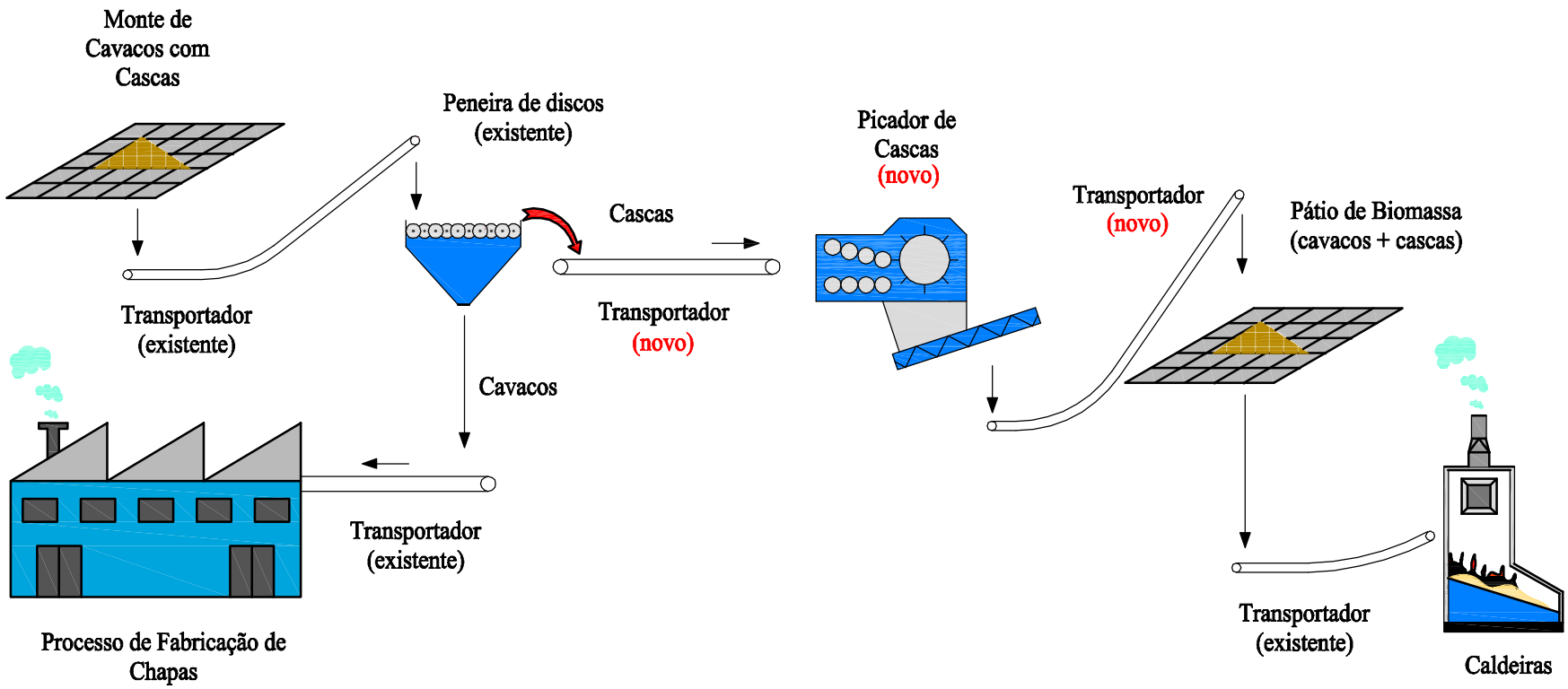
Mo = Massa seca (g);

Ubu = Umidade com base em massa úmida (%).

