

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS

CÂMPUS DE BOTUCATU

**APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS FLORESTAIS DE *Eucalyptus spp* NA  
INDÚSTRIA DE FABRICAÇÃO DE CELULOSE PARA GERAÇÃO DE ENERGIA  
TÉRMICA E ELÉTRICA**

**FRANCISCO LUIZ SANCHEZ SANTIAGO**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências  
Agronômicas da Unesp – Câmpus de Botucatu,  
para obtenção do título de Doutor em  
Agronomia - Energia na Agricultura

BOTUCATU-SP

MAIO - 2013

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS

CÂMPUS DE BOTUCATU

**APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS FLORESTAIS DE *EUCALYPTUS* NA  
INDÚSTRIA DE FABRICAÇÃO DE CELULOSE PARA GERAÇÃO DE ENERGIA  
TÉRMICA E ELÉTRICA**

**FRANCISCO LUIZ SANCHEZ SANTIAGO**

Orientador: Prof. Dr. Marcos Antonio de Rezende

Tese apresentada à Faculdade de Ciências  
Agronômicas da Unesp – Câmpus de Botucatu,  
para obtenção do título de Doutor em  
Agronomia - Energia na Agricultura

BOTUCATU-SP

MAIO 2013

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

---

S235a Santiago, Francisco Luiz Sanchez, 1952-  
Aproveitamento de resíduos florestais de *Eucalyptus spp* na indústria de fabricação de celulose para geração de energia térmica e elétrica / Francisco Luiz Sanchez  
Santiago. - Botucatu : [s.n.], 2013  
xi, 109 f. : il. (algumas color.), fots. color., gráfs. color., tabs.

Tese (Doutorado)- Universidade Estadual Paulista,  
Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2013  
Orientador: Marcos Antonio de Rezende  
Inclui bibliografia

1. Eucalipto - Subprodutos. 2. Resíduos de madeira como combustível. 3. Florestas - Subprodutos. 4. Biomassa vegetal. 5. Biocombustíveis. 6. Resíduos como combustível. 7. Energia - Fontes alternativas. 8. *Eucalyptus spp*. I. Rezende, Marcos Antonio de. II. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônômicas. III. Título.

---

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS

CAMPUS DE BOTUCATU

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: “APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS FLORESTAIS DE *Eucalyptus* spp.  
NA INDÚSTRIA DE FABRICAÇÃO DE CELULOSE PARA GERAÇÃO  
DE ENERGIA TÉRMICA E ELÉTRICA”


ALUNO: FRANCISCO LUIZ SANCHEZ SANTIAGO

ORIENTADOR: PROF. DR. MARCOS ANTONIO DE REZENDE

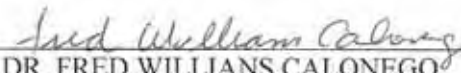
Aprovado pela Comissão Examinadora

  
\_\_\_\_\_  
PROF. DR. MARCOS ANTONIO DE REZENDE

  
\_\_\_\_\_  
PROF. DR. MÁRIO DE OLIVEIRA NETO

  
\_\_\_\_\_  
PROF. DR. JOSÉ ROBERTO CORRÊA SAGLIETTI

  
\_\_\_\_\_  
PROF. DR. VLADIMIR ELIODORO COSTA

  
\_\_\_\_\_  
PROF. DR. FRED WILLIANS CALONEGO

Data da Realização: 22 de março de 2013

À minha esposa Lígia e aos  
meus filhos José Henrique  
José Eduardo e Maria Helena  
pelo apoio, compreensão e amor.

À Helena, minha mãe,  
José meu pai,  
Maria Helena minha sogra,  
José Newalde meu sogro  
Tia Ruthi  
In memoriam

Dedico

### **AGRADECIMENTO ESPEDIAL**

Ao meu orientador Prof. Dr. Marcos Antonio de Rezende, pelo seu valioso apoio compreensão e por estar presente de maneira valiosa, amiga e sábia.

## **AGRADECIMENTOS**

- Á Lwarcel LTDA pela oportunidade de conclusão do curso.
- Aos Professores do curso de pós-graduação da Área de Energia na Agricultura.
- Aos funcionários da seção de pós-graduação pela atenção e prestatividade.
- Ao colega Edson M. Bruder, pela prestimosa colaboração em todas as fases do trabalho, sem a qual com certeza não concluiria o curso em tempo hábil.
- Enfim, a todos as pessoas que de alguma maneira contribuíram para a conclusão do curso.

## SUMÁRIO

	<b>Página</b>
LISTA DE TABELAS .....	viii
LISTA DE FIGURAS .....	x
RESUMO .....	01
SUMMARY .....	03
1. INTRODUÇÃO .....	05
1.1. Objetivos .....	06
2. REVISÃO DE LITERATURA .....	08
2.1. Biomassa florestal como energia, importância e geração .....	08
2.2. Povoamentos florestais de florestas plantadas .....	11
2.3. Densidade da madeira .....	17
2.4. Setor Energético Brasileiro .....	19
2.5. Energia da Madeira .....	23
2.6. Tecnologias de produção de energia a partir da biomassa florestal .....	28
2.6.1. Combustão Direta .....	28
2.6.2. Pirólise .....	30
2.6.3. Gaseificação .....	31
2.6.4. Liquefação .....	34
2.6.5. Processos Biológicos .....	34
2.7. Resíduos gerados na floresta .....	35
2.7.1. Características dos resíduos da colheita florestal .....	37
2.7.2. Picadores e trituradores de resíduos florestais .....	38
2.7.2.1. Picadores .....	39
2.7.2.2. Trituradores .....	40
2.7.3. Processo de cavaqueamento em toras curtas .....	40
2.7.3.1. Extração de resíduos florestais .....	40



2.7.3.2. Preparação dos cavacos nas margens de estradas.....	42
2.7.3.3. Preparação de cavacos em pátios intermediários.....	44
2.7.3.4. Preparação dos cavacos na indústria.....	45
2.7.3.5. Preparação dos cavacos nas florestas .....	46
2.7.4. Enfardamento dos resíduos florestais .....	47
2.7.5. Desbastes das árvores .....	49
2.7.6. Estoque de resíduos florestais .....	50
2.8. Caldeiras de leito fluidizado e caldeiras de recuperação de calor e produtos químicos em fábricas de celulose .....	50
2.8.1. Caldeiras de leito fluidizado .....	50
2.8.1.1. Sistema de leito fluidizado circulante (LFC).....	52
2.8.1.2. Sistema de leito fluidizado borbulhante (LFB) .....	53
2.8.2. Caldeiras de recuperação de calor e produtos químicos em fábricas de celulose .....	53
3. MATERIAL E MÉTODOS .....	56
3.1. Fábrica de celulose de <i>Eucalyptus</i> .....	56
3.2. Setor florestal .....	57
3.3. Sistema de colheita da madeira praticado pela empresa.....	57
3.3.1. Características da colheita semi-mecanizada realizada pela empresa estudada.....	59
3.3.2. Características da colheita mecanizada realizada pela empresa estudada .....	60
3.4. Dados e parâmetros do ciclo termodinâmico e a geração de potência energética na unidade Fabril.....	61
3.4.1. Caldeira de recuperação .....	61
3.4.2. Caldeira de leito fluidizado .....	63
3.4.3. Consumo, custo de combustíveis e produção de vapor .....	65
3.5. Geração de cascas e resíduos .....	66
3.5.1. Cascas .....	66

3.5.2. Resíduos .....	68
3.6. Determinação do teor de umidade com base em massa úmida das cascas e resíduos .....	69
3.7. Determinação da densidade do lenho .....	70
3.8. Determinação do poder calorífico das cascas que permanecem nas florestas e dos resíduos florestais vendidos a terceiros após a colheita da madeira .....	72
3.8.1. Poder calorífico superior (PCS) das cascas e dos resíduos.....	72
3.8.2. Poder calorífico inferior (PCI) das cascas e dos resíduos.....	73
3.8.3. Poder calorífico líquido (PCLu) das cascas e dos resíduos .....	74
3.9. Cálculos para aproveitamento das cascas, resíduos e equivalência dos custos com biomassa florestal adquirida de terceiros para geração de energia elétrica e térmica da empresa .....	75
3.10. Fluxograma do processo de preparação e utilização da madeira.....	77
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	79
4.1. Cálculo do aproveitamento das cascas como combustível para geração de energia elétrica e térmica da unidade industrial .....	79
4.1.1. Geração média de cascas a serem retiradas das florestas .....	79
4.1.2. Teor de umidade com base em massa úmida das cascas .....	82
4.1.3. Poder calorífico das cascas .....	83
4.1.4. Quantidade de vapor que pode ser produzido com a queima das cascas na caldeira de leito fluidizado.....	84
4.1.5. Massa de biomassa adquirida de terceiros que se pode economizar com a queima das cascas na caldeira de leito fluidizado.....	86
4.2. Cálculo do aproveitamento dos resíduos vendidos a terceiros como combustível para geração de energia elétrica e térmica da unidade industrial.....	87
4.2.1. Geração média de resíduos florestais vendidos a terceiros.....	87
4.2.2. Teor de umidade com base em massa úmida dos resíduos.....	89
4.2.3. Poder calorífico dos resíduos .....	90
4.2.4. Quantidade de vapor que pode ser produzido com a queima dos resíduos .....	91

4.2.5. Massa de biomassa adquirida de terceiros que se pode economizar com a queima dos resíduos na caldeira de leito fluidizado .....	92
4.3. Cálculo da energia elétrica que pode ser obtida com o aproveitamento das cascas e resíduos descartados pela empresa.....	92
4.4. Determinação da receita atualmente obtida pela empresa com a venda dos resíduos florestais a terceiros .....	94
4.5. Determinação da receita bruta que pode ser obtida pela empresa com a queima das cascas e dos resíduos florestais na caldeira de leito fluidizado .....	95
5. CONCLUSÃO .....	97
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	99
7. APÊNDICE.....	108

## LISTA DE TABELAS

	<b>Página</b>
Tabela 1: Período de rotação, incremento médio anual e produção comercial total de diferentes plantações florestais, segundo Lima (1993).....	12
Tabela 2: Composição das florestas plantadas no Brasil em 2009, segundo ABRAF (2010).....	14
Tabela 3: Poder calorífico líquido (PCLu) esperada para madeira de <i>Eucalyptus</i> , considerando diferentes teores de umidade e poder calorífico inferior (PCI) inicial de 4276 Kcal/Kg, segundo Brito et al., 2008.....	24
Tabela 4: Poder calorífico líquido (PCLu) de resíduos da indústria madeireira e outros resíduos sólidos de biomassa de origem vegetal, segundo Pera, 1990 .....	26
Tabela 5: Poder calorífico superior (PCS), inferior (PCI) e líquido (PCLu) de cavacos e cascas de <i>Eucalyptus grandis</i> , segundo Pereira Junior, 2001 .....	28
Tabela 6: Rendimento dos produtos obtidos pelas variações da pirólise da madeira, segundo Bridgewater, 2003 .....	31
Tabela 7: Perda de madeira em diferentes subsistemas de colheita de <i>Eucalyptus</i> , segundo Jacovini et al., 2001 .....	38
Tabela 8: Dados da unidade Fabril da empresa Lwarcel, segundo Lwarcel (2012) .....	57
Tabela 9: Consumo mensal de madeira sem casca da unidade fabril, segundo Lwarcel Celulose (2012).....	80
Tabela 10: Teor de cascas de espécies de <i>Eucalyptus</i> , segundo SCQE – Setor de Química, Celulose e Energia – ESALQ – USP (1983) .....	81
Tabela 11: Massa umidade casca (Muc), massa seca (M0c), massa de água (MH2O) e teor de umidade com base em massa úmida (u)de cascas de <i>Eucalyptus spp</i> .....	83
Tabela 12: Poder calorífico superior (PCS), poder calorífico inferior (PCI) e poder calorífico líquido (PCLu) das amostras de cascas de <i>Eucalyptus spp</i> para teor de umidade com base em massa úmida de 20,21 % .....	85
Tabela 13: Produção de vapor (Pvapor), consumo de biomassa (Cbiomassa) e índice de consumo de biomassa (Iconsumo) da caldeira de leito fluidizado, segundo Lwarcel Celulose (2012).....	86
Tabela 14: Área florestal da colheita mecanizada (Am), da colheita semi-mecanizada (As) praticada pela empresa , segundo Lwarcel Celulose (2012).....	87

Tabela 15: Poder calorífico superior (PCS), poder calorífico inferior (PCI) e poder calorífico líquido (PCLu) das amostras de resíduos de <i>Eucalyptus spp</i> para teor de umidade com base em massa úmida de 48,43 % .....	91
Tabela 16: Consumo de vapor e geração de energia elétrica nos turbo geradores da empresa, segundo Lwarcel Celulose (2012) .....	94
Tabela 17: Custo unitário da biomassa adquirida de terceiros utilizada como combustível na caldeira de leito fluidizado, segundo Lwarcel Celulose (2012).....	96

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Página</b>
Figura 1: Produção de energia primária.....	10
Figura 2: Distribuição de área de plantios florestais no Brasil por gênero no período de 2011.....	15
Figura 3: Poder calorífico da casca em função do teor de umidade .....	27
Figura 4: Conversão energética da biomassa florestal.....	29
Figura 5: Aplicação do gás de biomassa gaseificada.....	32
Figura 6: Cadeia produtiva da biomassa florestal.....	36
Figura 7: Extração de resíduos utilizando caçamba compactadora – Havu-Hukka.....	41
Figura 8: Extração de resíduos com carregamento (esquerda), Transporte (centro) e descarregamento (direita).....	42
Figura 9: Preparação de cavacos nas margens das estradas.....	43
Figura 10: Sistemas de preparação de cavacos nas margens de estradas com utilização do caminhão SISU CHIPPER.....	43
Figura 11: Caminhão com capacidade de realizar a preparação de cavacos dos resíduos e o transporte até a planta de energia (SISU CHIPPER).....	44
Figura 12: Sistema de preparação de cavacos em pátios intermediários .....	45
Figura 13: Sistema de preparação de cavacos na indústria.....	46
Figura 14: Sistema de preparação de cavacos dentro da floresta.....	47
Figura 15: Enfardador bundling machine .....	48
Figura 16: Sistema de enfardamento de resíduos florestais.....	49
Figura 17: Fluxo do processo de combustão em leito fluidizado .....	51
Figura 18: Exemplo de um sistema LFC (a) e LFB (b) .....	52
Figura 19: Sistema de recuperação de calor e de produtos químicos em fábrica de celulose .....	55
Figura 20: Esquema de colheita e transporte de toras e resíduos florestais realizado pela empresa Lwarcel Celulose .....	58
Figura 21: Corte manual com motosserra.....	59

Figura 22: Corte e processamento.....	60
Figura 23: Remoção da madeira .....	61
Figura 24: Vista lateral de uma caldeira de recuperação de calor e de produtos químicos da fábrica de celulose .....	63
Figura 25: Principais componentes de um Leito Fluidizado Borbulhante.....	64
Figura 26: Instalações da caldeira de leito fluidizado e o pátio da biomassa florestal .....	65
Figura 27: Coleta de amostras dos discos .....	67
Figura 28: Determinação do volume das amostras .....	71
Figura 29: Calorímetro utilizado para determinação do poder calorífico superior (PCS) .....	73
Figura 30: Fluxograma do processo de preparação e utilização da madeira, do destino das cascas / resíduos florestais e fluxo de geração de vapor e energia elétrica.....	78

**APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS FLORESTAIS DE *Eucalyptus spp* NA INDÚSTRIA DE FABRICAÇÃO DE CELULOSE PARA GERAÇÃO DE ENERGIA TÉRMICA E ELÉTRICA.** Botucatu, 2012. 124p. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

Autor: Francisco Luiz Sanches Santiago

Orientador: Prof. Dr. Marcos Antonio de Rezende

## **RESUMO**

A crise de combustíveis derivados de petróleo a partir do ano 1970 levou as empresas do ramo florestal avaliar a viabilidade técnica e econômica de reaproveitamento inteligente e racional de resíduos florestais como insumos energéticos até então descartados em seus processos nas florestas. A segurança da economia brasileira impõe medidas de aproveitamento mais eficaz do combustível e exige providências para intensificar a utilização de outras fontes energéticas brasileiras. Os custos de energia podem ser reduzidos pelo emprego de combustíveis mais econômicos e de produtos residuais (ANDRITZ, 1997). Em indústrias de produção de celulose e papel, o *Eucalyptus* é utilizado como fonte de matéria prima e para geração de energia térmica em forma de vapor, água quente e energia elétrica. A possibilidade de gerar energia com as cascas que permanecem na floresta após a colheita da madeira e resíduos florestais, tais como galhos de pequenos diâmetros das copas das árvores que são vendidos a terceiros foi o que motivou a realização deste trabalho. O presente trabalho tem por objetivo avaliar o potencial de energia a partir das cascas e resíduos florestais em uma fábrica de celulose, e através dos mesmos promover a geração de energia térmica em forma de vapor e geração própria de energia elétrica, melhorando a competitividade de seus produtos através da redução de custos e ao



mesmo tempo contribuindo para expansão da base de geração de energia elétrica no país. Para a realização do trabalho foram obtidos dados de consumo mensal de combustíveis, produção de vapor das caldeiras instaladas na unidade fabril da empresa LWARCEL CELULOSE de Lençóis Paulista no período de abril de 2011 a abril de 2012, bem como o consumo de vapor e geração de energia elétrica própria (co-geração). Foram coletados, também, dados para quantificação das cascas e resíduos florestais decorrentes da colheita do *Eucalyptus*, sua análise química e poder calorífico. Os dados referentes as cascas e resíduos florestais permitiram estimar a quantidade de vapor que se obtém através da queima dos mesmos, economia com biomassa adquiridas de terceiros que são utilizadas como principal combustível na caldeira de leito fluidizado. Verificou-se ainda que com o preço da biomassa adquirida de terceiros que é praticado no mercado, foi possível quantificar a receita bruta propiciada pela implantação de projeto para aproveitamento das cascas e resíduos florestais que atualmente são descartados pela empresa em pesquisa. Os principais resultados mostraram que a implantação da proposta de utilização das cascas e resíduos florestais representou uma receita bruta de R\$  $9,09 \times 10^6$  / ano (nove milhões e noventa mil reais por ano), indicando uma economia de 84689,00 t/ano em biomassa florestal adquirida de terceiros. Os custos operacionais, depreciações e investimentos em equipamentos dependem do sistema de extração, cavaqueamento e transporte das cascas e dos resíduos que a empresa em estudo adotar. O estudo realizado neste trabalho pode ser aplicado por outras empresas, entretanto a análise de viabilidade econômica do projeto também vai depender do sistema de extração, cavaqueamento e transporte a ser adotado pela empresa interessada.

**Palavras-chave:** resíduos florestais de *Eucalyptus*, co-geração de energia elétrica, biomassa florestal, poder calorífico, umidade com base em massa úmida.

UTILIZATION OF EUCALYPTUS FOREST RESIDUES IN THE CELLULOSE MANUFACTURING INDUSTRY FOR GENERATION OF THERMAL AND ELECTRICAL ENERGY. Botucatu, 2012, 124p. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: FRANCISCO LUIZ SANCHEZ SANTIAGO

Adviser: MARCOS ANTONIO DE REZENDE

## **SUMMARY**

The crisis of fuels derived from petroleum from 1970 led the forest branch companies evaluate the technical and economic viability of reusing intelligent and rational of forest residues as energy inputs until then discarded in their processes in forests. The security of Brazilian economy imposes measures of more effective utilization of fuel and requires actions to increase the use of other energy sources in Brazil. Energy costs can be reduced by employing of more economical fuels and waste products (ANDRITZ 1997). In industries of cellulose and paper production, the Eucalyptus is used as a source of raw material for thermal energy generation in the form of steam, hot water and electricity. The possibility to generate power with the barks that remain in the forest after the harvesting of wood and forest residues such as small diameter branches of the tree tops that are sold to the third parties, was what motivated this work. This study aims to evaluate the potential energy from the barks and forest residues in a cellulose plant, and through them to promote the generation of thermal energy in the form of steam and own generation of electricity, improving the competitiveness of its products through reduction of costs and, at the same time, contributing to the expansion of the base of electric power generation in the country. To conduct the study, data were obtained of monthly consumption of fuel, steam of boilers

installed in the manufacturing unit of the company LWARCEL CELULOSE from Lençóis Paulista, from April 2011 to April 2012, as well as consumption of steam and own power generation (cogeneration). Data also were collected to quantify the barks and forest residues resulting from the harvest of Eucalyptus, their chemical analysis and calorific value. Data concerning barks and forest residues allowed estimate the amount of vapor that is obtained by burning thereof, economy biomasses acquired from third parties that are used as the main fuel in the fluidized bed boiler. It was also found that with the price of biomass acquired from third parties that is practiced in the market, it was possible to quantify the gross income provided by the implementation of project for utilization of barks and forest residues that currently are discarded by the company studied. The main results showed that the implementation of the proposal for the use of the barks and forest residues represented a gross income of R\$  $9.09 \times 10^6$  (nine million ninety thousand *reais* per year), indicating a saving of 84,689.00 t / year in forest biomass acquired from third parties. Operating costs, depreciation and investments in equipments depend on the extraction system, chipping and transportation of the barks and residues that the company adopts. The study in this work can be applied by other companies, though the analysis of economic viability of the project will also depend on the extraction system, chipping and transportation to be adopted by the company interested.

**Keywords:** Eucalyptus forest residues, cogeneration of electricity, forest biomass, calorific value, wood moisture content.

## 1. INTRODUÇÃO

A evolução do consumo de energia, baseada em combustíveis fósseis, conduziu a humanidade para uma matriz energética insegura, cara e, sobretudo, bastante negativa para o meio ambiente. Isso tem levado muito países a considerarem a necessidade de profundas mudanças, incluindo a intensificação do aproveitamento de outras fontes energéticas, sobretudo as renováveis, incluindo a madeira (BRITO, 2007).

O uso da biomassa florestal como insumo energético é uma tendência e vem despertando interesse tanto de países em desenvolvimento, como de países desenvolvidos e industrializados. A utilização energética da biomassa florestal, nas suas diversas formas de aproveitamento, vem ganhando destaque por seu potencial renovável; pela possibilidade de redução de dependência de combustíveis fósseis; redução de emissões atmosféricas; descentralização da produção e outra suficiência energética; geração de oportunidade de trabalho no processo de produção e conservação energética e criação de novos mercados para os resíduos florestais.

A utilização energética da biomassa florestal também promove o aumento do aproveitamento de florestas comerciais existentes, pela possibilidade de utilização dos resíduos florestais, que geralmente são deixados no campo após a colheita e se constituem em potenciais fontes de energia e além disso, o aproveitamento energético de resíduos florestais pode viabilizar economicamente atividades de manejo florestais e tratamentos silviculturais (DO CANTO, 2009).

As principais barreiras existentes para maior utilização das energias renováveis são de ordem econômica. Considera-se que em um dos fatores mais importantes na utilização de biomassa como insumo energético, independente da técnica empregada, refere-se ao custo de colheita e transporte dessa matéria prima (GOLDEMBERG, 1998; MACEDO, 2001).

Quando os custos de produção da biomassa florestal são comparados com os de outras fontes de produção de energia, constata-se que os custos de colheita e transporte são determinantes para sua competitividade. Para que essa barreira possa ser superada são necessários estudos e investimentos em tecnologia de colheita, para que os ganhos de escala possam ser alcançados, de forma a tornar a biomassa florestal competitiva, uma vez que já existem tecnologias para sua conversão energética (GOLDEMBER, 1998).

Muitos processos industriais em plantas químicas de papel e celulose, açúcar e álcool, alimentícias e inúmeras outras, demandam energia térmica em forma de vapor e energia elétrica. Impulsionados pelos crescentes custos dos insumos energéticos, quer dos combustíveis utilizados na geração de vapor, quer de energia elétrica comprada da concessionárias, as indústrias devem permanentemente buscar a forma mais econômica de utilização de energia (PEREIRA JUNIOR, 2001).

Tendo em vista os motivos expostos pretende-se estimar a quantidade de vapor obtido e energia elétrica através da queima dos resíduos florestais como combustível em caldeira das indústrias de papel e celulose, madeireiros e outros que utilizam a madeira como matéria prima e descartam na floresta seus resíduos após colheita.

Desta forma este trabalho teve como objetivo geral elaborar análise técnica de sistemas para aproveitamento de resíduos florestais de *Eucalyptus* na geração de energia térmica e elétrica nas indústrias de fabricação de celulose.

## **1.1. Objetivos**

Indicar a oportunidade técnica de aproveitamento e utilização dos resíduos florestais após colheita da madeira de *Eucalyptus ssp*, oriundos da colheita da madeira nas indústrias de fabricação de celulose.

Quantificar o valor energético presente na biomassa descartada durante a colheita da madeira pela empresa LWARCEL, através da conversão em energia térmica e elétrica, cujos resultados poderão ser utilizado por outras empresas do ramo

madeireiro que tenham interesse em aproveitar seus resíduos florestais na geração de energia;

Quantificar a redução de custo com biomassa adquirida de terceiros, utilizada como combustível na planta de energia da empresa.

Determinar a receita bruta proveniente do aproveitamento da biomassa florestal atualmente descartada durante a colheita da madeira pela empresa estudada.

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1. Biomassa florestal como energia, importância e geração**

Segundo Soares et al. (2011) biomassa pode ser definida como a massa orgânica produzida por unidade de área, podendo ser expresso em peso de matéria seca, peso de matéria úmida ou peso de carbono. Sua medição é um instrumento útil na avaliação de ecossistemas, em virtude da aplicação na análise de produtividade, conservação de energia, ciclagem de nutrientes e absorção e armazenagem de energia solar, entre outros (CARBONERA, 1997).

Segundo Brito (2007), no campo energético, a madeira é tradicionalmente chamada de lenha e nessa forma, sempre ofereceu histórica contribuição para o desenvolvimento da humanidade, tendo sido sua primeira fonte de energia, inicialmente empregada para aquecimento e cozimento de alimentos. Ao longo dos tempos, passou a ser utilizada como combustível sólido, líquido e gasoso, em processos para geração de energia térmica, mecânica e elétrica.

Hoje a madeira ainda continua participando da matriz energética mundial, com maior ou menor intensidade dependendo da região considerada, sendo que seu uso é afetado por variáveis como: nível de desenvolvimento do país, disponibilidade de florestas, questões ambientais e sua competição econômica com outras fontes energéticas, como petróleo, gás natural, hidrelétrica, energia nuclear, etc.

Couto e Brito em 1980, estudando o inventário de resíduos florestais relatam que os altos preços e a instabilidade de fornecimento de energia proveniente de fontes tradicionais aumentam a viabilidade de outras fontes alternativas como o carvão mineral, energia solar e nuclear. As indústrias que utilizam a madeira como matéria prima de seus produtos estão em posição invejável, pois assegurada as condições climática favoráveis, as árvores podem converter energia solar e estocá-la em forma de

madeira, casca e resíduos florestais. Até recentemente, a maioria das atividades de exploração florestal visava apenas o produto principal, isto é, madeira para celulose, chapas, lâminas e compensados, serraria etc., deixando os resíduos com possibilidade de conversão para energia, disperso no local.

Segundo Simioni et al. (2009), estudando a cadeia produtiva de biomassa de origem florestal no planalto Sul de Santa Catarina, com o objetivo de fornecer informação que subsidiem os gestores públicos e privados na tomada de decisão estratégica para o melhor desempenho dessa cadeia, relataram que nos últimos anos, a questão energética tem despertado interesse, sobretudo na busca de fontes de energia alternativa com menor impacto ambiental do que os combustíveis fósseis.

Esta nova configuração, na qual a biomassa de origem florestal ou madeireira passou a ser mais disputada, desencadeou maior concorrência entre diferentes segmentos da cadeia produtiva na busca dessa matéria-prima. Nesse caso, a produção de energia concorre diretamente com a produção de celulose e papel, além de alguns tipos de chapa, pois esses segmentos industriais utilizam a mesma biomassa como principal matéria-prima. Assim, os resíduos de biomassa de origem florestal deixaram de ser visto como "lixo" e passaram a ser tratados como matéria-prima para geração de energia.

Segundo Walter (1998) a produção de energia em larga escala a partir de biomassa vem sendo estudada com grande interesse em vários países do mundo. No caso brasileiro, as oportunidades mais reais estão nos usos mais eficazes da biomassa em sistemas de co-geração industrial. Além da tradição do uso da biomassa enquanto matéria prima e energia, existem um potencial associado a quantidade de resíduo gerado de biomassa que são, do ponto de vista energético aproveitados de forma eficiente.

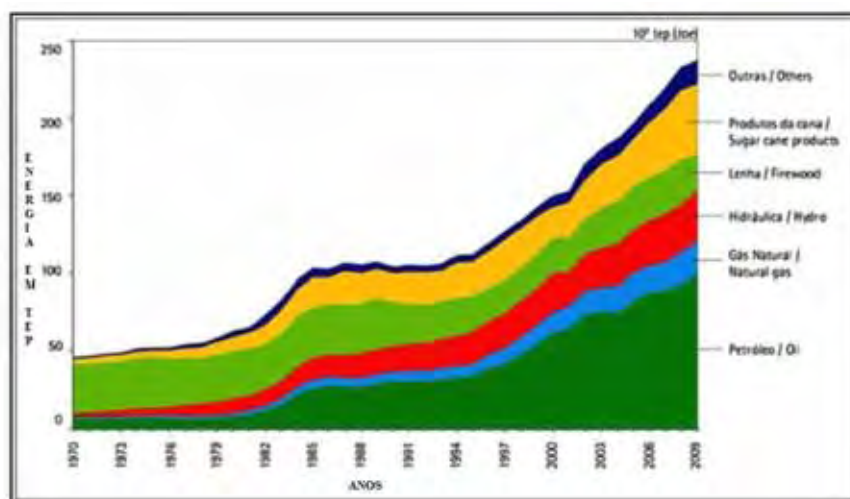
Considerando-se o avanço tecnológico, conquistado tanto na área energética, a partir da biomassa na silvicultura brasileira com aumento de produtividade, melhoramento genético, redução de custo etc., é possível prever um cenário favorável ao desenvolvimento de plantações energéticas como fonte de matéria prima para geração elétrica (MULLER, 2005).

A geração de energia por biomassa florestal apresenta vantagens ambientais, pela substituição de combustíveis fósseis e redução da emissão de gases de efeito estufa; e vantagens sociais, pela geração de emprego local (JACOVINI et al., 2001).



Uma análise do Balanço Energético Nacional permite observar que: houve um decréscimo na participação relativa (%) da biomassa florestal na matriz energética brasileira; sendo que sua participação que foi de 80,5% em 1940 (LIMA; BAJAY, 2000), passou a ser apenas 7,5% em 2009; no entanto a sua participação quantitativa, em toneladas equivalente em petróleo (<sup>1</sup>tep), teve um acréscimo de 2956 milhões de tep nas décadas de 2000 a 2009, contribuindo com cerca de 16583 milhões de <sup>1</sup>tep no ano 2009.

Evidencia-se, assim, a importância da biomassa florestal como consumo energético. A Figura 1 apresenta o consumo final por fonte em <sup>1</sup>tep, nas décadas de 1970 e 2009 (BEN, 2010).



**Figura 1.** Produção de energia primária

Fonte: Ministério de minas e energia, (2010)

<sup>1</sup> Tep: Tonelada equivalente em petróleo.

## 2.2. Povoamentos florestais de florestas plantadas.

No Brasil, os plantios de florestas começaram há mais de um século. Em 1903, o pioneiro Navarro de Andrade trouxe mudas de *Eucalyptus* (*Eucalyptus spp.*) para plantios que produziram madeira para dormentes da estrada de ferro. Em 1947 foi a vez do *Pinus* (*Pinus spp.*). Essas espécies se desenvolveram bem nas regiões onde foram introduzidas, o *Eucalyptus* nos cerrados paulista e o *Pinus* no sul do Brasil. Como os recursos naturais da Mata Atlântica há muito vinham sendo dilapidados, o plantio dessas espécies tornou-se altamente viável para suprir a demanda de madeira (SNIF, 2012).

Plantações florestais, ou seja, a formação de florestas a partir de regeneração artificial tem sido estabelecida desde há muito tempo na América do Norte e na Europa com o propósito de fornecer madeira para fins industrial.

Essas duas regiões tradicionalmente supriram a maior parte da demanda mundial de madeira como matéria-prima industrial. Nos Trópicos as plantações florestais também existem há mais de um século, mas apenas em pequena escala. Povoamentos de *Tectona grandis* (teca) já existiam na Índia desde 1950. O *Pinus radiata* introduzidos na Austrália em 1870, alguns anos mais tarde chegou também ao Chile e à África do Sul; e as bem-sucedidas plantações de cipreste na África do Sul tiveram início por volta da virada do presente século (LIMA, 1993). Ainda segundo Lima (1993), em décadas recentes, muitas plantações florestais para fins industriais foram estabelecidas com enorme sucesso no hemisfério sul, em países não tradicionalmente importantes como produtores de madeira para fins industriais, como o Brasil, a África do Sul, o Chile, a Nova Zelândia, etc.

Esse acontecimento é considerado uma das marcantes características da silvicultura moderna, e está, no geral, promovendo uma modificação substancial no padrão mundial de produção de madeira, assim como no mercado mundial de produtores florestais. A relativamente alta produtividade alcançada por essas plantações florestais, a enorme área potencialmente disponível para formação de novas plantações, e o sucesso absoluto de integração entre a produção de madeira e a utilização industrial sugerem que o retorno econômico das plantações florestais na região deve ser bastante significativo (LIMA, 1993).

A Tabela 1 foi resumida por Lima (1993) com objetivo de fornecer uma apreciação comparativa geral de aspectos econômicos de plantações florestais de algumas espécies florestais em diferentes regiões do mundo. Os números dessa tabela enfatizam a importância das plantações florestais com espécies de rápido crescimento em alguns países do hemisfério sul.

**Tabela 1.** Período de rotação, incremento médio anual e produção comercial total de diferentes plantações florestais, segundo Lima (1993).

<b>Região/Espécie</b>	<b>Rotação (anos)</b>	<b>Incremento de volume (m³/ha)</b>	<b>Produção em volume (m³/ha)</b>
América do Norte			
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	40	12,7	510
<i>Pinus taeda</i>	30	11,9	357
Europa			
<i>Picea abies</i>	50	5,0	250
Austrália			
<i>Pinus Radiata</i>	29	20,0	600
Nova Zelândia			
<i>Pinus Radiata</i>	18	25,0	450
África do Sul			
<i>Pinus patula</i>	15	16,0	241
Senegal			
<i>Gmelina sp</i>	10	15,0	450
Ásia			
<i>Pinus caribaea</i>	15	14,0	357
Chile			
<i>Pinus radiata</i>	25	22,0	555
Brasil			
<i>Gmelina sp</i>	7	18,0	342
<i>Pinus caribaea</i>	12	16,0	192
<i>Pinus taeda</i>	12	20,0	240

Diversos estudos já foram realizados a respeito das perspectivas e vantagens biológicas, econômicas e sociais das plantações florestais com espécies de rápido crescimento nos trópicos (LIMA, 1993).

Segundo Bracelipa (2009), a década de 1970 foi marcada pela política de incentivos fiscais para reflorestamento, que começaram ainda na década de 1960. Com esses incentivos foi possível ampliar consideravelmente o estoque de madeira nesses plantios.

Desde então se investiu em pesquisa sobre a silvicultura dessas espécies, consolidando seu uso em plantios comerciais. O Brasil detém hoje as melhores tecnologias na silvicultura de *Eucalyptus*, atingindo cerca de 60 m<sup>3</sup>/ha de produtividade, em rotação de sete anos.

Ainda segundo SNIF (2012), algumas importantes funções das florestas plantadas são: diminuição da pressão sobre florestas nativas, reaproveitamento de terras degradadas pela agricultura, sequestro de carbono, proteção do solo e da água, ciclo de rotação mais curto em relação aos países com clima temperado, maior homogeneidade dos produtos, facilitando a adequação de máquinas na indústria.

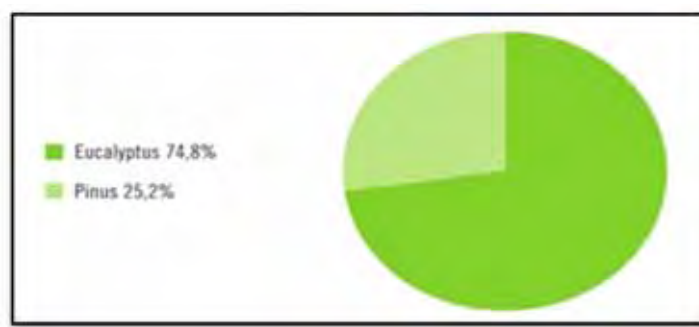
Segundo ABRAF (2011), a composição das florestas plantadas no Brasil no ano de 2009 está apresentada conforme mostra a Tabela 2.

**Tabela 2.** Composição das florestas plantadas no Brasil em 2009, segundo ABRAF (2011).

<b>Espécie</b>	<b>Principais Usos</b>	<b>Principais Estados</b>	<b>Área (ha)</b>	<b>(%)</b>
<i>Eucalyptus</i> ( <i>Eucalyptus</i> spp <sup>2</sup> )	Energia, carvão, cavaco p/ celulose, painéis de madeira, dormentes, postes, construção civil, óleos essenciais	MG,SP,BA, ES,MS,RS,PR,SC,PA e MA	4515730	66,6
<i>Pinus</i> spp <sup>2</sup>	Madeira; energia, carvão, cavaco p/ celulose, painéis de madeira, forros, ripas, móveis. resina, tintas, vernizes, solventes	PR, SC, RS,SP E MG	1794.720	26,5
Acácia ( <i>Acacia mearsii</i> e <i>Acacia mangium</i> )	Madeira: energia, carvão, cavaco p/ celulose, painéis de madeira. Tanino: curtumes, adesivos, petrolífero, borrachas.	Rs E RR	174150	2,57
Seringueira ( <i>Hevea brasiliense</i> )	Madeira: energia, celulose. Seiva: borracha.	AM	128460	1,89
Paricá ( <i>Schizolobium amazonicum</i> )	Lâmina e compensado, forros, palito, papel, móveis, acabamento e molduras.	PA e MA	85320	1,26
Teca ( <i>Tectona grandis</i> )	Construção civil (portas, janelas, lambril, painéis, forno) assoalhos e decks, móveis, embarcações e lâminas.	MT, AM, AC	65240	0,96
<i>Araucária angustifolia</i>	Serrados, L=lâminas, forros, molduras, ripas, caixotaria, estruturas de moveis, fósforos, lápis e carretéis.	PR e SC	12,110	0,18
<i>Populus</i> spp.	Fósforos partes de móveis, portas, marcenaria interior, brinquedos utensílios de cozinha.	PR e SC	4030	0,06
Outras			2740	0,04
Total			6782500	100

<sup>2</sup>spp = Diversas espécies do gênero.

Segundo ABRAF (2012), as florestas plantadas no Brasil são preparadas e manejadas para atender a demanda dos mercados de siderúrgicas, painéis, móveis, bioenergia, construção civil, papel e celulose, com um portfólio completo de produtos florestais. Em 2011, a área ocupada por plantios florestais de *Eucalyptus* e *Pinus* no Brasil totalizou 6.515.844 ha, sendo 74,8% correspondente à área de plantios de *Eucalyptus* e 25,2% aos plantios de *Pinus* conforme Figura 2.



**Figura 2.** Distribuição de área de plantios florestais no Brasil por gênero no período de 2011.

Fonte: ABRAF (2012).

Ainda segundo ABRAF (2012) em 2011, não houve crescimento da área de plantios florestais de *Eucalyptus* e *Pinus* no Brasil, pois o aumento de área apurada (5.151 ha, 0,1%) está dentro da margem de erro do levantamento. O indicador de 2011 corrobora a tendência de desaceleração do crescimento da área de plantios apresentada nos dois anos anteriores. No período 2005 - 2011, o crescimento acumulado foi de 27,9%, ou seja, 3,0% ao ano. As principais razões para estagnação do crescimento da área de plantio florestais em 2011, são:

- a) as restrições impostas pelo governo brasileiro para a compra de terra por grupos nacionais que possuam composição majoritária de capital estrangeiro;
- b) a reduzida atividade econômica nos países da União Européia e nos Estados Unidos, países importadores de produtos florestais ou da cadeia de base florestal plantada;
- c) a redução da competitividade no mercado internacional dos produtos da cadeia produtiva brasileira de base florestal;

- d) a excessiva burocratização e os longos prazos requeridos pelos órgãos ambientais e nos processos de licenciamento ambiental de novos projetos florestais e industriais no país;
- e) a limitação imposta pela infra-estrutura deficiente do país, em vias de acesso, rodovias, ferrovias e portos, o que acarreta em outros custos adicionais ao transporte da madeira para as fábricas e para o escoamento dos produtos.

Importante ressaltar que a partir de reduções de áreas plantadas nos principais estados produtores de florestas plantadas nas Regiões Sudeste e Sul do país, ocorreram aumento significativo nos estados situados nas novas fronteiras do setor como o Maranhão, Tocantins, Piauí e o Mato Grosso do Sul.

Em 2011, o aumento da área plantada de *Eucalyptus* no Brasil foi alcançado pelo investimento de empresas nacionais do segmento de Papel e Celulose. As maiores expansões ocorrem nos Estados do Tocantins (37,8%), Mato Grosso do Sul (25,7%), Paraná (16,6%) e Maranhão (9,5%), (ABRAF,2012).

Quanto ao *Pinus*, a área total de plantios reduziu-se em 114,4 mil hectares (-6,59%). Os estados que apresentaram as maiores reduções absolutas da área de (-14,3%), Espírito Santo (-28,2%) e Goiás (-11,5%).

Particularmente, em relação ao *Eucalyptus*, o segmento de papel e celulose concentra 71,2% da área plantada, seguido pelo segmento de siderurgia o carvão vegetal (18,4%) painéis de madeiras industrializadas (6,8%) e produtores independentes (3,6%). No caso do *Pinus*, além do segmento de papel e celulose (61,1%), os segmentos mais representativos são os de painéis de madeira industrializada (20,6%), e o de produtores independentes (13,3%) da área plantada (ABRAF,2012).

O setor florestal vem, ano após ano, quebrando recordes de produtividade de madeira e de área plantadas. O país fechou o ano de 2009 com média de 40m<sup>3</sup>/ha x ano, num universo de 4,5 milhões de hectares de povoamento florestais de *Eucalyptus*. Nos últimos cinco anos, foi registrado crescimento médio de 10% no incremento de produtividade e de 30% em relação a área plantada. O elevado preço da terra nos estados brasileiros com tradição na silvicultura tem exigido do setor florestal maior aproveitamento dos recursos dos sítios disponíveis. Por exemplo, no Estado de São Paulo,

com mais de um milhão de hectares de plantações de *Eucalyptus*, o preço médio da terra subiu 350% nos últimos 10 anos (ÁLVARES, 2011).

### 2.3. Densidade da madeira

Segundo Costa (2006), a densidade é definida como massa de qualquer substância por unidade de volume e geralmente é expressa em  $\text{g/cm}^3$  ou  $\text{kg/m}^3$  sendo, portanto uma grandeza dimensional. Apesar do termo "densidade" não ser aceito universalmente, a forma adequada para a determinação da densidade é obter a massa e o volume no mesmo teor de umidade, isto é, massa verde e volume verde, massa seca e volume seco e massa a 12% e volume a 12% de água. Já a densidade relativa é a razão entre a densidade do material com a densidade de água e o resultado é uma grandeza adimensional (REZENDE, 1997). A massa específica é sempre calculada usando a massa seca em estufa e seu volume, a massa específica também pode ser determinada a qualquer teor de umidade, porém, o teor de umidade deve ser especificado, para deixar mais claro o procedimento utilizado para o cálculo de densidade.

Um dos principais parâmetros da qualidade da madeira é a sua densidade, principalmente quando se visa à sua utilização como matéria prima industrial ou energética, sendo objeto de estudo justamente esse parâmetro, de onde se obtém uma simples determinação além de sua correlação com outras propriedades da madeira. A densidade básica média da madeira do *Pinus oocarpa* na idade que é explorada, é igual a  $0,446 \text{ g/cm}^3$  e a densidade básica do *Pinus oocarpa* decresce uniformemente com a altura do fuste (ARONI, 2005).

Foelkel et al., (1971) relataram que dentre várias maneiras de expressar a densidade aparente da madeira, uma das práticas é por meio da densidade básica, que é a relação entre o peso absolutamente seca da madeira, e o seu volume quando completamente saturado de água.

A utilização da densidade básica, dentre outros fatores, é muito difundido por todo o mundo, visto que a madeira é uma substância higroscópica que, sob diferentes condições de umidade relativa e temperatura adquire diferentes teores de umidade, levando a mesma amostras a diferentes massas e volumes (VITAL, 1984).



Rezende e Ferraz (1988), Rezende (1997) e Rezende et al. (1998) apresentaram duas equações de transformação das densidades, uma que relaciona a densidade básica com a densidade a 0% de teor de umidade e outra que relaciona a densidade a 0% de teor de umidade com a densidade aparente ao seu teor de umidade entre 0% e 25%, para obter densidades diferentes a partir da determinação de uma única densidade, concluindo que estas relações eram válidas para o gênero *Pinus* e *Eucalyptus*.

Conforme demonstrado por Bendtsen (1986); Zobel (1984), Senft et al. (1985); Rowell et al. (2000), a madeira juvenil, de uma forma geral, caracteriza-se por menor densidade, maior ângulo das microfibras na camada  $S_2$  da parede celular, traqueóides mais curtos, concentração transversal menor, maior concentração longitudinal, maior proporção de lenho de reação, menor percentagem de lenho tardio, paredes celulares mais finas, maior conteúdo de lignina e hemicelulose, menor conteúdo de celulose e menor características de resistência, em relação a madeira adulta.

A densidade da madeira varia entre espécie, indivíduos e procedência da mesma espécie e dentro da mesma árvore, tanto no sentido longitudinal, ou seja, da base para o topo, ou no sentido radial da medula para a casca (BARRICHELO et al., 1983; BRASIL et al., 1977).

Os autores Panshin e Zeeuw (1970), apresentam uma síntese dos padrões de variação longitudinal da densidade:

- (1) Decrescente uniformemente com a altura;
- (2) decrescente até certo ponto e cresce deste até o topo da árvore. Também pode decrescer levemente nas partes superiores;
- (3) crescente da base para o topo não obedecendo a um padrão uniforme.

A literatura mostra que o gênero *Pinus* tem o comportamento do primeiro padrão (BARRICHELO et al., 1983; PANSHIN e ZEEUW, 1970; LIMA et al., 1992; REZENDE, 1987; REZENDE, 1997). Segundo esses autores, essas variações ocorrem e proporcionam dificuldades para se determinar qual a melhor posição da árvore a ser amostrada, quando ocorre o abate da árvore, havendo a necessidade da retirada de discos em diversas posições na mesma árvore.

Alzete et al. (2005) mostrou que para a espécie híbrido de *Eucaliptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* a densidade na direção longitudinal cresce no sentido base-topo.

Silva et al. (2004) mostram que a densidade da espécie *Eucalyptus grandis* cresce na direção radial no sentido medula casca.

Contudo o estudo da densidade da madeira é importante, pois Vale et al. (2002), estudando a quantificação e caracterização energética da madeira e casca de espécies do cerrado na Fazenda Água Limpa, de propriedade da Universidade de Brasília – DF, concluíram que o uso de madeiras com baixa densidade básica para produção direta de energia na forma de calor implica em uma queima rápida e numa menor produção de energia por unidade de volume ao contrário de madeiras com densidade maiores. Madeiras com densidade muito elevadas implica em dificuldade de iniciar a queima do material.

A densidade da madeira não exerce influencia direta sobre o poder calorífico da madeira expresso por unidade de massa. Sua Influência passa a existir somente no momento em que a unidade da referência para madeira passa a ser seu volume. Neste caso, pode ser proposto o denominado poder calorífico líquido volumétrico (PCLV) expresso em Kcal/m<sup>3</sup> de madeira (BRITO; SILVA, 2008).

## **2.4. Setor Energético Brasileiro**

Segundo Borba (2012), o desperdício de combustível e a ineficiência de 18 termelétricas do país custaram quase R\$ 500 milhões aos cofres públicos nos últimos 12 anos, conforme anunciado no levantamento da ANEEL (Agencia Nacional de Energia Elétrica).

A fiscalização da reguladora apurou que entre o período de 1999 a 2011, as empresas desperdiçaram 213 milhões de litros de óleo diesel e 35 milhões de quilos de óleo combustível, perdas superiores a margem já prevista no processo produtivo (BORBA, 2012).

Ainda segundo Borba (2012) o desperdício não é elevado se comparado ao consumo anual das concessionárias, de 1,436 bilhões de óleo diesel e 440

milhões combustível no ano de 2011, mas a ANEEL tem dificuldade em recuperar os recursos.

Segundo Borba (2012), já foi aplicada multas milionárias. Em alguns casos específicos a sanção chegou a R\$ 10 milhões, mas as empresas nunca fizeram a reposição da forma que foi determinada.

Para contornar a situação, a ANEEL decidiu submeter à consulta pública uma alteração na forma de cobrança desses valores. As térmicas passariam a receber menos do governo para manter o fornecimento de energia elétrica (BORBA, 2012).

A valorização da biomassa como insumo energético teve início na década de 1970 com a crise do petróleo. Neste período a biomassa passou a ser considerada como alternativa viável para atendimento às demandas por energia térmica em forma de vapor, água quente, ar quente e de centrais elétricas de pequeno e médio porte nas indústrias. Entretanto na metade da década de 1980, houve um decréscimo no preço do petróleo, diminuindo o interesse por energia alternativa. Na década de 1990, a biomassa voltou a ganhar destaque no cenário energético mundial devido ao desenvolvimento de tecnologias mais avançadas de transformação, pela ameaça de esgotamento de reservas de combustíveis fósseis e pela incorporação definitiva da temática ambiental nas discussões sobre o desenvolvimento sustentável (MULLER, 2005; COUTO e MULLER., 2008).

Segundo Brand (2007) a partir da década de 1990, iniciativas para uso da biomassa florestal em sistemas de co-geração de energia elétrica vêm aumentando, inclusive com o ingresso no mercado de empresas que tem como objetivo principal gerar energia a partir deste sistema.

Na década de 2001, a crise energética brasileira evidenciou ainda mais a necessidade de diversificação e expansão da matriz energética brasileira. A geração de eletricidade no Brasil baseia-se principalmente em grandes e médios empreendimentos hidrelétricos e a crise de eletricidade foi causada pela baixa ocorrência de chuvas naquele período afetando as hidrelétricas, e pela falta de investimento na capacidade de geração e transmissão de energia hidrelétrica. Entre os anos de 1990 e 2000, a produção de eletricidade teve um aumento médio anual de 4,6%, enquanto a capacidade instalada aumentou somente 3,1%. Como consequência os reservatórios de água baixaram e o sistema ficou dependente da quantidade anual de chuvas. Esta crise foi solucionada com um

programa de racionamento que durou 10 meses, oficialmente decretado 01 de julho de 2001 e 01 de março de 2002, e que teve um profundo efeito no setor elétrico e na economia brasileira (IEA, 2003).

Para o futuro, estima-se que a participação percentual da energia hidráulica não terá grandes possibilidades de aumento, nas regiões Sul, Sudeste e Nordeste o potencial de geração através das grandes usinas hidrelétricas encontra-se praticamente esgotado (LIMA, 1992). Acredita-se que os investimentos em hidrelétricas serão grandes desafios para os próximos anos. Isto porque construções de novas hidrelétricas poderão ser inviáveis, uma vez que os recursos hídricos remanescentes estão localizados longe dos grandes centros consumidores, o que requer grandes investimentos em linhas de transmissão. As considerações ambientais também poderão ter grandes impactos na expansão do potencial remanescente, pois grande parte deste potencial esta localizada na região Amazônica (IEA, 2003).

Diante da gravidade do problema, medidas emergenciais foram tomadas pelo governo, dentre as quais se destacam a revisão normativa do modelo do sistema elétrico brasileiro, representado pela promulgação da Lei 10848/04; a criação da Empresa de Planejamento Energético (EPE) pela Lei 10847/04; a criação do PROINFA ( Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica), através da Lei 10438/02; e diversas ações inovadoras entre as quais o Plano Nacional de Agroenergia do Ministério da Agricultura (GOMES et al. 2007).

O PROINFA previu, em sua primeira fase, assegurar a participação de 3300 MW de energia a partir de fontes renováveis. Na segunda fase as energias renováveis deverão atender a 10% do consumo anual de energia elétrica no país em 20 anos. Para atingir esta meta, no mínimo 15% do incremento anual de energia elétrica deverá ser suprido pelas fontes renováveis. A finalidade do programa é aumentar a participação da energia elétrica gerada a partir de unidades de produção baseada em biomassa, energias eólicas e pequenas centrais hidrelétricas, oferecendo condições especiais de financiamentos aos empreendedores (MME, 2009).

Com a iminência da crise da energia elétrica brasileira, o governo federal também implantou o Programa Prioritário de Termoeletricidade (PPT), com a finalidade de incentivar o uso do gás natural e aumentar a oferta de energia. Porém, a

expansão da geração termelétrica a gás tem esbarrado na garantia de suprimento de gás natural. A recente nacionalização das reservas de gás e a re-estatização de empresas do setor energético da Bolívia trouxeram incertezas ao mercado brasileiro de gás consumido. Diante deste novo cenário, a Petrobrás lançou o Plano de Antecipação da Produção de Gás (Plangás) para aumentar a produção de gás brasileiro. Contudo, apesar dos planos de expansão da oferta de gás, existem incertezas quanto à segurança de abastecimento e quanto à política de preços e competitividade do gás em relação aos combustíveis concorrentes (LOPEZ et al., 2008).

A assinatura do Protocolo de Kyoto em 1998, foi outro fator determinante para as fontes energéticas renováveis, onde ficou estabelecido que países industrializados devem promover reduções significativas nas emissões de gases de efeito estufa, indicando que a participação de energia renováveis tenderá a ocupar um lugar de destaque na matriz energética mundial (MULLER, 2005).

A utilização de fontes renováveis é uma medida que reduz a emissão de gases de efeito estufa. Cerca de 80% do consumo mundial de energia primária são baseados em combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás) e a queima destes combustíveis é a principal responsável pela emissão de dióxido de carbono, um dos responsáveis pelo aquecimento global e pelas mudanças climáticas (GOLDEMBERG, 1998).