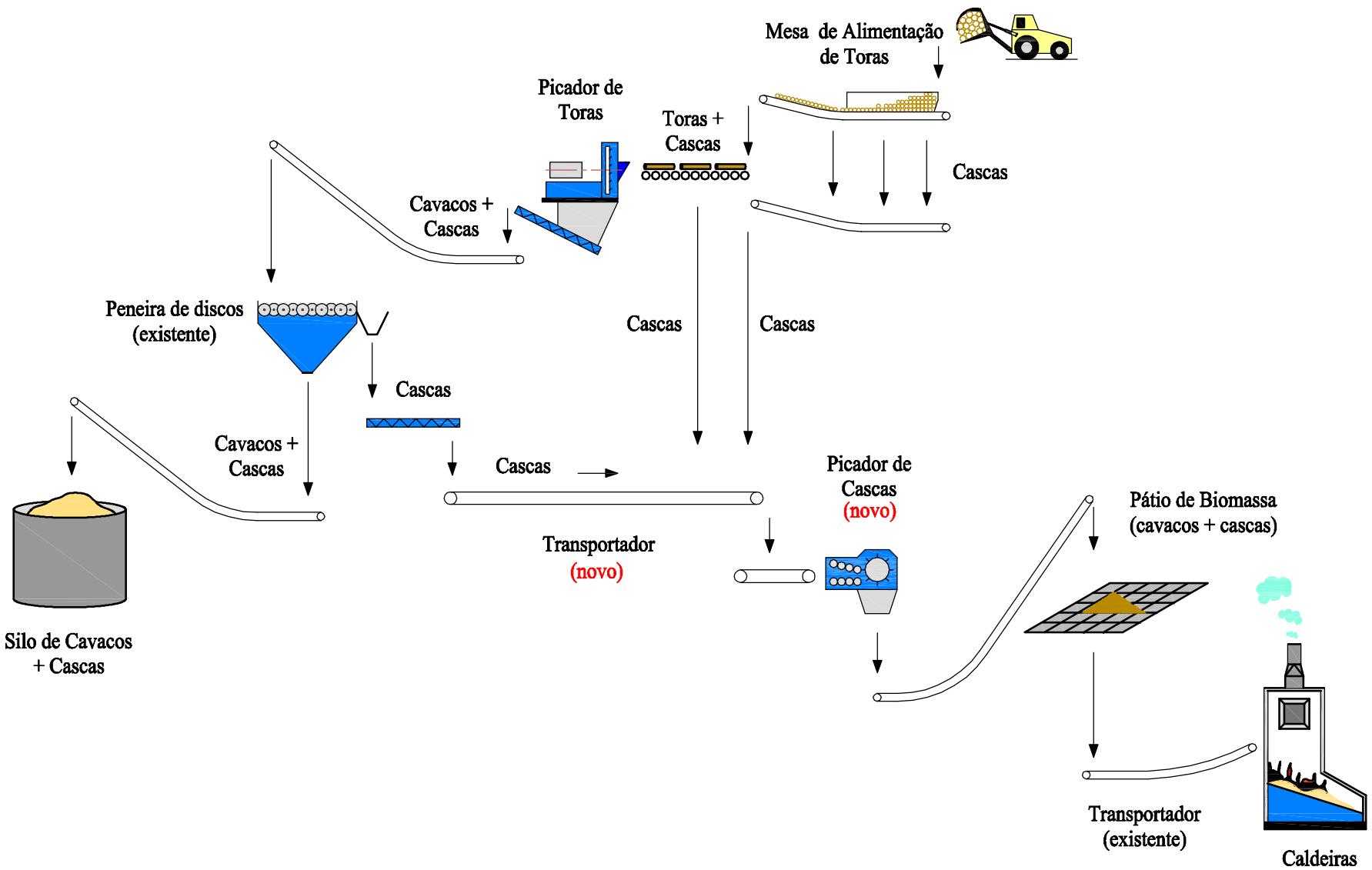
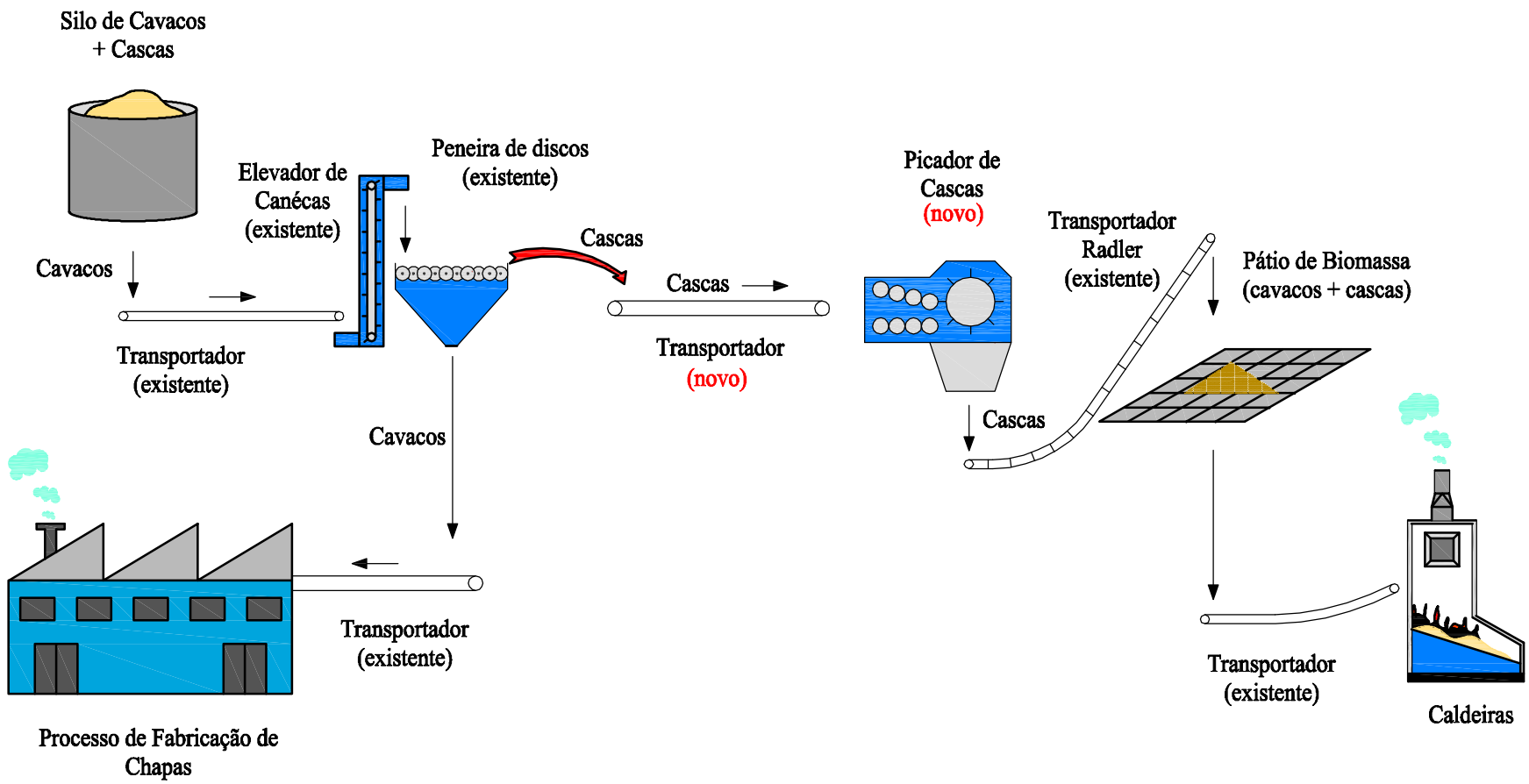
Anexo VI: Preço médio mensal da madeira para produção de energia térmica no período de Agosto de 2005 a Julho de 2006. Fonte: Duratex S.A.(2006).

MÊS / ANO	PREÇO MÉDIO (R$ /m³)
Agosto / 2005	38,50
Setembro / 2005	38,04
Outubro / 2005	39,05
Novembro / 2005	39,13
Dezembro / 2005	40,47
Janeiro / 2006	35,64
Fevereiro / 2006	35,15
Março / 2006	35,26
Abril / 2006	33,64
Maio / 2006	33,27
Junho / 2006	32,98
Julho / 2006	33,33
Média	**36,21**

Anexo VII: Fluxograma simplificado das instalações necessárias para picagem das cascas separadas pela peneira de discos do processo de fabricação de chapa dura.



Anexo VIII: Fluxograma simplificado das instalações necessárias para picagem das cascas separadas nos transportadores de alimentação de toras e peneira de discos durante a picagem das toras nos processos MDF e HDF.



Anexo IX: Fluxograma simplificado das instalações necessárias para picagem das cascas separadas na peneira de discos durante a classificação dos cavacos nos processos MDF e HDF.