Aumentar a diversificação da matriz energética de um país e reduzir sua dependência de combustíveis fósseis é uma medida estratégica importante para garantia de suprimento de energia. Assim não se fica vulnerável as oscilações dos preços do petróleo e as instabilidades políticas dos países produtores (COELHO, 2005).

A energia é um requisito essencial para o desenvolvimento econômico e social, e as previsões indicam que a oferta de petróleo não atenderá a demanda da crescente população mundial, ressaltam-se a necessidade de adoção de fontes alternativas de energia, especialmente as renováveis. A questão do aquecimento global e das mudanças climáticas também evidencia a necessidade da incorporação, no processo de desenvolvimento, de tecnologias eficientes e modernas de energia renovável (GOLDEMBERG; VILLANUEVA, 2003).

## 2.5. Energia da Madeira

A biomassa florestal, essencialmente é uma forma de energia solar armazenada, as árvores usam a luz solar, na fotossíntese, para converter o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e água ( $\text{H}_2\text{O}$ ) em produtos de alto teor energético, que são os carboidratos e oxigênio (KARCHESY e KOCH, 1979).

Segundo Brito (1986) no processo de combustão a energia armazenada na biomassa é blindada e aproveitada para a geração de calor, vapor ou eletricidade. A quantidade de energia liberada pela madeira por unidade de massa na combustão, é conhecida como poder calorífico. Esta energia pode ser expressa como poder calorífico superior ou poder calorífico inferior, dependendo se o calor é blindado pela condensação de água de constituição do combustível é ou não considerado.

A energia gerada pela biomassa florestal depende de seu poder calorífico e do seu teor de umidade. O poder calorífico de um combustível é a quantidade de energia liberada durante a combustão completa por unidade de massa do combustível a pressão constante. No Sistema Internacional de Unidade (SI), o poder calorífico é expresso em joules por grama (J/g) ou quilojoules por quilograma (kJ/kg). Porém, a unidade mais usada para combustíveis sólidos é calorias por grama (cal/g), ou quilocalorias por quilogramas (kcal/kg), e para combustíveis gasosos é calorias por metro cúbico (cal/m<sup>3</sup>).

A energia pode ser expressa como poder calorífico superior (PCS) ou poder calorífico inferior (PCI). O PCS é obtido a partir do combustível seco, enquanto que o PCI considera o conteúdo de água constituinte do combustível e o calor perdido com a vaporização da água. Portanto, o PCI retrata melhor a quantidade de energia de um combustível (INCE, 1977; QUIRINO, 2002).

O calorímetro é o instrumento utilizado na determinação do poder calorífico da biomassa florestal. Os valores assim obtidos correspondem ao PCS e são ligeiramente superiores ao observado na prática porque o calorímetro é fechado e os produtos de combustão permanecem enclausurados. Assim, ao se resfriar, o vapor d'água é condensado e libera o calor latente de vaporização (PEREIRA JÚNIOR, 2001).

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:  $PCS = 81.C + 340.(H - O/8)$ , onde: C, H e O são teores de carbono, hidrogênio e oxigênio em percentagem.

Segundo Brito et al., (2008) o valor do PCS para madeira de *Eucalyptus* cortada aos seis anos de idade situa-se em 4600 Kcal/kg.

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).

Ainda segundo Brito et al. (2008) é possível o cálculo aproximado do poder calorífico inferior, levando-se em conta o teor de umidade (u) da madeira. Tem-se, então, o denominado poder calorífico líquido (PCLu).

A Tabela 3, apresenta os valores do poder calorífico líquido (PCLu) da madeira de *Eucalyptus*, considerando-se o PCS de 4600 Kcal/kg, energia a ser consumida para evaporação da água de composição química da madeira de 324 Kcal/kg e diferentes valores de teores de umidade da madeira (BRITO et al., 2008).

**Tabela 3.** Poder calorífico líquido (PCLu) esperada para madeira de *Eucalyptus*, considerando diferentes teores de umidade e poder calorífico inferior (PCI) inicial de 4276 kcal/kg, segundo Brito et al., 2008.

Teor de Umidade “u” (%)	PCLu		Energia útil
	(MJ/kg)	(kcal/kg)	(%)
10	15,9	3788,0	89
20	13,8	3301,0	77
30	11,8	2813,0	66
40	9,7	2325,0	54
50	7,7	1838,0	43

Os resíduos florestais podem apresentar o poder calorífico diferentes da madeira, principalmente devido as diferenças nas proporções de resina, lignina e celulose. A resina tem um poder calorífico maior do que a madeira, cerca de 39,3 MJ/kg (9386,6 kcal/kg), (HOWARD, 1979). Por isso as coníferas, que contém maior

quantidade de resina, apresenta maior poder calorífico, por unidade de massa, do que as folhosas.

A lignina por sua vez, apresenta maior poder calorífico do que a celulose. Por esta razão, isto é, maiores proporção de resina e lignina, casca e ramos apresentam poder calorífico ligeiramente maior do que a madeira nas coníferas, embora as diferenças não sejam grandes (HAKKILA, 1984).

Segundo Thomaselli et al. (1983), encontraram poder calorífico superior (PCS), de 20 MJ/kg (4776,9 kcal/kg) para a madeira e de 24,9 MJ/kg (5947,3 kcal/kg) para a casca, em *Pinus elliotti* plantadas no Estado do Paraná.

A madeira é um combustível que apresenta uma queima com baixa quantidade de resíduo e apesar de ter poder calorífico bem menor, oferece algumas vantagens sobre os combustíveis como carvão e óleo. O conteúdo de cinzas da madeira é muito baixo, menos de 3% do seu peso seco, sendo o do carvão 3 a 5 vezes maior (HOWARD, 1979).

Ainda segundo Howard (1979) a cinza da madeira pode ser reciclada e usada como fertilizante, tanto na agricultura como na própria floresta, sendo útil principalmente para elevar o PH de solos ácidos. A quantidade de enxofre na madeira é desprezível e, portanto, não existe a formação dos altamente poluidores compostos de enxofre, que constituem em sério problema quando se queima o carvão ou o óleo. Os maiores problemas da madeira com relação à poluição são as partículas de carvão e fumaça.

A Tabela 4, apresenta valores de poder calorífico líquido (PCLu) de resíduos da indústria madeireira e a participação de outros resíduos sólidos de biomassa de origem vegetal aplicados como combustíveis com seus respectivos teores de umidade (PERA, 1990).

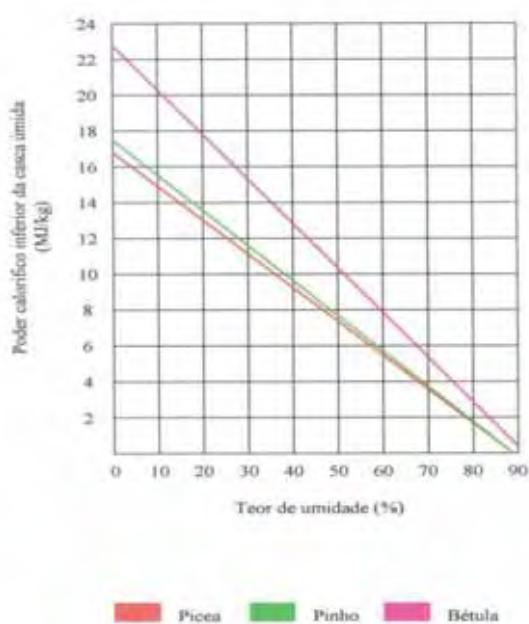


**Tabela 4.** Poder calorífico líquido (PCLu) de resíduos da indústria madeireira e outros resíduos sólidos de biomassa de origem vegetal, segundo Pera, 1990.

<b>Resíduo</b>	<b>Umidade (u)</b>	<b>PCLu</b>	<b>PCLu</b>
	<b>(%)</b>	<b>(MJ/kg)</b>	<b>(kcal/kg)</b>
Serragem	30	10,0	2388
Pó de lixa (aglomerado)	10	14,7	3511
Pó de lixa (madeira)	10	13,6	3248
Casca de <i>Eucalyptus</i>	30	8,4	2006
Casca de pinho	50	7,9	1887
Viruta	20	11,7	2794
Sobra de carpintaria	20	11,7	2794
Recortes (chapa prensada)	8	14,0	3344
Recortes (aglomerado)	8	14,0	3344
Madeira triturado	10	13,6	3248
Lâmina de torno	50	7,5	1791
Bagaço de cana	50	7,5	1800
Casca de arroz	12	13,8	3300
Casca de amendoim	10	14,2	3400
Palha de trigo	12	13,8	3300
Palha de café	8	15,1	3600
Carvão vegetal	6	27,1	6480

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 3 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 (3991,4 kcal/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 3.** Poder calorífico da casca em função do teor de umidade.

Fonte: Lima et al. (1988).

Pereira Junior (2001), relata os resultados obtidos dos ensaios de poder calorífico superior (PCS), inferior (PCI) e líquido (PCLu) de cavacos e cascas de *Eucalyptus grandis* elaborados junto ao IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas), conforme apresentados pela Tabela 5.

**Tabela 5.** Poder calorífico superior (PCS), inferior (PCI) e líquido (PCLu) de cavacos e cascas de *Eucalyptus grandis*, segundo Pereira Junior, 2001.

Biomassa	Poder calorífico superior (PCS)		Poder calorífico inferior (PCI)		Umidade (%)	Poder calorífico líquido (PCLu)	
	(MJ/kg)	(kcal/kg)	(MJ/kg)	(kcal/kg)		(MJ/kg)	(kcal/kg)
Cascas de <i>Eucalyptus</i>	15,3	3656,8	14,3	3417,8	53,0	5,2	1242,8
Cavacos de <i>Eucalyptus</i>	18,4	4397,7	17,3	4134,8	44,0	8,5	2031,5

## 2.6. Tecnologias de produção de energia a partir da biomassa florestal

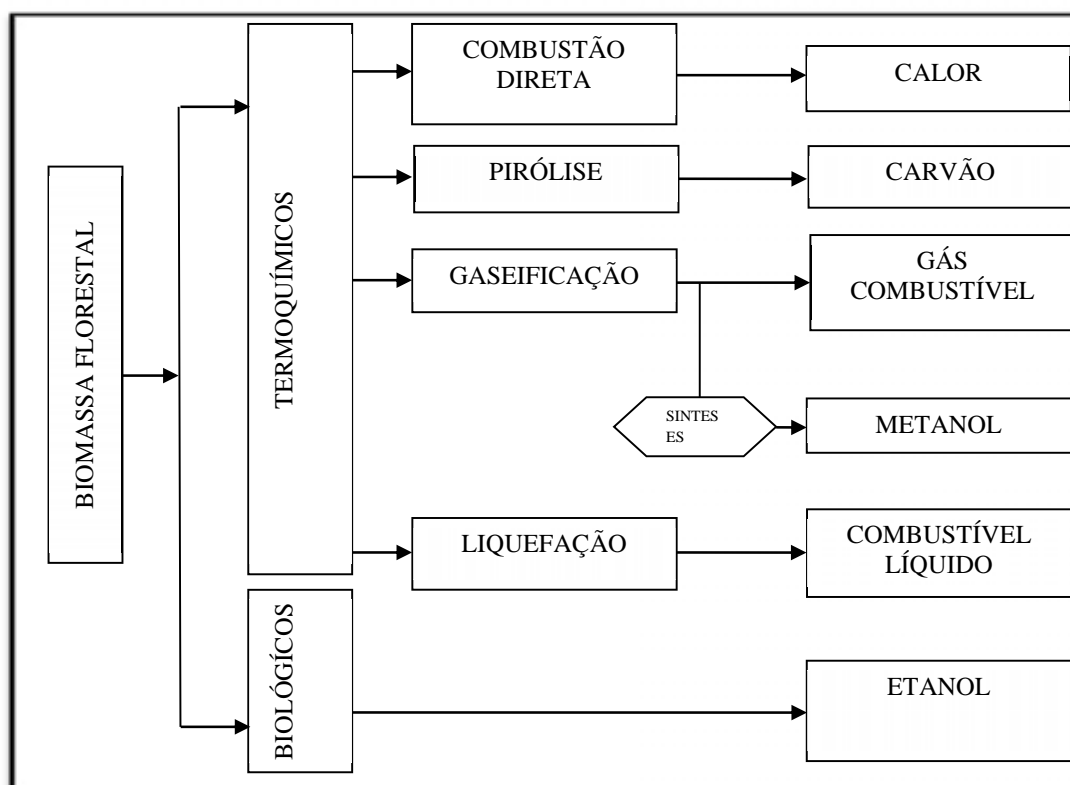
Podem-se classificar as tecnologias de produção de eletricidade a partir da biomassa florestal em dois grupos: (i) aquelas que fazem uso da biomassa como recurso energético primário, a partir de sua combustão direta, e (ii) aquelas que fazem uso de combustíveis derivados através de processos termoquímicos (pirólise, gaseificação ou liquefação) ou biológicos conforme apresentado na Figura 4 (BRIDGEWATER, 2006).

### 2.6.1. Combustão Direta

A combustão direta é a transformação da energia química dos combustíveis em calor, através das reações dos elementos constituintes com o oxigênio fornecido. Para fins energéticos, a combustão direta ocorre essencialmente em fogões na cocção de alimentos, fornos nas indústrias metalúrgicas e caldeiras para geração de vapor, água e ar quente e aquecimento de fluidos térmicos (ANEEL, 2002).

A combustão direta da biomassa florestal em caldeiras ocorre em instalações baseadas em ciclos de potência a vapor (ciclo Rankine), com a queima exclusiva ou queima conjunta da biomassa com outro combustível. No ciclo Rankine, uma caldeira como uma fonte de energia gera vapor em alta pressão, com temperatura superior

ao ponto de ebulição da água. A liberação do vapor ocorre através de sistemas mecânicos, movimentando máquinas, transferindo calor para processos industriais, ou movimentando turbinas para gerar energia elétrica. O ciclo se completa com o retorno do vapor condensado à caldeira, para ser novamente aquecido (ODDONE, 2001).



**Figura 4.** Conversão energética da biomassa florestal.

Fonte: Adaptado de BRIDGEWATER, (2006).

As tecnologias dos ciclos de vapor são totalmente conhecidas e disponíveis comercialmente, representando um risco mínimo aos investidores (BRIDGEWATER, 2003). A indústria brasileira produz equipamentos com custo altamente competitivos, existindo diversas plantas energéticas com ciclos de vapor em operação no Brasil (MACEDO, 2003).

Um dos maiores problemas das centrais termelétricas que operam segundo o ciclo Rankine é a baixa eficiência, que não é competitiva com outras opções de

geração. A eficiência do ciclo depende das condições termodinâmicas (pressão e temperatura) do vapor (VIANNA et al., 2000), sendo que em plantas menores, a eficiência gira em torno de 15% atingindo 30% em plantas maiores e mais novas (BRIDGEWATER, 2003).

A baixa eficiência de muitas centrais termelétricas em operação no Brasil se deve ao fato de que os custos unitários (R\$/ kW instalado) são influenciados pelo efeito em escala e as centrais tendem a ter suas instalações simplificadas em função do elevado custo de transporte da biomassa, o que resulta na redução de sua eficiência. De uma forma geral, a reduzida eficiência das centrais termelétricas a vapor, alimentadas por biomassa é resultante das baixas pressões e temperatura com que o vapor é gerado; da reduzida eficiência isentrópica das turbinas a vapor empregadas, da não utilização de reaquecimento e do baixo rendimento das caldeiras (COELHO, 1999). Para alcançar as eficiências mais elevadas, os ciclos a vapor necessitam de um complexo sistema de geração de vapor que inclui diversos trocadores de calor (CORRÊA NETO, 2001).

### **2.6.2. Pirólise**

A pirólise é a etapa inicial do processo de carbonização e gaseificação, onde segue a oxidação total ou parcial da biomassa. Consiste em aquecer a biomassa a temperaturas moderadas (300-800°C), na ausência de oxigênio, até que o material volátil seja retirado. Como resultado, obtém-se gases e vapores orgânicos condensáveis, produtos líquidos (alcatrão e ácidos pirolenhoso) e carvão (BRIDGEWATER, 2006).

A relação entre a quantidade de biomassa e de cada produto varia de acordo com as características do processo e umidade do material de origem. O rendimento de cada produto depende basicamente do tempo de aquecimento e da temperatura. O processo que é realizado com temperatura mais baixas e maior tempo de residência, favorece a produção de carvão. Alta temperatura e longo tempo de residência aumentam a conversão da biomassa em gás. Por outro lado temperatura moderada e curto tempo de residência favorecem a produção de líquidos (BRIDGEWATER, 2003) conforme apresentado na Tabela 6.

**Tabela 6.** Rendimento dos produtos obtidos pelas variações da pirólise da madeira, segundo Bridgewater, 2003.

<b>Variações</b>	<b>Temperatura</b>	<b>Tempo de residência</b>	<b>Líquido (%)</b>	<b>Carvão (%)</b>	<b>Gás</b>
Pirólise rápida	Moderado	Baixo	75	12	13
Carbonização	Baixa	Longo	30	35	25
Gaseificação	alta	longo	5	10	85

### 2.6.3. Gaseificação

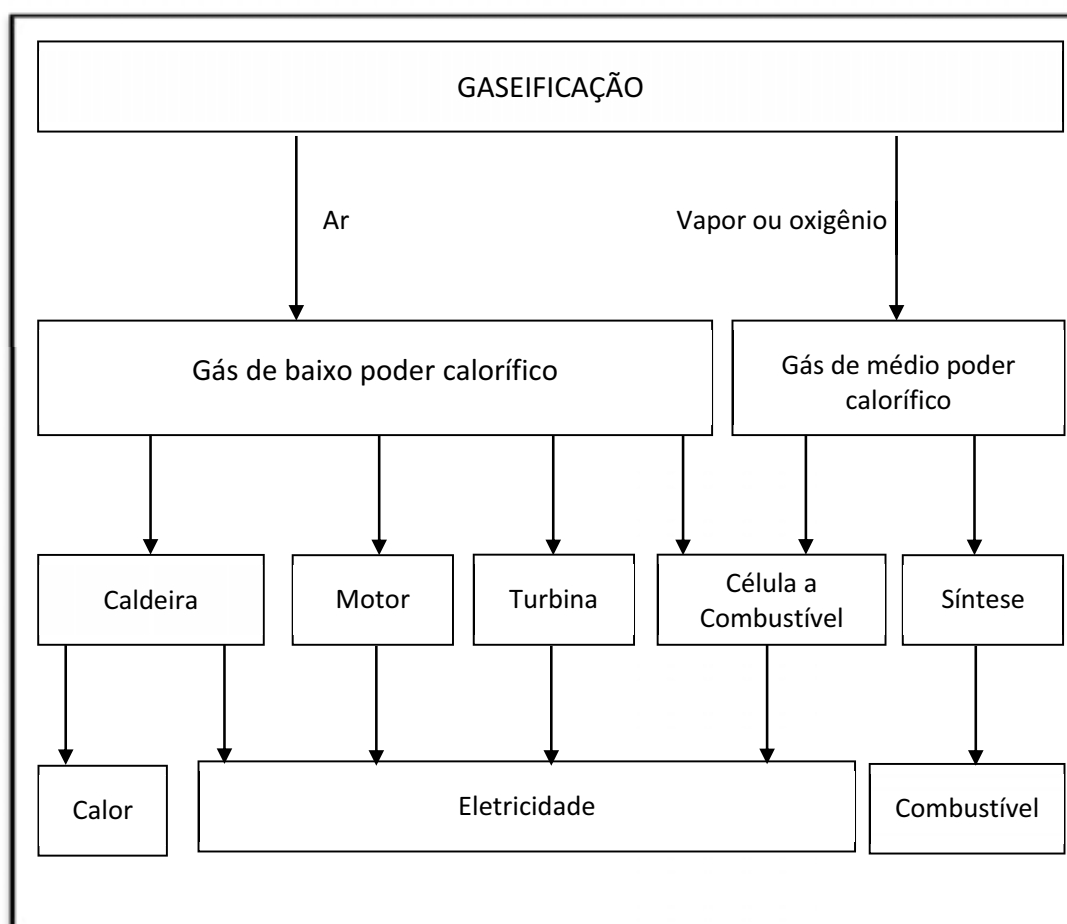
Gaseificação é um processo de conversão da biomassa em um gás combustível, através de sua oxidação parcial a temperaturas elevadas (acima das recomendadas no processo de pirólise, por meio de reações envolvendo agentes de gaseificação, como vapor quente, ar ou oxigênio, em quantidades inferiores a estequiométrica (mínimo teórico para combustão) (BRIDGEWATER, 2006; LORA et al., 2008).

No processo de gaseificação, ocorre inicialmente a pirólise. Em seguida, os produtos líquidos, sólidos e gasosos reagem com um agente oxidante, resultando gases permanentes, como monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), gás hidrogênio (H<sub>2</sub>) e menores quantidades de gases hidrocarbonetos. Através de diversas reações gás - sólido e gás - gás, o carbono sólido é oxidado em CO e CO<sub>2</sub>, e H<sub>2</sub> é gerado a partir da água gasosa trocada na reação. Em seguida, na fase de redução, ocorre um conjunto de reações típicas que originaram os componentes combustíveis do gás produzido na ausência do oxigênio (BRIDGEWATER, 2003).

A proporção da composição do gás resultante do processo de gaseificação varia de acordo com as condições do processo, particularmente se o agente oxidante é ar ou oxigênio. Também é influenciado pela composição da biomassa, pelo conteúdo de água, pela temperatura de reação e extensão da oxidação dos produtos da pirólise (BRIDGEWATER, 2003).

O gás combustível resultante da gaseificação com injeção de ar possui baixo poder calorífico, entre 4 e 7,0 MJ/Nm<sup>3</sup> (956,0 a 1673,00 Kcal/Nm<sup>3</sup>), sendo adequado para uso local, na queima direta em caldeiras ou fornos, na alimentação de

motores de combustão interna e turbinas. Entretanto, não é adequado para ser transportado ou para ser empregado como gás de síntese. Por sua vez, o gás combustível resultante da gaseificação com injeção de oxigênio ou vapor possui médio poder calorífico, entre 10 e 18 MJ/Nm<sup>3</sup> (2390,1 a 4302,1 Kcal/Nm<sup>3</sup>), podendo ser convertido em metanol (PEREIRA JÚNIOR, 2001). De qualquer forma, a gaseificação da biomassa tem como vantagem a versatilidade de uso do combustível gerado (Figura 5).



**Figura 5.** Aplicação do gás de biomassa gaseificada.

Fonte: BRIDGEWATER, (2003).

O sistema gaseificação- combustão tem como vantagens sobre o sistema de combustão direta a maior eficiência energética e o fato de que as cinzas e o carbono residual permanecem no gaseificador, diminuindo assim a emissão de particulados.

Além disso, o combustível resultante é mais limpo e, na maioria dos casos, não há necessidade de controle de poluição (NOGUEIRA, 1996).

Segundo Pereira Júnior (2001), Lora et al., (2004), a gaseificação também apresenta vantagens na geração de eletricidade em pequenas escala, um vez que o gás da biomassa pode ser utilizado diretamente em motores de combustão interna, tanto a gasolina (ciclo Otto) como a diesel (ciclo Diesel). Por isso, a alternativa de gaseificação da biomassa para alimentação de motores de combustão interna vem sendo explorada em unidades de pequeno porte, geralmente em região que possuem restrições ao abastecimento elétrico via rede.

Ainda segundo Lora et al. (2004), motores de combustão interna (*stirling*) também oferecem a possibilidade de se utilizar qualquer tipo de combustível. O princípio de funcionamento do motor *Stirling* é baseado em um ciclo fechado, onde o gás de trabalho é mantido dentro dos cilindros e o calor é adicionado e removido do espaço de trabalho através de trocadores de calor. São de fácil operação e construídos em forma de unidades seladas podendo ser instalados em regiões isoladas. A maior desvantagem é o seu alto custo.

Segundo Corrêa Neto (2001) e Lora et al. (2008) o gás resultante da gaseificação da biomassa também pode ser utilizado para acionar turbinas a gás que são máquinas motrizes de combustão interna. Um compressor pressiona ar para dentro da câmara de combustão na qual se forma uma mistura de ar comprimido e combustível que alimenta um processo de combustão contínua. O gás quente e pressurizado proveniente do combustor se expande na turbina, transformando energia térmica em energia mecânica. A energia liberada pelo combustível é diretamente transferida ao fluido de trabalho, composto pelo ar comprimido misturado aos gases de combustão, sem a necessidade de trocadores de calor para transferir energia entre a fonte de calor e o fluido de trabalho ou entre o fluido e o meio ambiente.

Ainda segundo Corrêa Neto (2001) e Lora et al. (2004), os ciclos de geração termelétrica baseados em turbinas a gás encontram-se em estágio maduro de confiabilidade, possuem uma alta eficiência de conversão e apresentam reduzido impacto ambiental.



Outra possibilidade é usar gás resultante da gaseificação para acionar células a combustível, que são dispositivos eletromecânicos que convertem a energia química do combustível diretamente em energia elétrica, sem estágios intermediários de combustão e produção de energia mecânica. As células a combustível permitem a geração de eletricidade por oxidação eletroquímica de um combustível com o oxigênio do ar. Essa opção tem uma alta eficiência de conversão e a possibilidade de operar em regime de co-geração, além de um impacto ambiental muito pequeno (LORA et al, 2004).

#### **2.6.4. Liquefação**

Segundo Gonçalves et al. (2008), a liquefação da biomassa é a obtenção de líquidos (óleo) a partir de materiais lignocelulósicos. É um processo termoquímico para a obtenção de combustíveis líquidos, realizado a baixas temperaturas, altas pressões e com catalisadores para acelerar a reação e/ou provocar a seletividade do processo. O produto líquido obtido possui maior qualidade do que o obtido mediante o processo de pirólise. Com a liquefação, podem-se obter combustíveis com poder calorífico na faixa de 36,1 a 40 MJ/kg (8635 a 9560 Kcal/kg) e com um conteúdo de oxigênio inferior a 15%.

Os combustíveis líquidos oferecem varias vantagens, tais como elevada densidade energética, facilidade de transporte e estabilidade no manejo. Podem ser utilizados tanto em queimadores convencionais ou industriais. Os processos de liquefação são capazes de produzir hidrocarbonetos que, apesar de diferentes dos hidrocarbonetos de petróleo, resultam em um combustível de boa qualidade (VIANNA et al., 2000).

#### **2.6.5. Processos Biológicos**

Atualmente, tem-se produzido etanol por meio de processos biológicos a partir de cana-de-açúcar no Brasil e de milho nos Estados Unidos, que perfazem 85% da produção mundial. Alguns países também utilizam a beterraba, o trigo e a

mandioca. Também é possível produzir etanol por meio de processos biológicos a partir da biomassa lignocelulósica (LYND et al., 1991; FRANÇA, 2008).

Segundo Hamelinck et al., (2005), a biomassa lignocelulósica ou madeira é composta de polímero de carboidratos (celulose e hemicelulose), lignina e uma pequena parte basicamente composta de extrativos, ácidos, sais e minerais. A celulose e a hemicelulose, que tipicamente compõem dois terços da massa seca, são polissacarídeos que podem ser hidrolisados em açúcar e fermentados em etanol. A lignina, por sua vez, não pode ser usada na produção de etanol, constituindo um resíduo do processo.

Diversas pesquisas vêm sendo realizadas a respeito da conversão biológica de biomassa em etanol. Apesar disso a produção de etanol a partir de biomassa lignocelulósica ainda requer métodos mais avançados de pré-tratamentos, devido à dificuldade de viabilizar economicamente a hidrólise da celulose e hemicelulose em açúcar fermentável (GRAF; KOEHLER, 2000).

O custo atual de produção de etanol a partir de biomassa Lignocelulósica é o maior impedimento para utilização desta tecnologia, não havendo, por isso, plantas em escala industrial. Porém acredita-se que é uma tecnologia emergente e com grande potencial (LYND et al., 1991; GRAF et al. 2000).

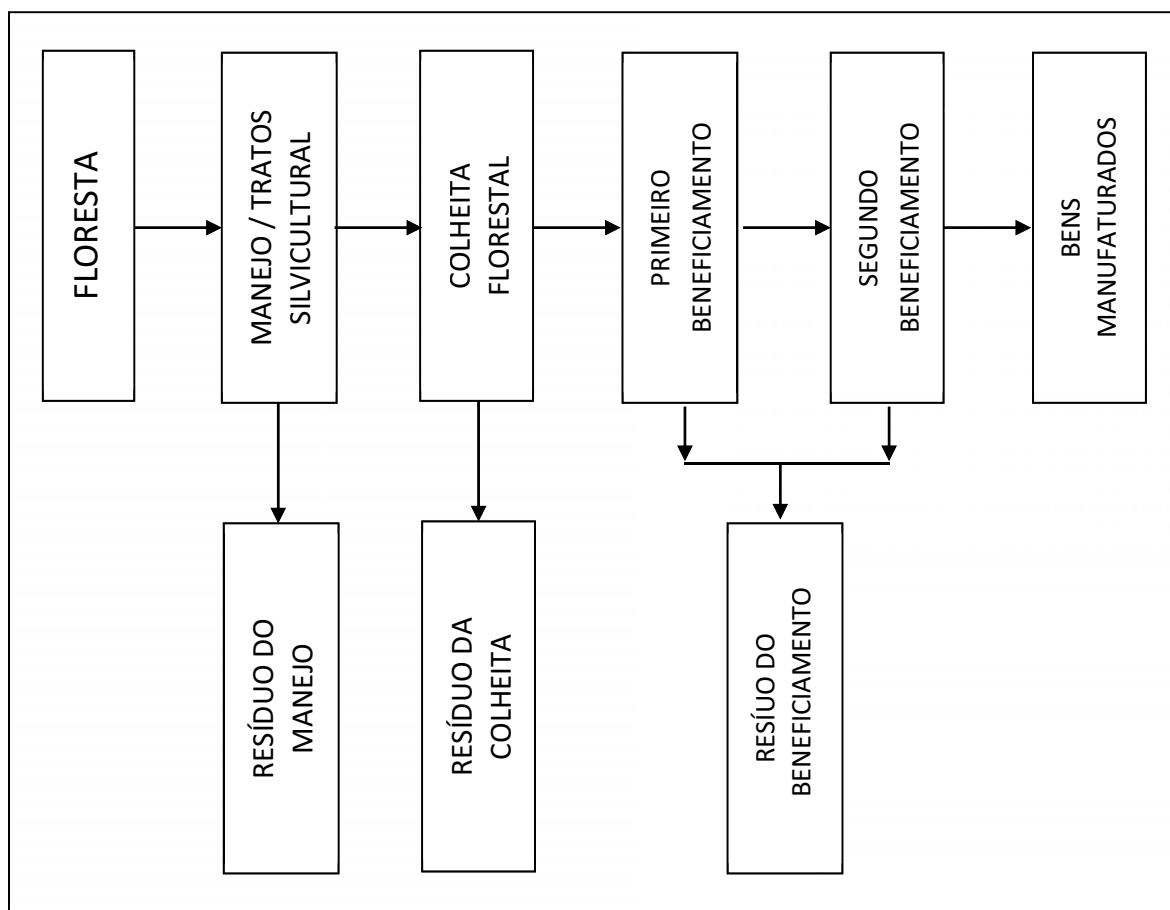
Segundo França (2008), a expectativa na produção de etanol a partir da biomassa lignocelulósica é de se conseguir produzir 36 litros de etanol para cada litro de gasolina empregado no processo de produção. No caso da cana-de-açúcar, para cada litro de gasolina utilizado na lavoura ou na indústria, são produzidos 9,2 litros de etanol. No caso do milho, essa relação cai para 1,4 litros de etanol para cada litro de combustível fóssil empregado no processo.

## **2.7. Resíduos gerados na floresta**

Segundo o IBAMA (Portaria 302/84) o conceito de resíduos florestais é definido como sobras de material, que não o objeto prioritário da atividade resultante da alteração sofrida pela matéria-prima florestal quando submetida à ação exterior através de processos mecânicos, físicos e/ou químicos.

Basicamente, os resíduos florestais podem ser classificados em resíduos do manejo florestal e tratos silviculturais (referentes a desbastes e desramas, geralmente realizados em florestas de *Pinus* e desbrotas em florestas de *Eucalyptus*), resíduos da colheita florestal (galhos, topos, cascas e outros resíduos) e resíduos do beneficiamento da madeira (gerado na indústria de base florestal, como cascas, resíduos de serrarias e indústrias de chapas de maneira, licor negro gerado na produção de celulose pelo processo Kraft). (DO CANTO, 2009).

A Figura 6 apresenta o fluxo das sobras geradas na cadeia produtiva florestal definida como resíduos florestais.



**Figura 6.** Cadeira produtiva da biomassa florestal.

Fonte: DO CANTO, (2009).

### 2.7.1. Características dos resíduos da colheita florestal

Os resíduos resultantes das operações de colheita florestal geralmente são deixados na floresta por não possuírem aproveitamento, como galhos e ramos, parte superior das árvores, toras que não atingem dimensões necessárias mínimas de uso ou de valor comercial insuficiente que justifique a sua remoção (DO CANTO, 2009).

Conclui-se que menos de dois terços de uma árvore são retirados da floresta para a comercialização, ou seja, cerca de 33% da massa de uma árvore são deixados na floresta por ocasião da colheita (FAO, 1990).

Segundo Bauer (2001) uma quantificação dos resíduos resultantes da colheita mecanizada de toras de *Eucalyptus grandis* com diâmetro acima de 6 cm, com Slingshot e Forwarder, resultou em 16,17 m<sup>3</sup>/ha de madeira desperdiçada, representando 4,5% do total.

Segundo Jacovine (2000), além dos resíduos, há perdas de madeira durante as operações da colheita, que giram em torno de 8 a 10%. A quantidade de madeira utilizável perdida esta presente em todas as fases da colheita florestal, desde o corte, a extração e o transporte, e este material representa uma significativa parte do total removido de uma floresta.

Felfilli et al. (1984) quantificaram os resíduos da exploração florestal de árvores com DAP igual ou superior a 45 cm, em três regiões no Norte de Mato Grosso. Os volumes médios de resíduos em cada região foram de 54,37 m<sup>3</sup>/ha, 65,49 m<sup>3</sup>/ha e 199,68 m<sup>3</sup>/ha, representando 48,35%, 45,43% e 85,97% do volume total de madeira. Os resíduos quantificados foram troncos ou fustes sem condições de aproveitamento para serraria, podres ou ocos, e troncos mortos, além de parte de árvores vivas que habitualmente são deixadas na floresta após a exploração, como galhos.

Ainda segundo Jacovine et al. (2001), os resultados apresentados em uma avaliação em cinco subsistemas de colheita de *Eucalyptus spp*, foram em média 5,9% da madeira aproveitável deixadas na floresta após a colheita. Foram consideradas as perdas resultantes de falhas operacionais e do não atendimento às especificações das dimensões comerciais. Os resultados desse estudo podem ser melhor visualizado na Tyabela 7.

**Tabela 7.** Perda de madeira em diferentes subsistemas de colheita de *Eucalyptus*, segundo Jacovini et al., 2001.

Subsistemas	Tamanho das toras aproveitadas		Perdas	
	Diâmetro mínimo (cm)	Comprimento (m)	(m <sup>3</sup> /ha)	(%)
Harvester + Forwarder	4	> 2,5	13,87	3,5
Harvester + Forwarder	4	> 2,5	14,29	3,6
Motosserra + Extração manual	6	1,5 – 3,0	18,65	7,5
Motosserra+ Forwarder	6	1,5 – 3,0	22,76	9,1
Motosserra + Guincho	6	1,5 – 3,0	14,10	5,6

Segundo Leinonem (2004), a densidade aparente dos resíduos (cascas, madeira, folhas, etc.) da colheita florestal varia de 130 a 180 kg/m<sup>3</sup>, para conteúdos de umidade entre 30 e 50%.

Um aspecto de crucial importância na colheita da biomassa florestal para geração de energia diz respeito à concentração deste material, tendo em vista solucionar problemas de manuseio, estoque e transporte. Uma vez concentrado o material, reduz os custos de transporte, seu aproveitamento poderá ser economicamente viabilizado (MARTÍ, 2006).

### 2.7.2. Picadores e trituradores de resíduos florestais

O processo de cavaqueamento poder ser definido como redução, do tamanho do material em partículas menores, a transformação da biomassa em cavacos e desintegrados. Este processo soluciona os problemas de manuseio, estoque e transporte da biomassa, o cavaqueamento também prepara o material para a conversão energética, pela redução no tamanho das partículas e homogeneização da composição do material (DO CANTO, 2009).

Segundo Leinonem (2004) os cavaqueadores podem ser providos de motor próprio ou podem ser acoplados a tratores e caminhões como fonte de potência motriz. Os modelos de maior porte, apesar das limitações operacionais em função do peso e dimensão, possuem a vantagem de terem elevada capacidade de produção de cavacos e, por isto, são mais indicados para áreas com disponibilidade de grande quantidade de biomassa.

Os modelos menores acoplados a tratores têm como vantagem uma maior mobilidade e agilidade em condições de campo, adaptando-se melhor a condições adversas de terreno e solo com baixa capacidade de suporte.

Ainda segundo Leinonem (2004), a alimentação dos cavaqueadores pode ser realizada manualmente ou por grua hidráulica e a descarga dos cavacos produzidos ocorre por impulsão pneumática através de uma calha ou por sistema de correias. A produtividade do cavaqueamento é influenciado pelas características técnicas do cavaqueador e da matéria prima e local de trabalho.

Segundo Christopherson et al. (1993), há diversos tipos de cavaqueadores disponíveis no mercado, podendo ser do tipo picador ou triturador. A escolha do tipo a ser utilizado vai depender das dimensões do resíduo processado, da quantidade de cavacos requerida e da capacidade de produção desejada, bem como o tamanho e uniformidade das partículas dos cavacos.

#### **2.7.2.1. Picadores**

Segundo Pottie e Gumier (1985), os picadores possuem lâminas ou facas, geralmente acopladas em um disco ou em tambor, que cortam a madeira com alta velocidade de rotação, produzindo cavacos de forma e tamanho uniformes e superfície lisa.

Os picadores de disco são mais sensíveis a impurezas na biomassa cavaqueada e, por isso, são mais indicados para matéria-prima homogênea, como árvores desgalhadas. Os picadores de tambor não são tão sensíveis a heterogeneidade da matéria-prima, sendo adequados para processar resíduos florestais (ALAKANGAS et al., 1999).

Segundo Christopherson et al. (1993), o desempenho dos picadores é influenciado pelo ângulo e pela afiação das facas, pela velocidade de rotação e pela velocidade de alimentação. Outros fatores incluem o diâmetro e a umidade da madeira cavaqueada.

As trocas e afiações das facas são as maiores causas de tempo parado dos picadores, que perdem a capacidade de corte e consequentemente resultando em redução da produtividade e aumento de consumo de energia por quantidade de material cavaqueado (POTTIE; GUMIER, 1985).

#### **2.7.2.2. Trituradores**

Os trituradores são equipamentos que possuem martelos, que quebram os despedaçam a madeira com alta ou baixa velocidade de rotação, produzindo cavacos de forma e tamanhos irregulares e superfície áspera. Os trituradores são bastante tolerantes as impurezas na biomassa, como areia, solo e pequenas pedras, e têm vantagens de não necessitarem de afiação de facas (POTTIE e GUIMIER, 1985).

#### **2.7.3. Processo de cavaqueamento em toras curtas**

Na colheita florestal de toras curtas, as árvores são cortadas, desgalhadas e traçadas com comprimento de 3 a 6 metros no interior da floresta, por equipamentos processadores Harvesters. Após o corte as toras já cortadas são removidas de dentro da floresta para a periferia dos talhões ou pátios intermediários por equipamentos Forwarders.

Segundo Leinonem (2004), a implantação de um cavaqueador para aproveitamento dos resíduos gerados, são incluídos nas fases de trabalho desse sistema, o baldeio, o estoque e o cavaqueamento dos resíduos. Assim os sistemas convencionais de corte e remoção das toras no interior das florestas são diferenciados basicamente pela fase de cavaqueamento, que pode ser realizada dentro da floresta, as margens de estradas, em pátios intermediários ou na indústria.

##### **2.7.3.1. Extração de resíduos florestais**

A extração dos resíduos é realizada por um Forwarder convencional, geralmente com algumas adaptações. Como os resíduos possuem menos densidade que a madeira em forma de toras, a capacidade de carga do Forwarder pode ser aumentada com objetivo de aumentar a capacidade de transporte do equipamento e reduzir o custo de movimentação dos resíduos nas atividades de extração (LEINONEM, 2004).

A capacidade de transporte de um Forwarder convencional é de 4 -5 m<sup>3</sup>. A caçamba pode ter suas dimensões aumentadas resultando em uma capacidade de transporte de 8 - 14 m<sup>3</sup> (HAKKILA, 1989).

Segundo Kallio e Leinonen (2005) a garra convencional utilizada no carregamento das toras de madeira não é adequada para o carregamento dos resíduos, sendo substituída por uma garra com "dedos", comercialmente disponível, aumentando em torno de 30% a rapidez de carregamento se comparado com a utilização da garra convencional.

A Figura 7 mostra uma caçamba equipada com laterais compactadoras (Havu-Hukka), que permite a compressão e redução do volume dos resíduos, dobrando a capacidade de carga. Possui uma capacidade de carga de 45m<sup>3</sup> de resíduos e é acoplada a um trator carregador.



**Figura 7.** Extração de resíduo utilizando caçamba compactadora - Havu-Hukka.

Fonte: KALLIO e LEINONEM, (2005).

A Figura 8, mostra uma caçamba compactadora de resíduo produzida pelas empresas Continental Biomassa Industries (CBI) e Allan Bruks adaptada para Forwarders com capacidade de carga de 10 toneladas.





**Figura 8.** Extração de resíduos com carregamento (esquerda), Transporte (centro) e descarregamento (direita).

Fonte: CBI, (2008).

#### **2.7.3.2. Preparação dos cavacos nas margens de estradas**

Neste modelo de preparação de cavacos os resíduos florestais são removidos para as margens das estradas, e podem ser imediatamente cavaqueados ou estocados para redução da umidade e posteriormente cavaqueados. Os tratores móveis equipados com picadores ou trituradores são os mais indicados para esta tarefa, pela sua versatilidade em condições adversas. Normalmente os resíduos processados são adicionados diretamente em caminhões containers que são responsáveis pelo transporte até a planta de energia (LEINONEM, 2004). Segundo Hakkila (2004), a integração entre o processo de preparação de cavacos e o transporte por caminhão é considerado o ponto fraco deste subsistema.

A Figura 9 ilustra o fluxo de atividade relacionada ao processo de preparação de cavacos nas margens das estradas.



**Figura 9.** Preparação de cavacos nas margens das estradas.

Fonte: KALLIO E LEINONEN, (2005).

Segundo Kallio e Leinonen (2005), a Finlândia desenvolveu projeto de caminhões que realizam a preparação dos cavacos e o transporte da floresta até a planta de energia, executando as duas fases do sistema em um mesmo equipamento. Cada veículo de transporte (Sisu Chipper) possui um picador de facas e três containers com capacidade de carga de 100 m<sup>3</sup> cada.

A Figura 10 ilustra o fluxo de atividade na floresta com utilização do caminhão SiSU CHIPPER. A Figura 11 mostra o caminhão em plena atividade na floresta.



**Figura 10.** Sistema de preparação de cavacos nas margens de estradas com utilização do caminhão SiSU CHIPPER.

Fonte: KALLIO e LEINONEN, (2005).



**Figura 11.** Caminhão com capacidade de realizar a preparação de cavacos dos resíduos e o transporte até a planta de energia (SISU CHIPPER).

Fonte: KALLIO e LEINONEN, (2005).

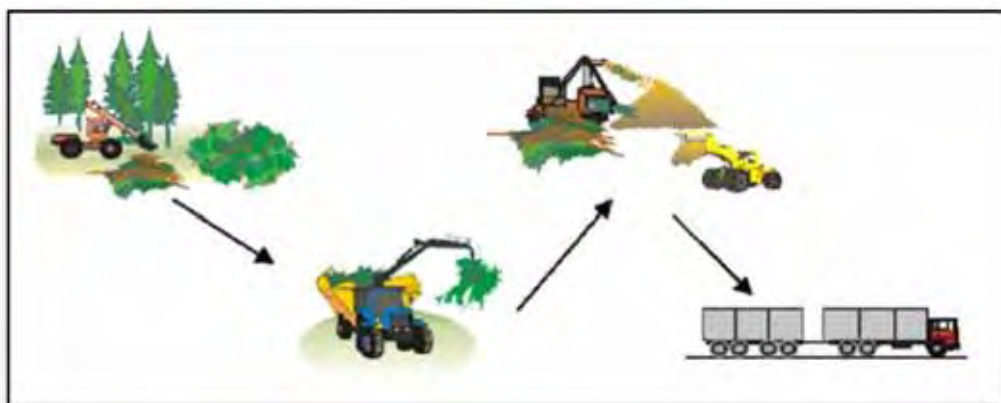
#### **2.7.3.3. Preparação de cavacos em pátios intermediários**

Segundo Leinonen (2004), neste sistema os resíduos florestais coletados são removidos para pátios intermediários, onde são estocados para redução da umidade e posteriormente picados. Os equipamentos Havu-hukkas são utilizados na remoção dos resíduos à longa distância.

Ainda segundo Leinonen (2004), a preparação de cavacos em pátios intermediários é recomendada em casos de abastecimento de plantas energéticas que consomem grandes quantidades desta biomassa, pela facilidade de formação de grande estoques.

Segundo Hakkila (2004), quanto maior a disponibilidade de resíduos, maior será a viabilidade de utilização deste sistema.

A Figura 12 aparenta uma ilustração do fluxo de sistema de preparação de cavacos em pátio intermediários.



**Figura 12.** Sistema de preparação de cavacos em pátios intermediários

Fonte: RANTA et al., (2001)

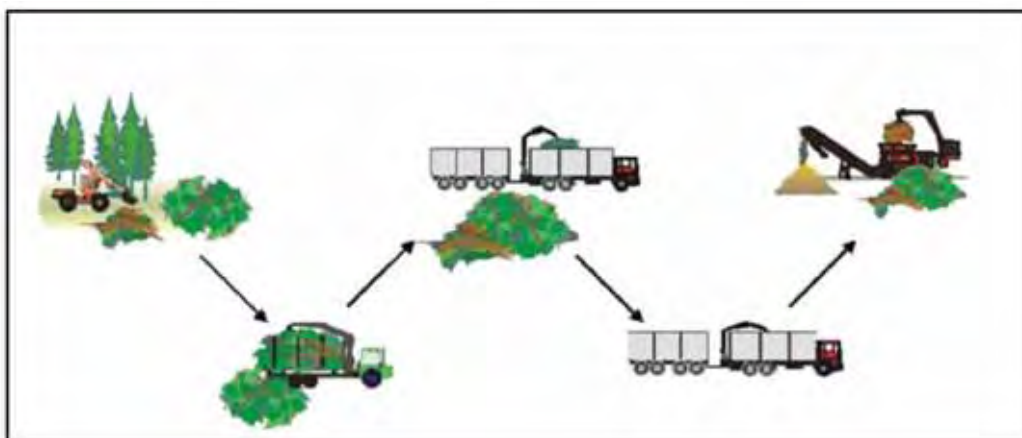
#### **2.7.3.4. Preparação de cavacos na indústria**

Segundo Leinonen (2004); Kallio e Leinonen (2005), os resíduos são transportados da floresta até a planta energética em sua forma in natura. Normalmente os resíduos são processados com a utilização de picadores ou trituradores estacionários. A viabilidade econômica deste sistema está relacionada com o custo do volume transportado, devido a baixa densidade dos resíduos, sendo que pesquisas indicam que são consideradas economicamente viáveis distâncias de transporte até 55 km.

Uma das alternativas que são empregadas para contornar o problema é a compactação dos resíduos no caminhão, utilizando-se carregador florestal com garra mais pesadas (LEINONEN, 2004).

A economia operacional da preparação de cavacos na indústria com a utilização de picadores ou trituradores fixos pode tornar o processo mais barato, em vista, ao uso de equipamentos moveis na floresta. Este sistema possui uma logística facilitada, uma vez que o carregamento e o transporte dos resíduos independente da etapa de preparação dos resíduos (RANTA e RINNE, 2006).

A Figura 13 ilustra o fluxo do sistema de preparação de resíduos na indústria.



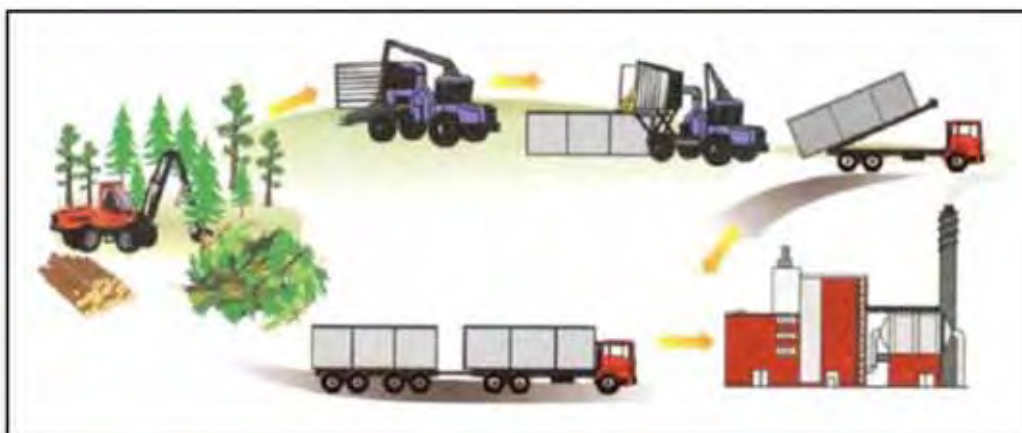
**Figura 13.** Sistema de Preparação de cavacos na indústria.

Fonte: RANTA et al., (2001).

#### **2.7.3.5. Preparação dos cavacos na floresta**

Segundo Alakangas et al. (1999), este sistema de preparação de cavacos utiliza um único equipamento (Terrain Chipper) responsável pela coleta e a secagem dos resíduos dentro da floresta, armazenando-os diretamente em um reboque de carga. Após o carregamento, o Terrain Chipper transfere os cavacos diretamente em containers avulsos dispostos nas margens das estradas, de onde são transportados até a planta de energia com utilização de caminhões adaptados para este transporte (Figura 14).

No mercado estão disponíveis vários modelos de Terrain Chipper, com produtividade de transporte e cavaqueamento variando de 15 a 20 m<sup>3</sup>/h de resíduos, a uma distância média do ponto de coleta até os containers de 200 m. Os containers possuem um volume de armazenamento de 20 m<sup>3</sup> (ALAKANGAS et al. 1999).



**Figura 14.** Sistema de preparação de cavacos dentro da floresta.

Fonte: KALLIO e LEINONEN, (2005).

Segundo Leinonen (2004), este sistema de processamento de resíduos florestais possui a vantagem de somente um equipamento ser responsável para executar o trabalho tornando-se mais fácil sua organização. Além disso, requer a ocupação de menos área nas margens das estradas para o estoque de cavaco, uma vez que os mesmos ficam armazenados nos containers.

Segundo Kallio e Leinonen (2005), o sistema de preparação de cavacos dentro da floresta tem como desvantagem a baixa habilidade de trabalho em terrenos adversos, a fraca competitividade econômica na extração de resíduo a longas distâncias e o baixo poder calorífico dos cavacos produzidos, em função do elevado teor de água devido a secagem ineficiente na floresta.

#### **2.7.4. Enfardamento dos resíduos florestais**

Esta tecnologia de enfardamento (bundling) vem sendo utilizada na Europa principalmente na Finlândia, em sistemas de toras curtas (cut-to-length), com objetivo de aproveitamento dos resíduos florestais como topo de árvores, galhos e árvores de pequenas dimensões. O enfardador denominado bundling machine, é adaptado em um chassi de Forwarders que realiza a coleta e a compactação da biomassa florestal residual, formando fardos cilíndricos amarrados com cordas ou cintas plásticas (LEINONEN, 2004).



Ainda segundo Leinonen (2004), este sistema possui a vantagem dos fardos ser manipulados, transportados e estocados como toras de madeira. A extração é feita com a utilização de Forwarders e os fardos podem ser empilhados nas margens das estradas ou pátios intermediários. O transporte é realizado por caminhões de transporte de toras de madeira e a preparação de cavacos é realizada na indústria com a utilização de picadores ou trituradores.

Segundo Cuchet et al. (2004) o enfardamento constitui uma alternativa para os problemas de aquecimento e deteriorização, comuns no estoque de cavacos úmidos em pilhas.

O Sistema de enfardamento apresenta vantagens logísticas, confiabilidade, alta disponibilidade operacional, maior controle do processo, produção em escala e impactos ambientais reduzidos. O equipamento opera independentemente de outros equipamentos do sistema, tornando o sistema integrado, otimizado e confiável; o sistema de aproveitamento de resíduos se integra de maneira simples ao sistema de colheita de madeira, pois a extração e o transporte podem ser realizados com os equipamentos convencionais (HAKKILA, 2004).

A Figura 15 ilustra o enfardamento bundling machine, e a Figura 16, ilustra o fluxo do sistema de enfardamento dos resíduos florestais.



**Figura 15.** Enfardador bundling machine.

Fonte: HAKKILA, (2004).



**Figura 16.** Sistema de enfardamento de resíduos florestais.

Fonte: KALLIO e LEINONEN, (2005).

### 2.7.5. Desbastes das árvores

Os processos de desbastes são realizados para remover parte das árvores da floresta, objetivando estimular o crescimento das árvores remanescentes, uma vez que, ao se reduzir o número de árvores por unidade de área, promove-se a redução de competição entre as árvores por luz, umidade e nutrientes do solo (DO CANTO, 2009).

Ainda segundo Do Canto (2009), geralmente os desbastes são realizados para remover as árvores de baixa qualidade e/ou pequenas dimensões, objetivando abrir espaços para o incremento das árvores de melhor qualidade. Mas os desbastes também são práticas realizadas para evitar acúmulo de biomassa combustível, que coloca a floresta em situação de risco de incêndio e para eliminação de focos pragas e doenças.

A empresa Timberjack desenvolveu um Harvester para árvores de pequena dimensão, com cabeçote multifuncional com capacidade de cortar e acumular até 10 árvores para empilhá-las em feixes (LEINONEN, 2004; KALLIO e LEINONEN, 2005).

Ainda segundo Leinonen (2004) e Kallio e Leinonen (2005), quanto menor forem as dimensões das árvores, mais lucrativo é o corte com utilização de motosserras. Nos países escandinavos, por exemplo, a Finlândia, o desbaste de floresta



jovem, com disponibilidade de madeira somente para aproveitamento energético, ainda tem sido realizado manualmente com motosserras.

As árvores cortadas podem ser empilhadas ao lado das trilhas, formando feixes, que são extraídos com a utilização de Forwarders até a margem das estradas. Neste modelo de processamento dos resíduos, o método de cavaqueamento mais utilizado é o realizado nas margens das estradas, com transporte realizado por caminhões containers (LEINONEN, 2004).

#### **2.7.6. Estoque de resíduos florestais**

Brand (2007), relata que a estocagem de resíduos florestais é uma fase muito importante da colheita. A biomassa florestal recém colhida não é indicada para ser utilizada como combustível devido ao seu baixo desempenho energético.

Os resíduos florestais podem permanecer amontoados na floresta, estocados às margens das estradas ou pátios intermediários. Segundo Kallio e Leinonen (2005), o teor de umidade a base úmida diminui consideravelmente com o estoque, passando de 50 a 30%.

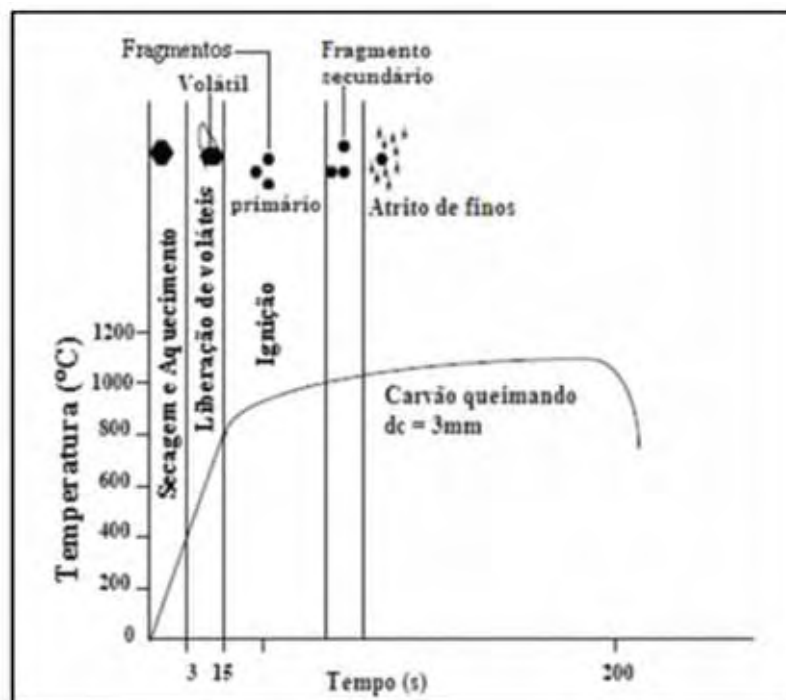
### **2.8. Caldeiras de leito fluidizado e caldeiras de recuperação de calor e produtos químicos em fábricas de celulose**

#### **2.8.1. Caldeiras de leito fluidizado**

Segundo Karppanen (2000), a combustão em leito fluidizado iniciou no ano de 1920, com o cientista alemão Fritz Winder, utilizando como combustível partícula de coque. A solução técnica continuou em progresso, mas o desenvolvimento da combustão de produtos sólidos em leito fluidizado não teve grandes progressos até meados da década de 1970.

Nos dias de hoje é amplamente usada na combustão de resíduos e de biomassa, com objetivo de valorizar materiais descartados dos processos produtivos, com a produção de energia térmica e elétrica (PINTO, 2011).

A Figura 17 apresenta um fluxograma básico do processo da combustão em leito fluidizado.



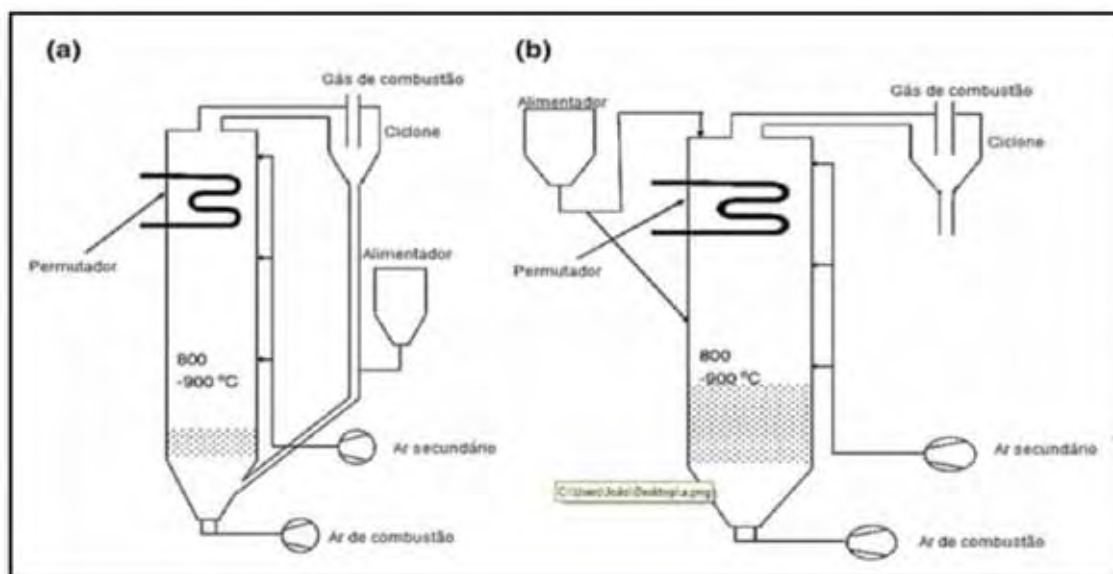
**Figura 17.** Fluxo do processo de combustão em leito fluidizado.

Fonte: (KARPPANEN, 2000).

A idéia básica da combustão em leito fluidizado é a fluidização do material do leito (normalmente areia com cinza do combustível), pela introdução do ar primário de fluidização diretamente no fundo da câmara de combustão (CORÁ, 2006).

Este tipo de tecnologia possui duas variantes, com princípios de funcionamento distintos, sendo: a) leito fluidizado circulante (LFC), e b) leito fluidizado borbulhante (LFB) (PINTO, 2011).

A Figura 18 ilustra exemplos de sistemas de leito fluidizado circulante (LFC) e leito fluidizado Borbulhante (LFB).



**Figura 18.** Exemplo de um sistema LFC (a) e LFB (b).

Fonte: LOO e KOOPEJAN, 2008.

#### 2.8.1.1. Sistema de leito fluidizado circulante (LFC)

O sistema LFC, utiliza partículas de leito com dimensão variando de 0,2 a 0,4 mm, que durante o processo, são transportadas juntamente com o gás de combustão para um ciclone, onde são separadas do gás, para serem encaminhadas para o fundo do reator (PINTO, 2011).

Ainda segundo Pinto (2011), a elevada turbulência existente durante o processo de combustão, permite uma maior uniformidade de temperatura ao longo de todo reator, que por sua vez permite um melhor controle do processo minimizando as perdas de calor.

Segundo Simão (2011), estas caldeiras são projetadas para elevada produção de energia e requerem combustíveis com elevado poder calorífico como carvão, pneu picado, coque e plástico. Os custos operacionais são altos, devido requerer combustíveis de elevado poder calorífico e possuem eficiência baixa para combustíveis que apresentam baixo poder calorífico. Apresentam maturidade tecnológica média com algumas instalações desenvolvidas.

### **2.8.1.2. Sistema de leito fluidizado borbulhante (LFB).**

Neste sistema, o leito é, normalmente composto por areia com dimensões entre 0,5 a 1 mm, situada no fundo do reator onde é injetada o ar primário, sendo o ar secundário injetado na parte superior da câmara de combustão (PINTO, 2011).

O leito funciona como um reservatório de calor, permitindo que as reações químicas possam decorrer com maior estabilidade. Fisicamente, o *freeboard* é a câmara que se encontra acima do leito, onde a biomassa é admitida juntamente com o ar secundário (KUNII; LEVENSPIEL, 1991).

Ainda segundo Kunii e Levenspiel, (1991), durante o processo de combustão, algumas partículas são transportadas com o gás de combustão para o *freeboard*. No entanto, apenas as partículas mais finas são arrastadas até o topo do reator, enquanto as partículas de areia de maior dimensão voltam para o leito.

O fator mais importante para o bom desempenho do reator é a qualidade do fenômeno de fluidização, o qual se caracteriza pela suspensão de partículas em um meio gasoso. A eficiência de combustão depende do tamanho das partículas, razão da densidade fluido/sólido e geometria de reator (PINTO, 2011).

Segundo Simão (2011), as caldeiras de leito fluidizado borbulhante (LFB), são projetadas para conseguirem uma rápida mistura dos combustíveis obtendo uma combustão eficiente. Toleram índices mais elevados de umidade e consequente menor poder calorífico, como resíduos florestais úmidos e resíduos de efluentes industriais (lama). Os custos operacionais são de baixo a médio e sua tecnologia está bem estabelecida nas indústrias que utilizam a energia térmica para geração de calor e co-geração de energia elétrica.

### **2.8.2. Caldeiras de recuperação de calor e produtos químicos em fábricas de celulose**

A tecnologia de aproveitamento da energia térmica dos produtos químicos contidos nos rejeitos de extração de celulose contida em determinadas espécies vegetais constitui o exemplo mais notável de caldeiras de recuperação (PERA, 1990).

O processo tem a particularidade de gerar vapor para atender as necessidades da própria instalação e extração da celulose, como ainda de reciclar até 90% dos insumos de produtos químicos exigidos no cozimento da madeira.

A instalação completa deste sistema compreende inicialmente uma evaporação, para concentrar o líquido residual que sobra da fabricação da celulose. Este licor negro, como normalmente se denomina com teor de sólidos totais de 13 a 17%, bastante fluido concentra-se até 60-63%, com aspecto de um líquido negro e viscoso que apresenta características de um combustível (PERA, 1990).

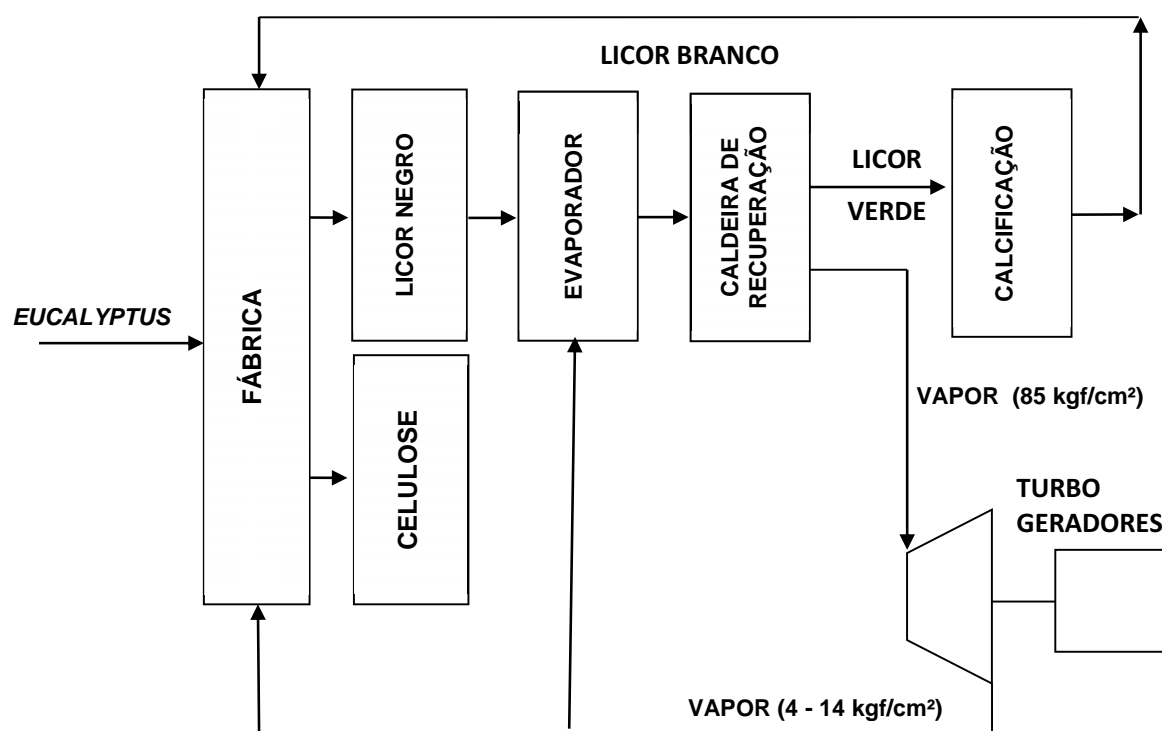
Ainda segundo Pera (1990), esta concentração atingindo até 63% de sólidos totais, contém ainda 37% de água, sendo as partes sólidas, representadas por substâncias de natureza orgânica e inorgânica. Estas últimas fazem parte dos componentes químicos que atuam nos cozimentos de madeira para liberar a celulose e dissolver as ligninas.

Este licor negro concentrado, injetado na caldeira, sustenta uma combustão, graças a seu teor de matéria orgânica, gerando calor em quantidade tal que funde a parte mineral de sua constituição (reaproveitada no processo) e ainda produz importante quantidade de vapor, suficiente para dar autonomia energética ao próprio processo de fabricação de celulose.

Segundo Assumpção et al., (1988), a caldeira de recuperação tem três funções básicas: recuperar os reagentes inorgânicos, em forma apropriado para reutilização; recuperar a energia em forma de vapor; abater ou eliminar a poluição tanto do ar como das águas.

Embora a recuperação dos reagentes seja a função mais importante da unidade, a produção de vapor adquiriu significado comparável. O licor negro concentrado para ser queimado apresenta cerca de 50% de massa de madeira seca utilizando no cozimento. O poder calorífico dos sólidos no licor de *Eucalyptus* gira em torno de 12,13 MJ/kg (2900 kcal/kg), em comparação a 15,48 MJ/kg (3700 kcal/kg) no licor de coníferas; estes caracterizam o material como combustível pobre quando comparado com o carvão ou o petróleo (ASSUMPÇÃO, et al., 1988).

A Figura 19 ilustra o fluxograma simplificado de um sistema de recuperação de calor e de produtos químicos em fabrica de celulose.



**Figura 19.** Sistema de recuperação de calor e de produtos químicos em fábrica de celulose.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho de pesquisa foi desenvolvido na empresa Lwarcel Celulose LTDA., onde foram analisados os locais e as quantidades de resíduos florestais e cascas gerados durante a colheita do *Eucalyptus* que atualmente são descartados pela empresa em estudo. Foi também analisada a necessidade energética da unidade fabril em questão, sob os aspectos de energia térmica e elétrica. Através dos índices de controle da empresa determinaram-se as quantidades e os tipos de combustíveis utilizados na produção de vapor para aquecimento do processo e co-geração de energia elétrica.

#### 3.1. Fábrica de celulose de *Eucalyptus*

A indústria Lwarcel Celulose LTDA, pertencente ao grupo Lwart possui uma fábrica de celulose de *Eucalyptus* (branqueada), localizada no município de Lençóis Paulista no Estado de São Paulo. Opera com uma linha de produção desde a década de 80 quando foi fundada. Atualmente a indústria é produtora de 263800 t/ano de celulose, tem como mercado interno 65% de sua produção e 35% são destinados a exportação.

A Tabela 8 mostra as principais características da unidade em questão.

**Tabela 8.** Dados da unidade Fabril da empresa Lwarcel

ITEM	VALOR
Área construída	42607,0 m <sup>2</sup>
Área total	152547,0 m <sup>2</sup>
Capacidade de produção de vapor (máx.)	235 t/h
Capacidade produtiva	263800 *tsa/ano
Certificação	ISO 9001, ISO 14001 e FSC.
Consumo de biomassa para caldeira de leito fluidizado	16879,00 t/mes
Número de caldeiras instaladas	2
Número de linhas de produção	01 linha de produção de celulose branqueada
Potência elétrica instalada (elétrica)	33,7 MW
Tensão de entrada	13800 V
Madeira consumida no processo de fabricação de celulose (sem casca)	670776 t/ano

\*tsa= Tonelada de celulose seca ao ar.

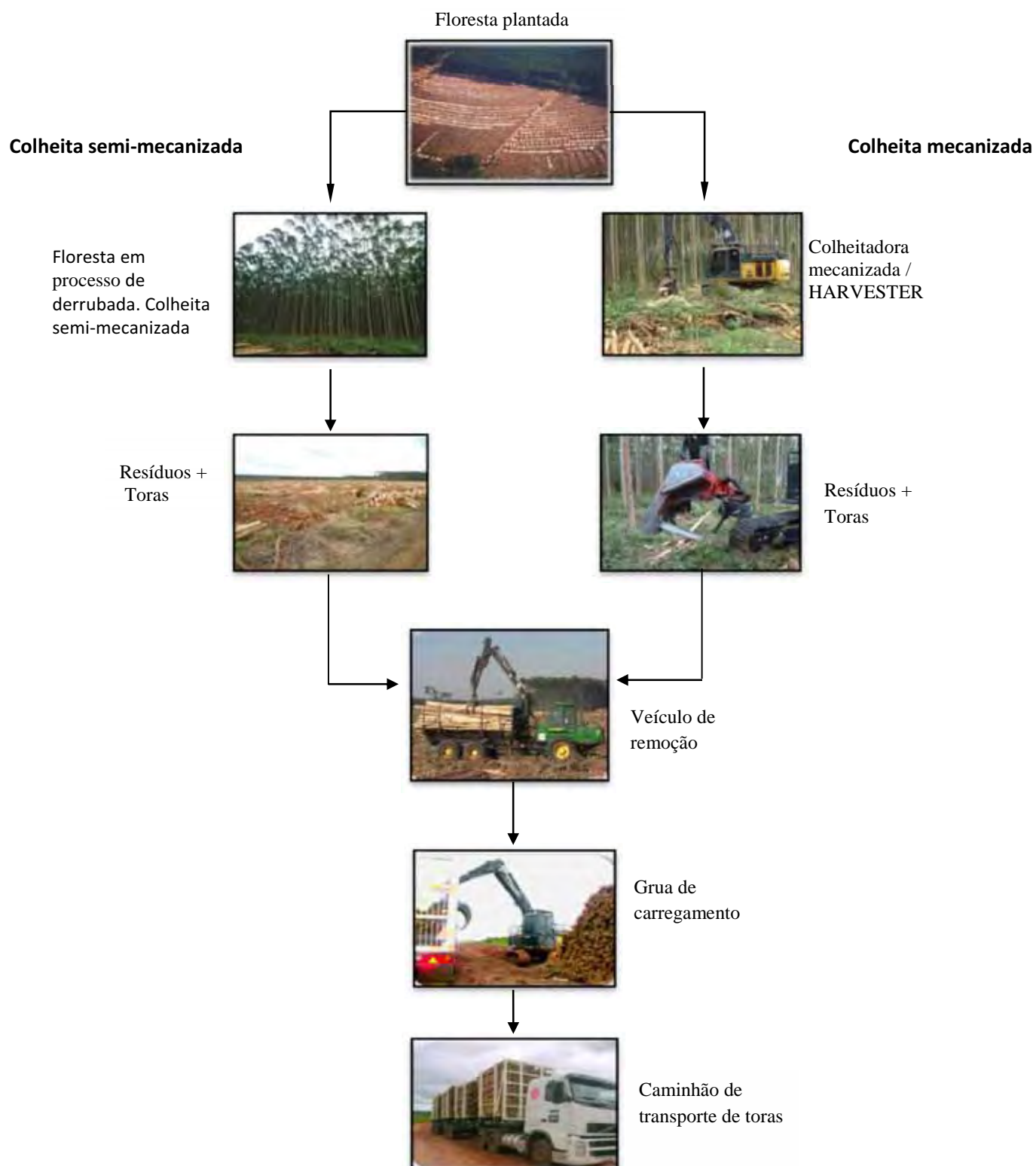
### 3.2. Setor florestal

A indústria Lwarcel Celulose LTDA. apresenta em seu inventário florestal, áreas plantadas com clones e sementes de *Eucalyptus grandis* e *urograndis*, entre fazendas próprias, fomento e arrendadas. O setor florestal possui em torno de 33500 ha de área de plantio de *Eucalyptus*, sendo 42 fazendas próprias, 50 fazendas arrendadas, 14 fazendas em parceria e 60 fazendas no programa de fomento. A divisão entre área plantada com *Eucalyptus* é composta de 90% de clone e 10% de semente.

### 3.3. Sistema de colheita da madeira praticado pela empresa

A colheita ocorre 7 anos após o plantio. Através de processos semi-mecanizados e mecanizados, com descascamento no campo, produz atualmente 800000 m<sup>3</sup>/ano de madeira para o processo de fabricação de celulose. A Figura 20 apresenta a movimentação de toras e resíduos florestais de *Eucalyptus* durante as atividades de colheita da madeira.





**Figura 20.** Esquema de colheita e transporte de toras e resíduos florestais realizado pela empresa Lwarcel Celulose.

### 3.3.1. Características da colheita semi-mecanizada realizada pela empresa estudada

A colheita é manual envolvendo as atividades de derrubada, desgalhamento e traçamento. Nos sistemas de colheita semi-mecanizada, o corte e o desgalhamento são processados com a utilização de motosserras manuais, sendo as árvores seccionadas em toras com comprimento de três metros.

O descascamento mecanizado utilizado neste sistema é realizado utilizando-se um descascador móvel que é movimentado pela tomada de força de um trator e alimentado manualmente. O transporte primário de retirada da madeira para uma entrada transitável por caminhões é realizado por um trator auto-carregável.

Após 60 dias do descasque, as toras compostas do lenho com altura comercial das árvores são transportadas para a fábrica utilizando-se para este transporte o caminhão bi-trem e seu carregamento é feito à beira da estrada transitável.

Os resíduos florestais compostos de galhos das copas das árvores são vendidos a terceiros que são responsáveis pela sua remoção das florestas. As cascas permanecem nas florestas para reposição de nutrientes no solo.

A Figura 21 apresenta o modelo de corte manual do *Eucalyptus* praticado pela empresa.



**Figura 21.** Corte manual com motosserra.

### 3.3.2. Características da colheita mecanizada realizada pela empresa estudada

Neste modelo de colheita, o corte do Eucalyptus é feito de forma mecanizada com utilização do equipamento Harvesters, (Figura 22), com operações automatizadas de corte e descascamento. A árvore é seccionada em toras com comprimento de 6,00 metros até a altura comercial.



**Figura 22.** Corte e processamento.

A retirada das toras do local de corte, isto é, transporte para estrada transitável e empilhamento a beira desta estrada é feita com a utilização do equipamento Forwarder (Figura 23).

Os resíduos florestais compostos de galhos das copas das árvores são vendidos a terceiros que são responsáveis pelo corte com utilização de motosserras e sua remoção das florestas. As cascas também permanecem nas florestas para reposição de nutrientes no solo.



**Figura 23.** Remoção da madeira.

### **3.4. Dados e parâmetros do ciclo termodinâmico e a geração de potência energética na unidade Fabril**

O ciclo termodinâmico existente na fábrica de celulose Lwarcel de Lençóis Paulista é composto basicamente por 2 (duas) caldeiras, sendo: caldeira de recuperação e caldeira de leito fluidizado. Dois turbo geradores de energia elétrica são responsáveis pelo suprimento da energia elétrica demandada pelo processo da empresa e o excesso de energia é vendido a terceiros.

#### **3.4.1. Caldeira de recuperação**

A caldeira de recuperação é utilizada para produção de vapor superaquecido a pressão de 8,14 MPa (83,0 kgf/cm<sup>2</sup>). Tem por finalidade converter a energia contida no licor negro (resíduo do processo de celulose) em energia térmica, elétrica e recuperação dos insumos químicos utilizados no processo de fabricação.

O vapor superaquecido na saída da caldeira escoar por uma rede de duto coletora de onde saem duas derivações, sendo:

a. Derivação de vapor superaquecido a pressão de 8,14 MPa (83,0 kgf/cm<sup>2</sup>) passando pelos turbo geradores (co-geração), onde seu calor é transformado em trabalho na geração de energia elétrica (ciclo Rankine);

b. Derivação onde o vapor passa da forma superaquecido para a forma saturado através de uma válvula redutora de pressão, reduzindo sua pressão de 8,14 MPa (83,0 kgf/cm<sup>2</sup>) para 0,44 MPa (4,5 kgf/cm<sup>2</sup>). Neste caso o calor produzido pelo vapor saturado não é transformado em trabalho, apenas utilizado com a finalidade aquecimento do processo e secagem da celulose.

O vapor de saída dos turbo geradores apresenta as características de vapor saturado a 0,44 MPa (4,5 kgf/cm<sup>2</sup>) que também é utilizado no aquecimento do processo, secagem da celulose e aquecimento da água de alimentação das caldeiras.

O licor negro concentrado para ser queimado apresenta cerca de 50% da massa seca da madeira, utilizada na produção de celulose e possui o poder calorífico útil de aproximadamente 12,13 MJ/kg (2900,00 kcal/kg), conforme foi informado pela empresa estudada.

Os dados de consumo de licor negro e produção de vapor superaquecido da caldeira de leiteo fluidizado foram obtidos dos relatórios de controle da empresa.

A Figura 24 apresenta uma vista lateral da caldeira de recuperação de calor e de produtos químicos da fábrica de celulose.



**Figura 24.** Vista lateral de uma caldeira de recuperação de calor e de produtos químicos da fábrica de celulose.

### **3.4.2. Caldeira de leito fluidizado**

A Caldeira de leito fluidizado, um dos principais objetos de estudo deste trabalho, é utilizada para produção de vapor superaquecido também a pressão de 8,14 MPa (83,0 kgf/cm<sup>2</sup>), tem por finalidade converter a energia da biomassa florestal em energia térmica em forma de vapor superaquecido. Posteriormente o vapor superaquecido é enviado para a mesma rede coletora de saída de vapor da caldeira de recuperação, interligado as caldeiras na mesma rede de dutos.

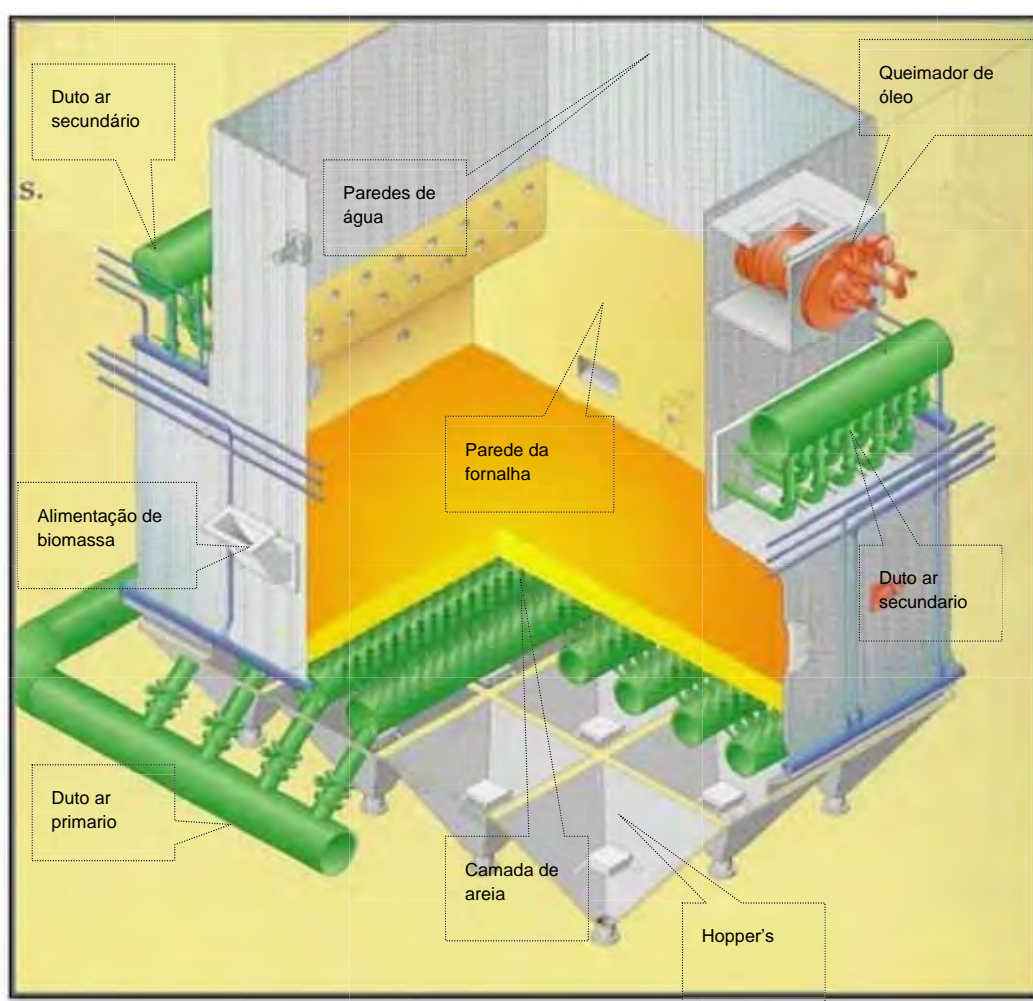
O vapor gerado na caldeira de leito fluidizado também é utilizado na geração de energia elétrica (co-geração). Após passar pelos turbo geradores, o vapor com características saturado a 0,44 MPa (4,5 kgf/cm<sup>2</sup>), também é utilizada no processo para aquecimento, secagem da celulose e aquecimento da água de alimentação das caldeiras.

Contudo a biomassa florestal utilizada como combustível nesta caldeira é em sua maior parte adquirida de terceiros, oriunda da biomassa florestal, bagaço



de cana de açúcar e resíduos das indústrias madeireiras. Uma pequena parcela da biomassa florestal utilizada é proveniente do rejeito da peneira classificatória de cavacos de *Eucalyptus* do processo de fabricação da empresa. A biomassa florestal é o principal combustível utilizado nesta caldeira. O óleo BPF (baixo ponto de fluidez), é utilizado somente como chama piloto no início do processo de combustão.

A Figura 25 apresenta uma ilustração da caldeira de leito fluidizado com seus principais componentes.



**Figura 25.** Principais componentes de um Leito Fluidizado Borbulhante.

A Figura 26 apresenta as instalações da caldeira de leito fluidizado e o pátio da biomassa adquirida de terceiros.



**Figura 26.** Instalações da caldeira de leito fluidizado e o pátio da biomassa florestal.

### **3.4.3. Consumo, custo de combustíveis e produção de vapor**

Os dados de produção de vapor das caldeiras de recuperação e leito fluidizado foram obtidos dos relatórios de controle do processo da empresa. Também foram levantados os custos e consumo dos combustíveis (biomassa) da caldeira de leito fluidizado.

Todos os dados levantados são referentes ao período de abril de 2011 a abril de 2012. O mês de junho de 2011 foi descartado do levantamento porque a



fábrica operou somente 23 dias neste mês. O regime operacional da empresa é de 11,67 meses por ano.

### **3.5. Geração de cascas e resíduos**

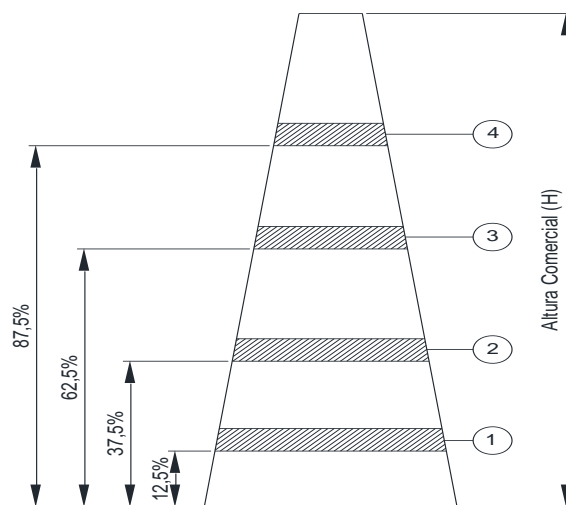
Após a colheita semi-mecanizada e mecanizada o descarte da biomassa florestal nas florestas da empresa compõem-se em sua maior parte de cascas da madeira e resíduos que são os galhos das copas das árvores e folhas. O aproveitamento destes descartes utilizando-os como combustíveis na caldeira de leito fluidizado é objeto de estudo deste trabalho.

#### **3.5.1. Cascas**

Após a colheita da madeira as cascas e folhas são deixadas na floresta para incorporação da massa orgânica no solo.

O índice médio do total de cascas geradas nas florestas foi determinado utilizando-se 72 amostras de madeira coletadas nas florestas da empresa em pesquisa e analisadas no Laboratório de Física e Biofísica da Universidade Estadual Paulista, UNESP de Botucatu, SP.

As amostras foram coletadas em forma de discos nas alturas de 12,5%, 37,5%, 62,5% e 87,5% da altura comercial das árvores, totalizando 4 (quatro) amostras por árvore conforme apresentado na Figura 27. Para a retirada dos discos foram coletadas 6 (seis) árvores por fazenda, provenientes de 3 (três) fazendas com plantações dos gêneros de *Eucalyptus grandis* e *urograndis*.



**Figura 27.** Coleta de amostras dos discos.

O índice de casca contida na madeira foi obtido com a utilização da Equação (1).

$$I_{\text{casca}} = \frac{M_{\text{ucasca}}}{M_{\text{usc}}} \quad (1)$$

onde :

$I_{\text{casca}}$ ; é o índice de casca em relação à massa de madeira sem casca (-);

$M_{\text{ucasca}}$ ; a média da massa de cascas contidas nas amostras (g);

$M_{\text{usc}}$ ; a média das massas de madeira sem cascas contidas nas amostras (g).

Com auxílio dos relatórios de controle de produção da empresa, referentes à massa de madeira sem casca que foi consumida na produção de celulose durante o período de Abril de 2011 a Abril de 2012, e aplicação da Equação (2), determinaram-se a quantidade total de cascas que permanecem nas florestas após a colheita da madeira.

$$M_{\text{casca}} = C_{\text{madeira}} \cdot I_{\text{casca}} \quad (2)$$

onde :

$M_{casca}$ ; é a quantidade total de cascas que permanecem nas florestas (t/ano);

$C_{madeira}$ ; a média anual da massa de madeira sem cascas consumidas pelo processo de produção (t/ano);

A determinação da massa úmida das cascas a serem retiradas das florestas para geração da energia térmica e elétrica foi calculada de acordo com a Equação (3), com base na informação prestada pela empresa Areva Koblitz, especializada na elaboração de projetos de plantas de co-geração de energia elétrica a partir da utilização da biomassa florestal. Segundo a Areva koblitz podem ser retiradas das florestas um total de 70% dos resíduos gerados durante a colheita da madeira. As partes restantes das cascas devem permanecer nas florestas para serem incorporados ao solo como via de fornecimento de nutrientes.

$$M_{tcasca} = M_{casca} \cdot 0,7 \quad (3)$$

onde :

$M_{tcasca}$ ; é a massa útil das cascas a serem retiradas das florestas (t/ano);

### 3.5.2. Resíduos

Os galhos das copas das árvores são cortados em comprimentos de aproximadamente de um metro, empilhados e mensurados quantitativamente, que posteriormente são vendidos a terceiros que a utilizam como combustível em fornos de padarias, pizzarias, olarias, estufas secadoras de grão, etc. Os índices de geração de resíduos, o preço de venda e a densidade dos galhos das copas das árvores, foram quantificados em inventários florestal, informado pela empresa em estudo.

O volume médio destes resíduos foram determinados com aplicação da Equação (4) para resíduos gerados nas colheitas mecanizadas, e Equação (5) para resíduos das colheitas semi-mecanizadas.

#### a. Colheitas mecanizadas:

$$V_{resíduo} = I_m \cdot A_m \quad (4)$$

onde :

$V_{\text{resíduo}}$ ; é o volume dos resíduos gerados ( $\text{m}^3\text{st/ano}$ );

$I_m$ ; o índice de geração de resíduos das colheitas mecanizadas ( $\text{m}^3\text{st/ha}$ );

$A_m$ ; a área florestal das colheitas mecanizadas ( $\text{ha/ano}$ ).

#### **b. Colheitas semi-mecanizadas:**

$$V_{\text{resíduo}} = I_s \cdot A_s \quad (5)$$

onde :

$V_{\text{resíduo}}$ ; é o volume dos resíduos gerados ( $\text{m}^3\text{st/ano}$ );

$I_s$ ; o índice de geração de resíduos das colheitas semi- mecanizadas ( $\text{m}^3\text{st/ha}$ );

$A_s$ ; a área florestal das colheitas semi-mecanizadas ( $\text{ha/ano}$ ).

As áreas das florestas das colheitas mecanizada e semi-mecanizada, foram obtidas dos relatórios de controle da empresa.

A conversão do volume total de resíduos gerados (colheitas mecanizadas + semi-mecanizadas) para massa de resíduos foi obtida com aplicação da Equação (6).

$$M_{\text{resíduo}} = \left( \frac{\rho_{\text{resíduo}} \cdot V_{\text{resíduo}}}{1000} \right) \quad (6)$$

onde :

$M_{\text{resíduos}}$ ; é a massa total de resíduos úmidos gerados ( $\text{t/ano}$ );

$V_{\text{resíduo}}$ ; o volume total dos resíduos úmidos ( $\text{m}^3\text{st/ano}$ );

$\rho_{\text{resíduo}}$ ; a densidade dos resíduos úmidos ( $\text{kg/m}^3$ ).

A conversão do volume dos resíduos de  $\text{m}^3\text{st}$  (metro cúbico stereo de madeira empilhada) para  $\text{m}^3$  (metro cúbico de madeira sólida) foi obtida aplicando-se o índice 1,5 (fornecido pela empresa), sendo:  $1 \text{ m}^3 = 1,5 \text{ m}^3\text{st}$ .

### **3.6. Determinação do teor de umidade com base em massa úmida das cascas e resíduos**

Para obtenção do teor umidade das cascas, foram coletadas 10 amostras de cascas úmidas com volume de 300 cm<sup>3</sup> que posteriormente foram levadas em estufa para secagem, em uma temperatura de 105 ± 5 °C, durante um período de 24 h. O teor de umidade dos resíduos foi obtido pelo mesmo método das cascas com aproveitamento das 72 amostras de *Eucalyptus* utilizadas para determinação da quantidade de cascas contidas na madeira e estão apresentadas no apêndice.

As análises foram elaboradas no Laboratório de Física e Biofísica da UNESP em Botucatu, SP.

O teor de umidade com base em massa úmida das cascas e resíduos foram determinados de acordo com as Equações (7) e (8).

$$M_{H_2O} = M_u - M_0 \quad (7)$$

$$u = \frac{M_{H_2O}}{M_u} \cdot 100 \quad (8)$$

onde :

$M_{H_2O}$ ; é a massa de água contida na amostra (g);

$M_u$ ; a massa úmida da amostra (g);

$M_0$ ; a massa seca da amostra (g);

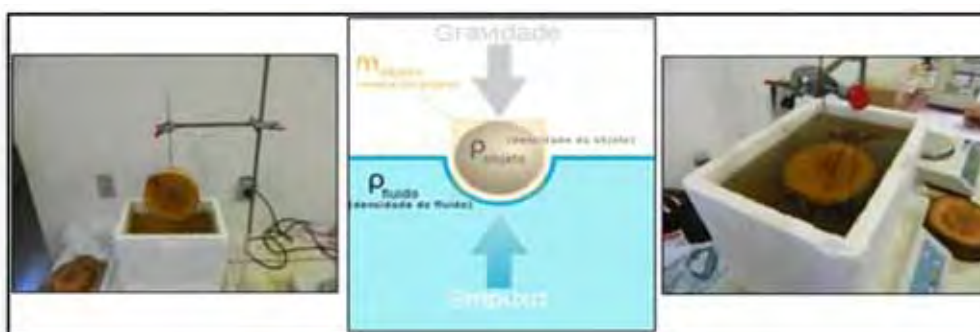
$u$ ; o teor de umidade com base em massa úmida da amostra (%).

### 3.7. Determinação da densidade do lenho

A densidade dos resíduos vendidos a terceiros foi determinada pelo método de imersão com aproveitamento das 72 amostras de *Eucalyptus* utilizadas para determinação da quantidade de cascas contidas na madeira e apresentadas no apêndice.

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 ocasionado quando a madeira é submersa em água.

A determinação do volume baseia-se no princípio de Arquimedes (Figura 28): 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 de formato irregular. A água e o mercúrio são os líquidos mais freqüentes utilizados (VITAL, 1984).



**Figura 28.** Determinação do volume das amostras.

Fonte: UNESP-Botucatu-SP, (2011).

No presente trabalho a densidade dos resíduos florestais vendidos a terceiros foi determinada com aplicação da Equação (9). Para determinação das variáveis  $M_{ucc}$  e  $V_{cc}$  foram consideradas as médias da massa dos discos das 72 amostras do lenho com casca e seu volume com casca (APÊNDICE).

$$\rho_{\text{resíduo}} = \frac{M_{ucc}}{V_{cc}} \quad (9)$$

onde:

$\rho_{\text{resíduo}}$ ; é a densidade do resíduo para o teor de umidade com base em massa úmida ( $\text{g/cm}^3$ )

$M_{ucc}$ ; a média da massa das amostras dos discos com cascas para teor de umidade com base em massa úmida (g)

$V_{cc}$ ; a média do volume das amostras dos discos com casca para teor de umidade com base em massa úmida ( $\text{cm}^3$ )

### 3.8. Determinação do poder calorífico das cascas que permanecem nas florestas e dos resíduos florestais vendidos a terceiros após a colheita da madeira

#### 3.8.1. Poder calorífico superior (PCS) das cascas e dos resíduos

O poder calorífico superior (PCS) foi determinado pelo método da bomba calorimétrica (Figura 29), e suas determinações foram realizadas no Laboratório de Física Aplicada do Departamento de Física e Biofísica da UNESP de Botucatu – SP.

O PCS das cascas e dos resíduos (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 18 amostras de cascas e resíduos nas florestas da empresa em estudo, e utilizou-se a Equação (10):

$$PCS = \frac{K + Ma}{M_s} \Delta t \quad (10)$$

onde:

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

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

$\Delta t$  ; o gradiente de temperatura antes e após a combustão ( ° C);

K; a constante do calorímetro (g);

M<sub>s</sub>; a massa seca da amostra (g).

A massa de água (Ma), utilizada no calorímetro foi de 2500 g e o valor da constante do calorímetro foi de 488,9 g.



**Figura 29.** Calorímetro utilizado para determinação do poder calorífico superior (PCS).

Fonte: UNESP-Botucatu-SP, (2011).

### 3.8.2. Poder calorífico inferior (PCI) das cascas e dos resíduos

Segundo Brito et al. (2008), a relação entre o PCI e o PCS é regida pela quantidade de hidrogênio presente na composição química elementar da madeira. Considerando-se que, em geral seu teor na madeira é constante (em torno de 6%), a energia a ser consumida para evaporação da água a ser formada será também constante e equivalente a 324 Kcal/kg de água.

Utilizou-se então a Equação (11) para determinar do PCI das cascas e dos resíduos:

$$\text{PCI} = \text{PCS} - 324 \quad (11)$$



onde:

PCS; é o poder calorífico superior da amostra (kcal/kg);

PCI; o poder calorífico inferior da amostra (kcal/kg).

### 3.8.3. Poder calorífico líquido (PCLu) das cascas e dos resíduos

Ainda segundo Brito et al. (2008), na prática dificilmente a madeira será usada na condição anidra. É necessário considerar a água livre e a água higroscópica contida no seu interior. A água da madeira expressa pelo seu teor de umidade é talvez o fator que maior influencia exerce sobre a liberação de energia. No processo de combustão, a primeira etapa consiste na sua vaporização, o que significa um dispêndio de energia da ordem de 600 Kcal/kg de água. Portanto, o teor de umidade representa poder calorífico negativo, pois para sua eliminação provém da própria madeira durante o processo de combustão.

É possível o cálculo aproximado do poder calorífico inferior, levando-se em conta o teor de umidade da madeira. Tem-se, então o denominado poder calorífico líquido (PCLu) das cascas e dos resíduos, definido por Brito et al. (2008) e adotado neste trabalho conforme apresentado na Equação (12).

$$PCLu = PCI \cdot \left( \frac{100 - u}{100} \right) - 6 \cdot u \quad (12)$$

onde:

PCLu; é o poder calorífico líquido da amostra com teor de umidade u (kcal/kg);

PCI; o poder calorífico inferior da amostra (kcal/kg);

u; o teor de umidade da amostra de casca ou resíduo com base em massa úmida (%).

### 3.9. Cálculos para aproveitamento das cascas, resíduos e equivalência dos custos com biomassa florestal adquirida de terceiros para geração da energia elétrica e térmica da empresa.

A quantidade de vapor que pode ser obtido com a queima das cascas e dos resíduos (atualmente descartados pela empresa) na caldeira de leito fluidizado foi abordada conforme recomendado por Pera (1990), com a utilização da Equação (13).

$$V = \frac{M_t \cdot 1000 \cdot \mu \cdot PCLu}{\Delta h} \quad (13)$$

onde:

V; é a quantidade de vapor que se pode obter com a queima das cascas e dos resíduos na caldeira de leito fluidizado (kg/h)

M<sub>t</sub>; a massa úmida das cascas ou dos resíduos atualmente descartados (t/h)

μ; o rendimento da caldeira de leito fluidizado ( % )

PCLu; o poder calorífico líquido das cascas ou dos resíduos (kcal/kg)

Δh; a diferença das entalpias entre o vapor gerado e a água de alimentação da caldeira de leito fluidizado (kcal/kg)

Os valores de entalpias do vapor gerado na caldeira de leito fluidizado e água de alimentação foram obtidos através do diagrama de Mollier e apresentado por Perry (1974).

A equivalência em biomassa adquirida de terceiros, obtida (economizada) com a queima das cascas e resíduos descartados foi calculada aplicando-se a Equação (14).

$$M_{\text{biomassa}} = \frac{V}{I_{\text{consumo}}} \quad (14)$$

onde:

M<sub>biomassa</sub>; é a massa equivalente em biomassa úmida adquirida de terceiros, obtida com a queima das cascas e resíduos florestais que atualmente são descartados pela empresa (t/h)

V; a quantidade de vapor que se pode obter com a queima das cascas e dos resíduos (t/h)

I<sub>consumo</sub>; o índice de consumo de biomassa para produção de vapor na caldeira de leito fluidizado ( $t_{\text{(vapor)}} / t_{\text{(biomassa)}}$ )

O índice de consumo de biomassa para produção de vapor na caldeira de leito fluidizado foi obtido com auxílio dos dados referentes à produção de vapor nesta caldeira, e consumo da biomassa rejeitadas na peneira oscilante do processo de fabricação mais a biomassa adquirida de terceiros durante o período de Abril de 2011 a Abril de 2012.

O índice de consumo de biomassa na caldeira de leito fluidizado foi obtido com aplicação da Equação (15).

$$I_{\text{consumo}} = \frac{P_{\text{vapor}}}{C_{\text{biomassa}}} \quad (15)$$

onde:

P<sub>vapor</sub>; é a média mensal da produção de vapor da caldeira de leito fluidizado (t/mês)

C<sub>biomassa</sub>; a média mensal do consumo de biomassa na caldeira de leito fluidizado (t/mês)

A energia elétrica obtida (co-geração) pela empresa com o vapor gerado utilizando-se as cascas e resíduos descartados como combustível foi calculado com aplicação da Equação (16).

$$E_{\text{elétrica}} = \frac{V}{I_{\text{elétrica}}} \quad (16)$$

onde:

E<sub>elétrica</sub>; é a energia elétrica gerada com a queima das cascas e resíduos florestais descartados (MWh)

I<sub>elétrica</sub>; o índice de consumo de vapor para produção de energia elétrica nos turbo geradores 1 e 2 ( $t_{\text{(vapor)}} / \text{MWh}_{\text{(gerado)}}$ )

O índice de consumo de vapor para produção de energia elétrica foi obtido com auxílio dos dados referentes ao consumo de vapor e produção de energia

elétrica (co-geração) dos turbo geradores 1 e 2 durante o período de Abril de 2011 a Abril de 2012.

O índice de consumo de vapor para produção de energia elétrica foi obtido com aplicação da Equação (17).

$$I_{elétrica} = \frac{C_{vapor}}{E_{elétrica}} \quad (17)$$

onde:

$C_{vapor}$ ; é a média mensal do consumo de vapor utilizado na co-geração de energia elétrica da empresa (t/mês)

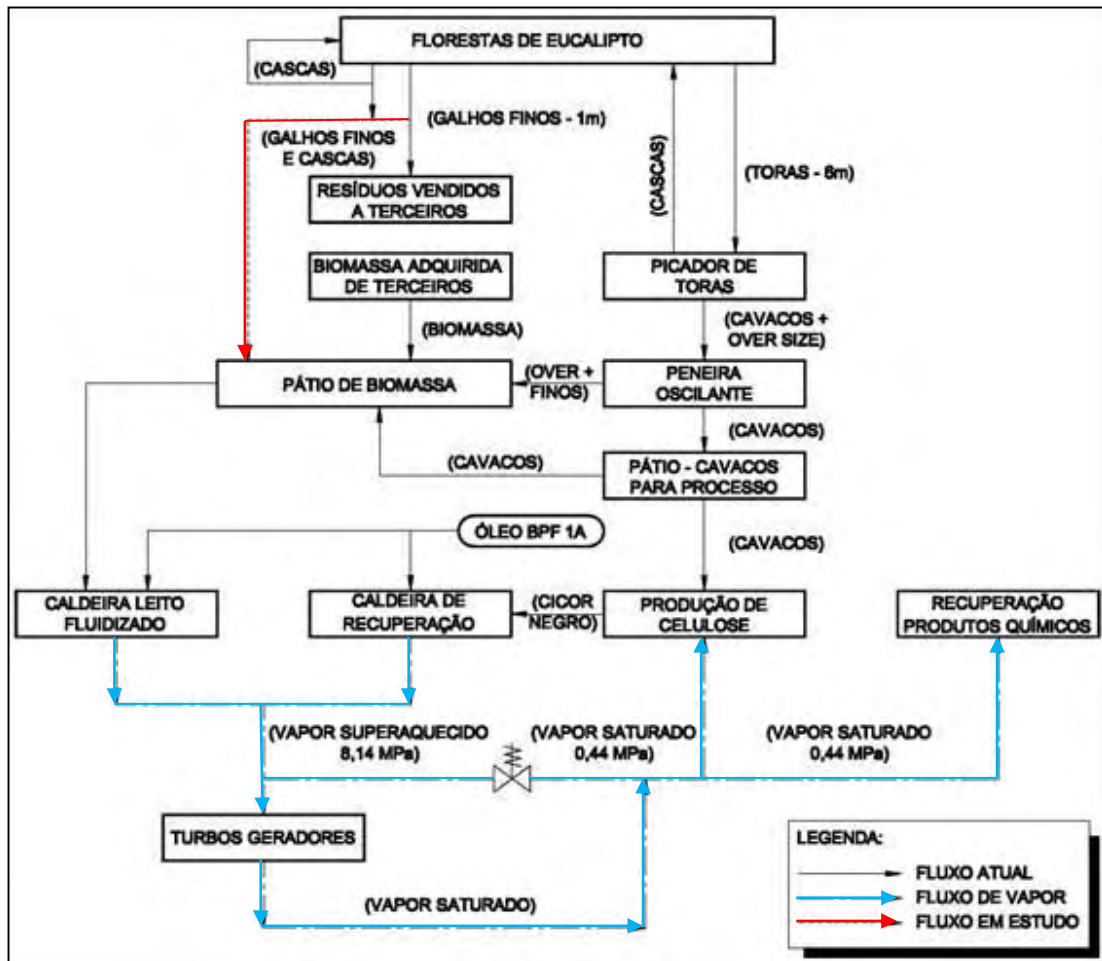
$E_{elétrica}$ ; a média mensal da produção de energia elétrica gerada nos turbo geradores 1 e 2 (MWh/ mês)

A receita obtida pela empresa com a venda dos resíduos florestais a terceiros foi obtida multiplicando o preço de venda praticado pelo volume de resíduos (metros cúbicos estéreos) vendidos.

Para o cálculo da receita bruta equivalente a redução da quantidade de biomassa adquirida de terceiros com a utilização das cascas e resíduos (descartados) para geração de vapor na caldeira de leito fluidizado, foi utilizado o custo médio mensal da biomassa adquirida de terceiros durante os meses de janeiro a outubro de 2011.

### **3.10. Fluxograma do processo de preparação e utilização da madeira**

A Figura 30 ilustra o fluxograma do processo de preparação e utilização da madeira, identificando os pontos no processo onde ocorre o descarte dos resíduos florestais (galhos das copas das árvores) que atualmente são vendidos a terceiros, as cascas que permanecem nas florestas, a biomassa florestal (desintegrada) adquirida de terceiros, e os locais onde são gerados e distribuídos o vapor superaquecido e saturado.



**Figura 30.** Fluxograma do processo de preparação e utilização da madeira, do destino das cascas / resíduos florestais e fluxo de geração de vapor e energia elétrica.

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1. Cálculo do aproveitamento das cascas como combustível para geração de energia elétrica e térmica da unidade industrial**

“

#### **4.1.1. Geração média de cascas a serem retiradas das florestas**

Com base nos dados apresentados no Item 3.5.1, no APÊNDICE, e na Tabela 9, foi determinada a geração média anual de cascas de *Eucalyptus* úmidas com aplicação das Equações (1), (2) e (3).

Na Tabela 9 podem ser observados a média do consumo mensal de madeira sem cascas pelo processo de fabricação de celulose da empresa em pesquisa durante o período de 1 ano.

**Tabela 9.** Consumo mensal de madeira sem casca da unidade fabril, segundo Lwarcel Celulose (2012).

<b>Mês</b>	<b>Consumo Mensal (t/mês)</b>
abr-11	59845
mai-11	60228
jul-11	61479
ago-11	55350
set-11	48641
out-11	57487
nov-11	51177
dez-11	56222
jan-12	54655
fev-12	51562
mar-12	58945
abr-12	55189
<b>Média</b>	<b>55898±3971</b>

Consumo médio anual = 652330,00 t/ano. (11,67 meses/ano).

O índice de casca contida na madeira foi obtido com a aplicação da Equação (1) e os resultados obtidos do levantamento de 72 amostras madeira com e sem casca em APÊNDICE, sendo:

$M_{\text{casca}}$ ; a média da massa de casca contida nas amostras = 98,41 g;

$M_{\text{usc}}$ ; a média da massa de madeira sem casca contida nas amostras = 661,7 g.

$$I_{\text{casca}} = \frac{98,41}{661,7}$$

$$I_{\text{casca}} = 0,1487 \text{ (casca úmida)}$$

O resultado obtido no cálculo do índice de cascas de 14,87 % de cascas úmidas em relação a massa de madeira sem cascas esta de acordo com os resultados obtidos pelos estudos do Setor de Química e Energia da ESALQ (1983) que apresentou

variação de 10,62% a 40,40% no teor de cascas de várias espécies de *Eucalyptus*, conforme apresentado na Tabela 10.

**Tabela 10.** Teor de cascas de espécies de *Eucalyptus*, segundo SCQE – Setor de Química, Celulose e Energia – ESALQ – USP (1983).

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

Com os resultados obtidos dos relatórios de controle de produção da empresa (Tabela 9), referente a massa de madeira sem cascas que foi consumida pelo processo de produção de celulose durante o período de Abril de 2011 a Abril de 2012, e aplicação da Equação (2), foi determinado a quantidade total de cascas que atualmente permanecem nas florestas.

$$M_{\text{casca}} = C_{\text{madeira}} \cdot I_{\text{casca}}$$

$C_{\text{madeira}}$ , é a média anual da massa de madeira sem cascas consumida pelo processo de produção = 652330,00 t/ano

$$M_{\text{casca}} = 652330,00 \cdot 0,1487$$

$$M_{\text{casca}} = 97000,00 \text{ t/ano.}$$



A determinação da massa úmida das cascas a serem retiradas das florestas, para geração da energia térmica e elétrica foi calculada de acordo com orientação da empresa Areva koblitz (70% do total de cascas geradas), e aplicação da Equação (3):

$$M_{\text{casca}} = M_{\text{casca}} \cdot 0,7$$

$$M_{\text{casca}} = 97000,00 \cdot 0,7$$

$$M_{\text{casca}} = 67900,00 \text{ t/ano}$$

$$= 5818,34 \text{ t/mês}$$

$$= 8,08 \text{ t/h. (em massa úmida).}$$

#### 4.1.2. Teor de umidade com base em massa úmida das cascas

O teor de umidade das cascas foi obtido com aplicação das Equações (7) para determinação da massa de água e Equação (8) para determinação do teor de umidade com base em massa úmida das amostras. A Tabela 11 apresenta os resultados do teor de umidade das amostras de cascas com a utilização de 10 amostras. As médias obtidas foram:

$$M_{uc}; \text{ é média da massa úmida das amostras de cascas} = 77,25 \text{ g} \quad (\text{Tabela 11})$$

$$M_0; \text{ média da massa seca das amostras de cascas} = 61,64 \text{ g} \quad (\text{Tabela 11})$$

A média aritmética da massa de água das amostras de cascas foi calculada com aplicação da Equação (7), sendo:

$$M_{H_2O} = M_{uc} - M_0$$

$$M_{H_2O} = 77,25 - 61,64$$

$$M_{H_2O} = 15,61 \text{ g.}$$

A média aritmética do teor de umidade (u) das amostras das cascas com aplicação da Equação (8), resultou:

$$u = \frac{M_{H_2O}}{M_{uc}} \cdot 100$$

$$u = \frac{15,61}{77,25} \cdot 100$$

$u = 20,21 \%$ .

O desvio padrão (s) do teor de umidade a base úmida das amostras de cascas apresentou o valor de 1,52 %, portanto seu teor de umidade apresentou variação de:  $u = 20,21 \pm 1,52 \%$ . Pera (1990) encontrou o valor do teor de umidade para cascas de *Eucalyptus* de aproximadamente 30,0 %. O valor do teor de umidade depende do tempo de permanência em que as cascas ficam estocadas nas florestas ou em pátios de estocagem antes de seu processamento para geração da energia. O resultado encontrado para o teor de umidade das amostras de cascas pode estar diferentes do valor calculado por Pera (1990) devido a diferente tempo de estocagem das cascas.

**Tabela 11.** Massa úmida de casca ( $M_{uc}$ ), massa seca ( $M_{0c}$ ), massa de água ( $M_{H_2O}$ ) e teor de umidade com base em massa úmida ( $u$ ) de cascas de *Eucalyptus spp.*

Amostra	$M_{uc}$ (g)	$M_{0c}$ (g)	$M_{H_2O}$ (g)	$u$ (%)
1	89,33	71,85	17,48	19,57
2	85,50	67,28	18,22	21,31
3	67,49	55,25	12,24	18,14
4	78,31	63,78	14,53	18,55
5	68,82	55,11	13,71	19,92
6	77,28	60,21	17,07	22,09
7	82,77	65,78	16,99	20,53
8	92,04	73,38	18,66	20,27
9	71,35	55,07	16,28	22,82
10	59,61	48,34	11,27	18,91
<b>Média</b>	<b>77,25±10,42</b>	<b>61,61±8,17</b>	<b>15,61±2,56</b>	<b>20,21±1,52</b>

#### 4.1.3. Poder calorífico das cascas

O poder calorífico das 18 amostras de cascas foi obtido com aplicação das equações: poder calorífico superior (PCS), Equação (10), poder calorífico inferior (PCI), Equação (11) e poder calorífico líquido (PCLu), Equação (12) e média do teor de umidade com base em massa úmida das cascas de 20,21 %.

A Tabela 12 apresenta os resultados das análises do poder calorífico superior (PCS), do poder calorífico inferior (PCI) e poder calorífico líquido (PCLu) das amostras de cascas. As médias aritméticas e desvios obtidos foram:

Fator de conversão da unidade: 1 kcal = 0,004184 MJ

PCS; é a média do poder calorífico superior = 4514 kcal/kg (18,88 MJ/kg)

$$PCI = PCS - 324$$

$$PCI = 4514 - 324 = 4190 \text{ Kcal/kg (17,53 MJ/kg)}$$

$$PCLu = PCI \cdot \left( \frac{100 - u}{100} \right) - 6 \cdot u$$

$$PCLu = 4190 \cdot \left( \frac{100 - 20,21}{100} \right) - 6 \cdot 20,21$$

$$PCLu = 3222 \text{ kcal/kg. (13,48 MJ/kg)}$$

Os valores mínimos obtidos (considerando o desvio padrão) do Poder Calorífico Superior, PCS= 4405 kcal/kg e Poder Calorífico Inferior, PCI= 4081 kcal/kg das amostras de cascas apresentaram resultados de aproximadamente 20,0 % superiores aos valores relatados por Pereira Junior (2001), ou seja: PCS= 3657 kcal/kg, PCI= 3418 kcal/kg. Pereira Junior (2001) elaborou análise de uma amostra de cascas de *Eucalyptus grandis* e neste trabalho foram analisadas 18 amostras que motivou as diferenças nos resultados discutidos.

#### **4.1.4. Quantidade de vapor que pode ser produzido com a queima das cascas na caldeira de leito fluidizado**

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

Pressão do vapor na saída da caldeira= 8,14 MPa (83 kgf/cm<sup>2</sup>)

Temperatura do vapor na saída da caldeira= 475 ° C

Entalpia do vapor na saída da caldeira= 975,5 kcal/kg

Temperatura da água de alimentação da caldeira: 120,0 ° C

Entalpia da água de alimentação: 120,28 kcal/kg

Com aplicação da Equação (13) foi determinada a quantidade de vapor que pode ser produzido com a queima das cascas na caldeira de leito fluidizado, sendo:

$$V = \frac{M_{\text{casca}} \cdot 1000 \cdot \mu \cdot \text{PCLu}}{\Delta h}$$

onde:

$M_{\text{casca}} = 8,08 \text{ t/h}$  (cascas úmidas) (item 4.1.1.)

$\mu = 0,78$  (rendimento da caldeira = 78 %)

$\text{PCLu} = 3222 \text{ kcal/kg}$  (item 4.1.3.)

$\Delta h = 975,5 - 120,28 = 855,22 \text{ kcal/kg}$

Portanto:

$$V = \frac{8,08 \cdot 1000,00 \cdot 0,78 \cdot 3222}{855,22}$$

$V = 23744 \text{ kg/h} = 23,74 \text{ t/h}$  (vapor superaquecido a 8,14 MPa)

**Tabela 12.** Poder calorífico superior (PCS), poder calorífico inferior (PCI) e poder calorífico líquido (PCLu) das amostras de cascas de *Eucalyptus spp* para teor de umidade com base em massa úmida de 20,21%.

Amostras de Cascas	PCS		PCI		PCLu	
	(MJ/kg)	(kcal/kg)	(MJ/kg)	(kcal/kg)	(MJ/kg)	(kcal/kg)
1	18,90	<b>4517</b>	17,55	<b>4193</b>	13,49	<b>3225</b>
2	19,00	<b>4542</b>	17,65	<b>4218</b>	13,57	<b>3244</b>
3	18,55	<b>4433</b>	17,19	<b>4109</b>	13,21	<b>3157</b>
4	18,76	<b>4484</b>	17,40	<b>4160</b>	13,38	<b>3198</b>
5	18,74	<b>4480</b>	17,39	<b>4156</b>	13,37	<b>3195</b>
6	18,57	<b>4438</b>	17,21	<b>4114</b>	13,23	<b>3161</b>
7	18,52	<b>4427</b>	17,17	<b>4103</b>	13,19	<b>3152</b>
8	18,56	<b>4435</b>	17,20	<b>4111</b>	13,22	<b>3159</b>
9	18,97	<b>4533</b>	17,61	<b>4209</b>	13,55	<b>3237</b>
10	18,76	<b>4484</b>	17,40	<b>4160</b>	13,38	<b>3198</b>
11	19,87	<b>4750</b>	18,52	<b>4426</b>	14,27	<b>3410</b>
12	19,80	<b>4731</b>	18,44	<b>4407</b>	14,21	<b>3395</b>
13	19,69	<b>4707</b>	18,34	<b>4383</b>	14,12	<b>3376</b>
14	18,49	<b>4420</b>	17,14	<b>4096</b>	13,17	<b>3147</b>
15	18,49	<b>4419</b>	17,13	<b>4095</b>	13,16	<b>3146</b>
16	19,06	<b>4555</b>	17,70	<b>4231</b>	13,62	<b>3254</b>
17	18,54	<b>4431</b>	17,18	<b>4107</b>	13,20	<b>3156</b>
18	18,66	<b>4460</b>	17,30	<b>4136</b>	13,30	<b>3179</b>
<b>Média</b>	18,88±0,45	<b>4514±108</b>	17,53±0,45	<b>4190±108</b>	13,48±0,36	<b>3222±86</b>

#### 4.1.5. Massa de biomassa adquirida de terceiros que se pode economizar com a queima das cascas na caldeira de leito fluidizado

Com aplicação da Equação (15) e auxílio da Tabela 13, foi calculado o índice de consumo de biomassa na caldeira de leito fluidizado.

$$I_{\text{consumo}} = \frac{P_{\text{vapor}}}{C_{\text{biomassa}}}$$

$P_{\text{vapor}}$ ; é a média de produção de vapor= 46699 t/mês (Tabela 13)

$C_{\text{biomassa}}$ ; a média do consumo de biomassa= 16879 t/mês..... (Tabela 13)

$$I_{\text{consumo}} = \frac{46699}{16879}$$

$$I_{\text{consumo}} = 2,77 \text{ t(vapor) / t (biomassa)}$$

**Tabela 13.** Produção de vapor ( $P_{\text{vapor}}$ ), consumo de biomassa ( $C_{\text{biomassa}}$ ) e índice de consumo de biomassa ( $I_{\text{consumo}}$ ) da caldeira de leito fluidizado, segundo Lwarcel Celulose (2012).

Período	Produção de Vapor ( $P_{\text{vapor}}$ )	Biomassa da Peneira Oscilante	Biomassa de Terceiros	Total de Biomassa ( $C_{\text{biomassa}}$ )	Índice de consumo ( $I_{\text{consumo}}$ )
(mês)	(t/mês)	(t/mês)	(t/mês)	(t/mês)	( $t_{\text{vapor}}/t_{\text{biomassa}}$ )
abr-11	49013	836	17983	18819	2,60
mai-11	48975	957	19810	20767	2,36
jul-11	46896	861	13960	14821	3,16
ago-11	47484	913	15619	16532	2,87
set-11	45507	1.290	13773	15063	3,02
out-11	44926	889	14733	15622	2,88
nov-11	44508	776	15019	15795	2,82
dez-11	44728	939	16206	17145	2,61
jan-12	44333	794	15664	16458	2,69
fev-12	42718	682	15141	15823	2,70
mar-12	46712	743	16043	16786	2,78
abr-12	54591	740	18182	18922	2,89
<b>Média</b>	<b>46699±3136</b>	<b>868±158</b>	<b>16011±1807</b>	<b>16879±1780</b>	<b>2,77±0,21</b>

A equivalência em biomassa adquirida de terceiros, obtida com a queima das cascas foi calculada aplicando-se a Equação (14).

$$M_{\text{biomassa}} = \frac{V}{I_{\text{consumo}}}$$

$V$ ; é a quantidade de vapor produzido = 23,74 t/h; (item 4.1.4.)

$$M_{\text{biomassa}} = \frac{23,74}{2,77}$$

$$M_{\text{biomassa}} = 8,57 \text{ t/h.}$$

## 4.2. Cálculo do aproveitamento dos resíduos florestais vendidos a terceiros como combustível para geração de energia elétrica e térmica da unidade industrial

### 4.2.1. Geração média de resíduos florestais vendidos a terceiros

Com base nos dados apresentados no Item 3.5.2, na Tabela 14 e informações quantitativas sobre a geração de resíduos, foi determinado a geração média anual de resíduos nas colheitas mecanizada e semi-mecanizada com aplicação das Equações (4),(5) e (6).

Na Tabela 14 podem ser observados a área florestal e tipos de colheitas de *Eucalyptus* que foram praticadas pela empresa durante os anos 2009, 2010 e 2011.

**Tabela 14.** Área florestal da colheita mecanizada (Am), da colheita semi-mecanizada (As) praticada pela empresa, segundo Lwarcel Celulose (2012).

Ano	Total (ha/ano)	Mecanizada (Am) (ha/ano)	Semi-mecanizada (As) (ha/ano)
2009	3471,95	2833,55	638,40
2010	3694,94	3115,50	579,44
2011	3585,85	3071,57	514,28
<b>Média</b>	<b>3584,25±115,5</b>	<b>3006,87±151,7</b>	<b>577,38±62,09</b>

Os índices de geração de resíduos florestais (metros cúbicos estéreos), informados pela empresa foram:

Colheita mecanizada; Im= 8,00 (m³st/ha)

Colheita semi-mecanizada; Is= 4,00 (m³st/ha)

O volume de resíduos calculados apresentaram os seguintes valores:

#### a. Volume de resíduos da colheita mecanizada.

Com aplicação da Equação (4), teremos o volume dos resíduos gerados na colheita mecanizada:

$$V_{\text{resíduo}} = Im \cdot Am$$

$I_m$ ; é o índice de geração dos resíduos = 8,00 ( $m^3st/ha$ )

$A_m$ ; a área florestal da colheita mecanizada = 3006,87 ( $ha/ano$ ). (Tabela 14)

$$V_{\text{resíduo}} = 8,00 \cdot 3006,87$$

$$V_{\text{resíduo}} = 24055 \text{ m}^3st/ano.$$

#### **b. Volume de resíduos da colheita semi-mecanizada.**

Com aplicação da Equação (5), teremos o volume de resíduos gerados na colheita semi-mecanizada:

$$V_{\text{resíduo}} = I_s \cdot A_s$$

$I_s$ ; é o índice de geração de resíduo = 4,0 ( $m^3st/ha$ )

$A_s$ ; a área florestal da colheita semi-mecanizada = 577,38 ( $ha/ano$ ) (Tabela 14)

$$V_{\text{resíduo}} = 4,0 \cdot 577,38$$

$$V_{\text{resíduo}} = 2310 \text{ m}^3st/ano$$

#### **c. Volume total de resíduos (colheita mecanizada + colheita semi-mecanizada).**

$$V_{\text{resíduo}} = 24055 + 2310$$

$$V_{\text{resíduo}} = 26365 \text{ m}^3st/ano.$$

Convertendo-se o volume dos resíduos de  $m^3st$  (metro cúbico stereo de madeira empilhada) para  $m^3$  (metro cúbico de madeira sólida), com aplicação do fator de conversão informado pela empresa, ou seja,  $1 \text{ m}^3 = 1,5 \text{ m}^3st$ , teremos:

$$V_{\text{resíduo}} = \frac{26365}{1,5}$$

$$V_{\text{resíduo}} = 17577 \text{ m}^3/ano. \quad (\text{madeira sólida})$$

A média da densidade do lenho da madeira obtida de 72 amostras (APÊNDICE) apresentou o valor de:  $1,081 \text{ g/cm}^3 = 1081,00 \text{ kg/m}^3$ .

A massa total de resíduos foi obtida com aplicação da Equação (6), sendo:

$$M_{\text{resíduo}} = \left( \frac{\rho_{\text{resíduo}} \cdot V_{\text{resíduo}}}{1000} \right)$$

$\rho_{\text{resíduo}}$ ; é a densidade dos resíduos úmidos = 1081,00 kg/m<sup>3</sup>

$V_{\text{resíduo}}$ ; o volume total de resíduos = 17577 m<sup>3</sup>/ano (madeira sólida)

$$M_{\text{resíduo}} = \left( \frac{1081 \cdot 17577}{1000} \right)$$

$M_{\text{resíduo}} = 19000 \text{ t/ano}$

Para regime operacional da empresa de 11,67 meses/ano, 30 dias/mês e 24 h/dia, teremos:

$M_{\text{resíduo}} = 2,26 \text{ t/h.}$  (madeira úmida)

#### 4.2.2. Teor de umidade com base em massa úmida dos resíduos

O teor de umidade dos resíduos foi obtido com aplicação da Equação (7) para determinação da massa de água e Equação (8) para determinação da umidade com base em úmida das amostras. O APÊNDICE apresenta os resultados das análises de 72 amostras do lenho de *Eucalyptus*, as médias obtidas foram:

$M_{\text{ucc}}$ ; média da massa úmida das amostras = 760,11 g

$M_{\text{H}_2\text{O}}$ ; média da massa de água das amostras = 368,12 g

A média do teor de umidade com base em massa úmida das amostras foi calculada com aplicação da Equação (8), sendo:

$$u = \frac{M_{\text{H}_2\text{O}}}{M_{\text{ucc}}} \cdot 100$$

$$u = \frac{368,12}{760,11} \cdot 100$$

$u = 48,43 \text{ \%}$ .

O desvio padrão (s) do teor de umidade com base em massa úmida das amostras de resíduos apresentou o valor de 1,94 %, portanto seu teor de umidade apresentou uma variação de:  $u = 48,43 \pm 1,94 \text{ \%}$ . Pereira Junior (2001) encontrou o valor do teor de umidade para cavacos de *Eucalyptus grandis* de aproximadamente 44,0 %. O valor



do teor de umidade depende do tempo de permanência em que os resíduos ou cavacos de madeira ficam estocados nas florestas ou em pátios de intermediários antes de seu processamento para geração da energia. A diferença apresentada entre os valores discutidos deve-se ao tempo de estocagem dos resíduos em análise e o tempo de estocagem dos cavacos de *Eucalyptus*.

#### 4.2.3. Poder calorífico dos resíduos

De maneira similar a determinação para as cascas, o poder calorífico das 18 amostras dos resíduos também foi obtido com aplicação das equações: poder calorífico superior (PCS), Equação (10); poder calorífico inferior (PCI), Equação (11) e poder calorífico líquido (PCLu), Equação (12) e a média do teor de umidade com base em massa úmida das amostras dos resíduos que apresentou o valor de 48,43 %.

A Tabela 15 apresenta os resultados das análises do poder calorífico superior (PCS), do poder calorífico inferior (PCI) e poder calorífico líquido (PCLu) das amostras dos resíduos. As médias obtidas foram:

Fator de conversão da unidade: 1 kcal = 0,004184 MJ

PCS = 4813 kcal/kg (20,14 MJ/kg)

PCI = PCS – 324

PCI = 4813 – 324 = 4489 Kcal/kg (18,78 MJ/kg)

$$PCLu = PCI \cdot \left( \frac{100 - u}{100} \right) - 6 \cdot u$$

$$PCLu = 4489 \cdot \left( \frac{100 - 48,43}{100} \right) - 6 \cdot 48,43$$

PCLu = 2025 kcal/kg (8,47 MJ/kg)

O valor médio obtido do poder calorífico líquido (PCLu) das amostras de resíduos, PCLu=2025 kcal/kg para teor de umidade com base em massa úmida de 48,43% apresentaram resultados de aproximadamente 0,34 % inferior ao valor relatado por Pereira Junior (2001), ou seja: PCLu= 2031,5 kcal/kg para teor de umidade de 40 % da madeira. Pereira Junior (2001) elaborou análise de uma amostra de cavacos de *Eucalyptus*

*grandis*. Portanto o resultado do poder calorífico líquido das amostras de resíduos está de acordo com os resultados obtidos por (PEREIRA JUNIOR, 2001).

**Tabela 15.** Poder calorífico superior (PCS), poder calorífico inferior (PCI) e poder calorífico líquido (PCLu) das amostras de resíduos de *Eucalyptus spp* para teor de umidade com base em massa úmida de 48,43 %.

Amostras de Resíduos	PCS		PCI		PCLu	
	(MJ/kg)	(kcal/kg)	(MJ/kg)	(kcal/kg)	(MJ/kg)	(kcal/kg)
1	20,04	<b>4790</b>	18,69	<b>4466</b>	8,42	<b>2013</b>
2	20,21	<b>4831</b>	18,86	<b>4507</b>	8,51	<b>2034</b>
3	20,44	<b>4886</b>	19,09	<b>4562</b>	8,63	<b>2062</b>
4	20,37	<b>4869</b>	19,02	<b>4545</b>	8,59	<b>2053</b>
5	19,97	<b>4773</b>	18,61	<b>4449</b>	8,38	<b>2004</b>
6	20,00	<b>4779</b>	18,64	<b>4455</b>	8,40	<b>2007</b>
7	20,21	<b>4830</b>	18,85	<b>4506</b>	8,51	<b>2033</b>
8	20,21	<b>4830</b>	18,85	<b>4506</b>	8,51	<b>2033</b>
9	20,01	<b>4782</b>	18,65	<b>4458</b>	8,40	<b>2009</b>
10	19,92	<b>4760</b>	18,56	<b>4436</b>	8,36	<b>1997</b>
11	20,35	<b>4864</b>	18,99	<b>4540</b>	8,58	<b>2051</b>
12	20,55	<b>4911</b>	19,19	<b>4587</b>	8,68	<b>2075</b>
13	19,91	<b>4758</b>	18,55	<b>4434</b>	8,35	<b>1996</b>
14	20,12	<b>4808</b>	18,76	<b>4484</b>	8,46	<b>2022</b>
15	19,94	<b>4765</b>	18,58	<b>4441</b>	8,37	<b>2000</b>
16	20,44	<b>4885</b>	19,08	<b>4561</b>	8,63	<b>2062</b>
17	19,77	<b>4725</b>	18,42	<b>4401</b>	8,28	<b>1979</b>
18	20,06	<b>4794</b>	18,70	<b>4470</b>	8,43	<b>2015</b>
<b>Média</b>	20,14±0,22	<b>4813±53</b>	18,78±0,22	<b>4489±53</b>	8,47±0,11	<b>2025±27</b>

#### 4.2.4. Quantidade de vapor que pode ser produzido com a queima dos resíduos

Nas condições operacionais da caldeira de leito fluidizado descritas no item 4.1.4., foi determinado a quantidade de vapor que pode ser obtido na caldeira de leito fluidizado com a queima dos resíduos florestais que atualmente são vendidos a terceiros.

Com aplicação da Equação (13) teremos a quantidade de vapor obtida com a queima dos resíduos, sendo:

$$V = \frac{M_{\text{resíduo}} \cdot 1000 \cdot \mu \cdot \text{PCLu}}{\Delta h}$$

onde:

$$M_{\text{resíduo}} = 2,26 \text{ t/h (resíduos úmidos)} \quad (\text{item 4.2.1.})$$

$$\mu = 0,78 \quad (\text{rendimento da caldeira de leito fluidizado} = 78 \% )$$

$$PCLu = 2025 \text{ kcal/kg;} \quad (\text{item 4.2.3.})$$

$$\Delta h = 975,5 - 120,28 = 855,22 \text{ kcal/kg.}$$

Portanto:

$$V = \frac{2,26 \cdot 1000,00 \cdot 0,78 \cdot 2025}{855,22}$$

$$V = 4174 \text{ kg/h} = 4,17 \text{ t/h. (vapor superaquecido a 8,14 MPa)}$$

#### **4.2.5. Massa de biomassa adquirida de terceiros que se pode economizar com a queima dos resíduos na caldeira de leito fluidizado**

A equivalência em biomassa adquirida de terceiros, obtida com a queima dos resíduos foi calculada aplicando-se a Equação (14).

$$M_{\text{biomassa}} = \frac{V}{I_{\text{consumo}}}$$

onde:

$$V; \text{ é a quantidade de vapor produzido} = 4,17 \text{ t/h;} \quad (\text{item 4.2.4.})$$

$$I_{\text{consumo}} = \text{índice de consumo de biomassa} = 2,77 \text{ t(vapor)/t(biomassa).} \quad (\text{item 4.1.5.})$$

$$M_{\text{biomassa}} = \frac{4,17}{2,77}$$

$$M_{\text{biomassa}} = 1,51 \text{ t/h.}$$

#### **4.3. Cálculo da energia elétrica que pode ser obtida com o aproveitamento das cascas e resíduos descartados pela empresa.**

Com aplicação da Equação (17) e auxílio da Tabela 16, foi determinado o índice de geração própria de energia elétrica (co-geração) nos turbo geradores 1 e 2 atualmente instalados na empresa.

$$I_{elétrica} = \frac{C_{vapor}}{E_{elétrica}}$$

onde:

$C_{vapor}$ ; é a média mensal de consumo de vapor (Tabela 16):

turbo gerador 1 = 86429 t/mês

turbo gerador 2 = 49834 t/mês

$C_{vapor} = 86429 + 49834 = 136263$  t/mês

$E_{elétrica}$ ; é a média mensal da produção de energia elétrica (Tabela 16):

turbo gerador 1 = 11187 MWh/mês

turbo gerador 2 = 5287 MWh/mês

$E_{elétrica} = 11187 + 5287 = 16474$  MWh/mês.

$$I_{elétrica} = \frac{136263}{16474}$$

$I_{elétrica} = 8,27$  t(vapor)/MWh

A equivalência em energia elétrica que pode ser obtida com a queima das cascas e dos resíduos florestais foi calculada aplicando-se a Equação (16).

$$E_{elétrica} = \frac{V}{I_{elétrica}}$$

onde:

$V$ ; é a quantidade de vapor produzido com a queima das cascas descartadas nas florestas e resíduos florestais vendidos a terceiros:

vapor produzido com a queima das cascas = 23,74 t/h (item 4.1.4.)

vapor produzido com a queima dos resíduos = 4,17 t/h (item 4.2.4.)

$V = 23,74 + 4,17 = 27,91$  t/h. (vapor superaquecido a 8,14 MPa)

$I_{elétrica}$ ; é o índice geração de energia elétrica = 8,27 t(vapor)/MWh

$$E_{elétrica} = \frac{27,91}{8,27}$$

$E_{elétrica} = 3,37$  MWh/h = 2426 MWh/mês.

**Tabela 16.** Consumo de vapor e geração de energia elétrica nos turbo geradores da empresa, segundo Lwarcel Celulose (2012).

Período	TURBO GERADOR 1		TURBO GERADOR 2	
	Consumo de Vapor	Energia Gerada	Consumo de Vapor	Energia Gerada
(mês)	(t/mês)	(MWh/mês)	(t/mês)	(MWh/mês)
abr-11	75848	9927	56559	6957
mai-11	82830	11025	50328	5306
jul-11	91185	11858	45628	4437
ago-11	89236	11587	46542	4571
set-11	87071	11110	45215	4446
out-11	89171	11472	47724	4727
nov-11	86608	11274	48164	4709
dez-11	86040	11146	48998	5053
jan-12	89319	11558	50208	4947
fev-12	84617	10799	47055	4733
mar-12	88791	11306	49693	5106
abr-12	86437	11178	61899	8455
<b>Média</b>	<b>86429±4053</b>	<b>11187±488</b>	<b>49834±4831</b>	<b>5287±1203</b>

#### 4.4. Determinação da receita atualmente obtida pela empresa com a venda dos resíduos florestais a terceiros.

A receita bruta atualmente obtida pela empresa com a venda dos resíduos florestais a terceiros foi calculada considerando sua geração nas florestas e os preços médios praticados pela empresa, sendo:

##### a. Resíduos gerados na colheita mecanizada

Valor de venda= R\$ 3,00/m<sup>3</sup>st (informado pela empresa)

Volume gerado= 24055 m<sup>3</sup>st/ano; (item 4.2.1.)

Receita= 3,00 x 24055 = R\$ 72165,00/ano.

##### b. Resíduos gerados na colheita semi-mecanizada

Valor de venda = R\$ 35,00/ m<sup>3</sup>st (informado pela empresa)

Volume gerado= 2310,00 m<sup>3</sup>st/ano; (item 4.2.1.)

Receita= 35,00 x 2310= R\$ 80850,00/ano.

**c. Receita total (colheita mecanizada + colheita semi-mecanizada)**

Receita total = 72165,00 + 80850,00 = R\$153015,00/ano.

**4.5. Determinação da receita bruta que pode ser obtida pela empresa com a queima das cascas e dos resíduos florestais na caldeira de leito fluidizado.**

A receita bruta que pode ser obtida com a utilização das cascas e resíduos que atualmente são descartados após a colheita da madeira, foi obtida determinando a massa de biomassa adquirida de terceiros que pode ser economizada com sua queima, receita obtida pela empresa com a venda de resíduos a terceiros e o custo unitário de biomassa adquirida de terceiros. A Tabela 17 apresenta o custo unitário da biomassa adquirida de terceiros durante o período de 10 meses durante o ano de 2012.

**a. Ganhos obtidos com biomassa florestal adquirida de terceiros**

queima das cascas (8,57 t/h) = 6170 t/mês; (item 4.1.5.)

queima dos resíduos (1,51 t/h) = 1087 t/mês; (item 4.2.5.)

queima das cascas e resíduos = 6170 + 1087 = 7257 t/mês

Para regime operacional da fábrica de 11,67 meses/ano, teremos:  
ganho total obtido com biomassa = 7257 x 11,67 = 84689 t/ano

**b. Custo unitário médio da biomassa florestal adquirida de terceiros**

média do custo unitário da biomassa = R\$ 109,12/t (Tabela 17)

**c. Receita bruta atualmente obtida com a venda dos resíduos a terceiros**

receita obtida = R\$ 153015,00/ano. (item 4.4.)

**d. Receita bruta a ser obtida com a queima das cascas e resíduos florestal**

receita bruta = (84689,00 x 109,12) – 153015,00

receita bruta = R\$ 9,09 x 10<sup>6</sup> / ano (nove milhões e noventa mil reais por ano)

**Tabela 17.** Custo unitário da biomassa adquirida de terceiros utilizada como combustível na caldeira de leito fluidizado, segundo Lwarcel Celulose (2012).

<b>Período</b>	<b>Custo da biomassa (R\$/t)</b>
Jan.	106,30
Fev.	107,40
Mar.	107,60
Abr.	109,00
Mai.	109,20
Jun.	108,70
Jul.	111,10
Ago.	110,30
Set.	110,90
Out.	110,70
<b>Média</b>	<b>109,12±1,65</b>

## 5. CONCLUSÃO

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

Nas condições operacionais estudadas a casca é um combustível mais atrativo que o resíduo.

O vapor obtenível com a queima das cascas e resíduos florestais representa 43,03 % da produção de vapor da caldeira de leito fluidizado.

A utilização das cascas e resíduos florestais como combustível, que atualmente são descartados pela empresa representa uma economia de 45,33% no consumo atual com biomassa adquirida de terceiros.

A receita bruta a ser obtida pela empresa com a queima das cascas e resíduos florestais representa uma economia de 44,57% do custo atual praticado com biomassa adquirida de terceiros.

A média em energia elétrica a ser gerada pelos turbo geradores 1 e 2 com a queima das cascas e resíduos florestais descartados pela empresa representa 14,73% do total de energia elétrica atualmente gerada.

A viabilidade econômica do projeto para a empresa em pesquisa ou para outras empresas que eventualmente apresente interesse pelo projeto vai depender:

a. do sistema de extração e preparação de cavacos a ser adotado (nas margens de estradas, em pátios intermediários, na indústria, na floresta ou enfardamento);

b. da distância a ser percorrida pelo transporte das cascas e resíduos florestais entre a floresta e a planta de energia;



c. do ganho obtido com a redução de custo atual em combustível (biomassa) em relação aos custos em equipamentos e instalações, custos operacionais do projeto e custos de depreciação.

## 6 REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA-ANEEL. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. Brasília: ANEEL, 2002. p. 153.

ALAKANGAS, E.; SAURANEN, T.; VESISENAHU, T. **Production techniques of logging residue chips in Finland**. Jyväskylä, Finland: VTT, 1999. 84p. (Training manual ENE39/T0039/99).

ÁLVARES, C. A. Geotecnologia aplicada à silvicultura de precisão e aos modelos ecofisiológicos. **Revista Opinião**, Ribeirão Preto, SP, P. 46, mar.-mai. 2011.

ALZETE, S. B. A.; TOMAZELLO FILHO, M.; PIEDADE, S. M. S. Longitudinal variation of the wood basic density of *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden, *E. saligna* Sm. and *E. grandis* x *urophylla* clones. **Sci. for.**, Piracicaba, n. 68, p. 87-95, 2005.

ANDIS, L.; HENRIK, V.H.; LAZDINA, D.; VALENTINS, L. Productivity and cost of stump harvesting for bioenergy production in Latrian conditions. **Engineering for rural development**, n. 28, 2009. p. 194-201.

ANDRITZ, Redução dos custos de energia na indústria de papel e celulose. in: 10º. CONGRESSO ABAUL DA ABCP. 1997. São Paulo. **Anais...** 1997.

ARONI, A. S. **Avaliação comparativa de biomassa híbrido *Pinus tecunumanni* x *Pinus caribea* var. *hondurensis* com espécie pura do *Pinus caribea* var. *hondurensis***. 2005. 148f. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL (BRACELPA). **Relatório de sustentabilidade 2009**. São Paulo. Disponível em: <<http://www.bracelpa.org.br/bra2/sites/default/files/public/relsustenta/arquivos/relatorio2009.pdf>>. Acesso em 19 abr. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8693**, 1997. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS – ABRAF. **Anuário estatístico da Abraf 2011 ano base 2010**. Brasília, 2011. Disponível em: <<http://www.abraflor.org.br/estatisticas/ABRAF10/7>>. Acesso em: 17 mar. 2012.

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS – ABRAF. **Anuário estatístico da Abraf 2012 ano base 2011**. Brasília, 2012. Disponível em: < <http://www.abraflor.org.br/estatisticas/ABRAF11-BR.pdf>>. Acesso em: 08 maio 2012.

ASSUMPÇÃO, R. M. V.; PINHO, M. R. R. CAHEN, R.; PHILIPP, P. Caldeira de recuperação. In: **IPT/Escola Senai Theobaldo de Negrís**. Celulose e Papel: Tecnologia de fabricação de partes celulósica. São Paulo: IPT, vol.1, 1988. 559p.

BARRICHELLO, L. E. G.; BRITO, J. O; MIGLIORINI, A. J. Estudos da variação da densidade básica em *Euclyptus spp*. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 4°. Belo Horizonte, 1982. **Anais...** São Paulo: SBS, 1983, p. 726-731.

BAUER, S. R. T. **Resíduos de exploração florestal de *Eucalyptus grandis* hill Ex Maiden para geração de energia elétrica**. Botucatu: UNESP, 2001. 54 f. Dissertação (Mestrado em agronomia) - Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.

BENDTSEN, B. Mechanical and anatomical properties in individual growth ring of plantation-grown eastern cottonwood and Loblolly Pine. **Wood and Fiber Science**, v. 18, n. 1, p. 21- 38, 1986.

BORBA, J. Em 2012 Brasil perdeu R\$ 500 mi em combustível. Folha de S. Paulo. São Paulo, 20 Set. 2012, B6, Mercado.

BRAND, M.A. **Qualidade da biomassa florestal para o uso na geração de energia em função da estocagem**. Curitiba: UFPr, 2007. 151 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

BRASIL, M. A. M.; VEIGA, R. A. A.; FERREIRA, M. Variação da densidade básica da madeira nas secções transversais do caule da base do tronco para copa de eucalipto. **IPFE**, Piracicaba (15): P. 73-82, dez. 1977.

BRIDGEWATER, A.V. Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass. **Chemical Enginnering Journal**, v.91, p.87-102, mar. 2003.

BRIDGEWATER, T. Biomassa for energy. **Journal of the science of food and agriculture**, v. 86, p. 1755 - 1768, 2006.

BRITO, J. O. Agricultura tropical: quatro décadas de inovação tecnológica, institucionais e políticas: Poder calorífico de madeira usadas em reflorestamento no Brasil. In: ALBUQUERQUE, A. C. S.; SILVA, A. G. (Ed.) **Agricultura tropical: quatro décadas de inovação tecnológicas, institucionais e políticas**. Brasília: Embrapa Informações Tecnológicas, 2008. v. 1, p. 748.

BRITO, J. O. O uso energético da madeira. **Estud. Av.**, São Paulo, v. 21, n. 59, Abr. 2007. Disponível em <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=SO103-40142007000100015&Ing=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=SO103-40142007000100015&Ing=en&nrm=iso)>. acesso em: 01 Dez. 2012.

BRITO, J. O.; Expressão da Produção Florestal em unidades energéticas. In: **Congresso Florestal Brasileiro**, 7º, Anais, Curitiba, SBS, Curitiba, 1993.

BRITO, J. O.; Madeira para a floresta: a verdadeira realidade do uso de recursos florestais. **Silvicultura**, v. 11, n. 41, 1986. p. 188-193.

CARBONERA, P. J. Produção de biomassa em um povoamento de *acácia mearnii* De Wild. no Estado do Rio Grande do Sul. **Rev. Árvore**, Viçosa, MG, v. 21, n. 4, p. 521-526, 1997.

CHRISTOPHERSON, N.; STOKES, B.; WISELOGEL, A.; WOODFIN, S.; ZERBE, J. Harvesting and handling fuelwood. In: FAZIO, J. R. (ed). **Trees For Fuelwood: a step toward energy diversity**. Nebraska City, NE, US: The Arbor Day Institute, 1993. 80p. cap.3, p.34-44.

COELHO, S. T. Biofuels - Advantages and Trade Barriers. In: **UNITED NATIONS CONFERENCE ON TRADE AND DEVELOPMENT**, 2005, Genebra. Disponível em: <[http://www.unctad.org/en/docs/ditcted20051\\_en.pdf](http://www.unctad.org/en/docs/ditcted20051_en.pdf)>. Acesso em 17 abr. 2011.

COELHO, S. T. **Mecanismo para implementação da co-geração de eletricidade a partir da biomassa. Um modelo para o Estado de São Paulo**. São Paulo: USP, 1999. 200f. Tese (Doutorado em energia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

CONTINENTAL BIOMASS INDUSTRIES - CBI. **Brush transport System**. 2008. Disponível em: < [http://www.cbi-inc.com/pdf/BTS\\_DS\\_DR11.pdf](http://www.cbi-inc.com/pdf/BTS_DS_DR11.pdf)> Acesso em: 19 set. 2012.

CORÁ, R.; **Aspectos Técnicos e ambientais do uso do carvão mineral em caldeiras**. 2006. 146f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2006.

CORRÊA NETO, V. **Análise de viabilidade da cogeração de energia elétrica em ciclo combinado com gaseificação de biomassa de cana-de-açúcar e gás natural**. Rio de Janeiro: UFRJ, 2001. 194f. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

COSTA, V. E. **Caracterização físico-energética da madeira: Um estudo aplicado à produtividade e qualidade de reflorestamentos de clones de híbridos de *Eucalyptus grandis***. 2006. 99 f. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2006.

COUTO, H. T.Z.; BRITO, J. O. **Inventário de resíduos florestais**. Piracicaba: Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais, 1980. v. 1, n. 2, p. A. 1.

COUTO, L.; MULLER, M. D. Florestas energéticas no Brasil. In: CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. S.; GÓMEZ. **Biomassa para energia**. São Paulo: UNICAMP, 2008. 736 p. Cap.4, p. 93-111.

CUCHET, E.; ROUX, P.; SPINELLI, R. Performance of a logging residue bundler in the temperate forests of France. **Biomass and Bioenergy**, v. 27, 2004. p. 31-39.

DO CANTO, J. L. **Colheita mecanizada de biomassa florestal para energia**. 2009. 121 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. MG. 2009.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. Ministério de Minas e Energia. Balanço energético nacional 2010: ano base 2009. Brasília, 271 p.

FELFILLI, J. M.; VALE, A. B.; PAULA NETO, F.; REZENDE, J. L. P. Avaliação dos resíduos de exploração em floresta no norte do Mato Grosso. **Rev. Árvore**, v. 8, n. 1, 1984. p. 70-83.

FOELKEL, C. E. B.; BRASIL, M. A. M.; BARRICHELO, L. E. G. Métodos de determinação da densidade básica de cavacos para coníferas e folhosas. **IPEF**, Piracicaba, n. 2-3, p. 65-74, 1971.

FOOD AGRICULTURE ORGANIZATION OF UNITED NATION - FAO. **Energy conservation in the mechanical forest industries**. Rome: FAO, 1990. 130p. (FAO Forest Paper, n. 93).

FOREST RESEARCH. **Stump Harvesting**: Interim Guidance on Site Selection and Good Practice. UK: The Research Agency of the Forestry Commission, 2009. 18 p.

FRANCA, R. 70 questões para entender o etanol. **Revista Veja**, ed. 2052, 19 mar. 2008. Disponível em <[http://veja.abril.com.br/190308/p\\_104.shtm](http://veja.abril.com.br/190308/p_104.shtm)> acesso em: 15 jul. 2012.

GOLDEMBERG, J. **Energia, meio ambiente & desenvolvimento**. São Paulo: Ed. USP, 1998. 125p.

GOLDEMBERG, J.; VILLANUEVA, L. D. **Energia, Meio Ambiente & Desenvolvimento**. São Paulo: Ed. USP, 2003. 226 p.

GOMES, S. I.; PARAÍSO, P. R.; ANDRADE, C. M. G. Análise preliminar de cultivos florestais para a geração de energia elétrica. **Espaç. Energ.**, v. 4, 2007, p. 1-10 Disponível em: <[http://www.stef.com.br/artigos/espaco\\_energia.pdf](http://www.stef.com.br/artigos/espaco_energia.pdf)>. Acesso em: 15 mar. 2012.

GONÇALVES, A. R.; BENAR, P.; SCHUCHARDT, U. Liquefação da biomassa. In: CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. S.; E. O. GOMES (Eds). **Biomassa para energia**. São Paulo: UNICAMP, 2008. 736 p. Cap.12, p. 419-434.

GRAF, A.; KOEHLER, T. **Oregon cellulose-ethanol study: an evaluation of the potential for ethanol production in Oregon using cellulose-based feedstocks**. Salem, OR, US: Oregon office of Energy and Bryan & Bryan, Inc, 2000. 96 p.

HAKKILA, P. **Developing technology for largescale production of forest chips**. Helsinki. Finland: Tekes, 2004. 99 p. (Wood Energy Technology Programme 1999-2003. Final Report 6/2004).

HAKKILA, P. **Forest chips as fuel for heating plants in Finland**. Folia Forestalia n° 586, 1984. pp. 1-62.

HAKKILA, P. **Mechanized harvesting of stump and roots**: A sub-project of the Nordic research programme for the utilization of logging residues. Helsinki, Finland: Fenniae, 1972. 69 p.

HAKKILA, P. **Utilization of residual forest biomass**. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1989. 568 p (Springer Seriesc in wood Science).

HAMELINCK, C. N.; HOOIJDONK, G.; FAALJ, A. Ethnol from lignocellulosic biomass: Technoeconomic performance in short, middle-and long-term. **Biomass and bioenergy**, v.28, 2005. p. 384-410.

HOWARD, J. O. **Wood for energy in the pacific northwest**: an overview. US forest service, general technical report 50-24, 1979, 59 p.

INCE, P. J. **Estimating effective heating value of wood or bark fuels at various moisture contents**. Madison, WI, US: USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, 1977. 9p. (Gen. Tech. Report FPL 13).

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA. **World Energy Investment Outlook 2003**. France: IEA, 2003. 530 p.

JACOVINE, L. A. G. **Gestão da qualidade na colheita de madeira em povoamento eqüiâneos**. Viçosa, 2000. 136 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2000.

JACOVINE, L. A. G.; MACHADO, C. C.; SOUZA, A. P.; LEITE, H. G. Avaliação da perda de madeira em cinco subsistemas de colheita florestal. **Rev. Árvore**, Viçosa, MG, v. 25, n. 4, p. 463-470, 2001.

KALLIO, M.; LEINONEN, A. **Production technology of forest chips in Finland**. Jyväskylä, Finalnd: VTT, 2005. 103 p. (Project Report PRO 2/P 2032/05).

KARCHESY, J.; KOCK, P. **Energy production from hardwoods growing in southern pine sites**. U.S. Forest Service, General Technical Report 50-24, 1979. 59p.

KARPPANEN, E.; **Advanced control of industrial circulating fluidized bed boiler using fuzzy logic**. 2000. 135p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) - Faculdade de Tecnologia - University de Oulu, Oulu.

KUNII, D.; LEVENSPIEL, O. **Fluidization engennering**. Butterword - Heinemann Title, 2° ed., 1991. 491 p.

LEINONEN, A. **Harvesting techonology of forest residues for fuel on the USA and Finland**. Espoo, Finland: VTT, 2004. 132p. (Research Notes 2229).

- 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, C. R. Madeira: fonte alternativa e renovável de energia. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 4, 1992, São Carlos. **Anais...** São Carlos: EESC/USP, 1992. p.91-104.
- LIMA, J. T.; ROSADO, S. C. S.; OLIVEIRA, A. D. Variação da densidade da madeira de *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus tereticornis* e *eucalyptus camaldulensis* no sentido longitudinal dos caules. Lavras, MG.: **Rev. Ciência e Prática**, 1691: p. 123-127, 1992.
- LIMA, W. P. **Impacto ambiental do eucalipto**. 2 ed. Edusp – Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993, 301 p.
- LIMA, C. R.; BAJAY, S. V. A reposição florestal obrigatória e o planejamento energético regional. **Rev. Baiana de Tecnologia** – Tecbahia, Edital, Camaçari, BA, p. 140-144, 2000.
- LOO, S. V.; KOOPEJAN, J. **The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing**, Londres, 2008.
- LÓPEZ, L. P.; UDAETA, M. M.; GERALDO, B. O Brasil e a integração energética. In: Rio Oil & Gas Expo and Conference, 2008, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis - IBP, 2008.
- LORA, E. S.; ANDRADE, R. V.; ARADAS, M. E. C. Geração elétrica em pequenas escala a partir da gaseificação de biomassa. In: AGRENER GD 2004 - Encontro de Energia no Meio Rural e Geração Distribuída, 5, 2004, Campinas. **Anais....** Campinas: AGRENER GD 2004, 2004. CD-ROM.
- LORA, E. S.; COBAS, V. R. M.; PAULA, R. B. Outras tecnologias para geração de eletricidade em pequena escala a partir da biomassa: motor *Stirling*, células a combustível, microturbinas. In: CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. S.; E. O. GÓMEZ (Eds). **Biomassa para energia**. São Paulo: UNICAMP, 2008. 736p. Cap. 18, p. 609-632.
- LYND, L. R.; CUSHMAN, J. H.; NICHOLS, R. J.; WYMAN, C.E. Fuel ethanol from cellulosic biomass. **Science**, New Series, V. 251, n. 4999, 1991. p. 1318-1323.
- MACEDO, I. C. **Estado da arte e tendências das tecnologias para energia**. Brasília: Centro de Gestão e Estudo Estratégicos - CGEE, 2003. 76p.
- MACEDO, I. C. **Geração de energia elétrica a partir de biomassa no Brasil**: Situação atual, oportunidades de desenvolvimento. Brasília: CGEE, 2001. 10 p.
- MARTÍ, B. V. Situacion de los sistemas de aprovechamiento de los residuos forestales para su utilización energética. **Ver. Ecosistemas**, n. 1, 2006. Disponível em: <<http://www.revistaecosistemas.net/pdf/402.pdf>> Acesso em: 20out. 2012.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME. **PROINFRA**. 2009. Disponível em:<<http://www.mme.gov.br/programas/proinfra>>. Acesso em: 16 mar. 2012.

MULLER, M. D. **Produção de madeira para geração de energia elétrica numa plantação clonal de eucalipto em Itamarandiba**. 2005. 94 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG, 2005.

NOGUEIRA, L. A. O. **Uso da biomassa florestal para geração elétrica em grande escala: O projeto "WBP-SIGAME" brasileiro**. In: REUNIÓN REGIONAL SOBRE GENERACIÓN DE ELETRICIDAD A PARTIR DA BIOMASSA, 1995, Montivideo. **Anais...** Santiago: FAO, 1996. (Série Florestal, n. 7).

ODDONE, D. C. **Cogeração: uma alternativa para produção de eletricidade**. 2001. 82f. Dissertação (Mestrado em Energia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

PANSHIN, A. J.; ZEEUW, C. **Textbook of wood technology**. 3 ed. New York: McGraw-Hill Book, 1970. 705 p.

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.

PEREIRA JÚNIOR, V. B. **Alternativas para a co-geração de energia de uma indústria de chapas de fibra de madeira**. 2001. 115f. Dissertação (Mestrado em Agronomia / Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.

PERRY, H. J. **Manual del ingeniero químico**. 3º ed., Barcelona: Union Tipografica Editorial hispano - Americana, 1974, Tono I, p. 416-419.

PINTO, J. C. F. **Características da cinza de combustível de biomassa em leito fluidizado**. 2011. 133p. Dissertação (mestrado em Engenharia do Ambiente) - Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 2011.

POTTIE, M. A.; GUIMIER, O. Y. **Preparation of forest biomasses for optimal conversion**. Canada: FERIC/IEA, 1985. 112p. (FERIC Special Report SR-32/IEA Cooperativa Project CPC3).

QUIRINO, W. F. **Utilização energética de resíduos vegetais**. Vol. 1. Brasília: Via Brasil, 2002. 32 p.

RANTA, T.; HALONEN, P.; ALAKANGAS, E. **Production of forest chips in Finland**. Finland: Finland/VTT Energy, 2001. 58 p. (OPET Report 6).

RANTA, T.; RINNE, S. The profitability of transporting uncomminuted raw materials in Finland. **Biomass and Bioenergy**, v. 30, 2006. p. 231-237.

REZENDE, M. A. **Estudo dos anéis de crescimento de duas variedades de *Pinus caribaea* cultivadas na Bahia para avaliação da produtividade, massa específica e nutrição mineral**. Piracicaba, 1987. 144 f. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1987.



REZENDE, M. A. **Uma abordagem não convencional sobre as principais características físicas da madeira, com ênfase para retratibilidade, massa específica e técnica de atenuação da radiação gama.** 1997. 138 f. Tese (Livre-Docência) – Instituto de Biociências, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1997.

REZENDE, M. A.; FERRAZ, E. S. B. Retratibilidade volumétrica e densidade aparente da madeira em função da umidade. **IPFE**, Piracicaba, n. 39, p. 33-40, 1988.

REZENDE, M. A.; SAGLIETTI, J. R. C.; CHAVES, R.; Specific gravity variation of *Eucalyptus grandis* wood at 8 years old in function of a different productivity indexes. **Sci. For.**, Piracicaba, n. 53, p. 71-78, 1998.

ROWELL, R. M.; HAN, J. S.; ROWELL, J. S. Characterization and factors effecting fiber properties. In: FROLLINI, E.; LEÃO, A. L.; MATTOSO, I. H. C. (Ed.) **Natural polymers and agrofibras composites.** São Carlos: IQSC, USP, p. 115-133, 2000.

SENFT, J. F.; BENDTSEN, B. A.; GALLIGAN, W. L. Weak wood. **Journal of Forestry**, n.83, p. 476-485, 1985.

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.

SILVA, J. C.; OLIVEIRA, J. T.S.; THOMAZELLO FILHO, M.; KEINTER JR., S.; MATOS, J. L. M. Influência da idade e da posição radial na massa específica da madeira de *Eucalyptus grandis*. **Rev. Floresta**, Curitiba, V. 34, n.1, 2004.

SIMÃO, S. S. **Valorização energética de lamas resultantes do processo de produção de pasta e papel numa caldeira de leito fluidizado.** 2011. 94 p. Dissertação (Mestrado em Energia e Biomassa) - Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2011.

SIMIONI, F. J.; HOEFLICH, V. A. Cadeia produtiva de biomassa de origem florestal no planalto sul de Santa Catarina. **Rev. Floresta**. Curitiba, v. 39, n. 2, p. 501 - 510, jul./set. 2009.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES FLORESTAIS (SNIF). **Documento:** As florestas plantadas, Brasília 21/04/2012. Disponível em:<<http://www.florestal.gov.br/snif/ensino-e-pesquisa-florestal/educacao-nao-formal>>. Acesso em 24 abr. 2012.

SOARES, C. P. B.; NETO FRANCISCO, P.; SOUZA, A. L. **Dendrometria e inventário florestal.** 2. ed. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 2011. 272 p.

TOMASELLI, I.; SILVA, L. B. X.; REICHMANN NETO, F.; Energy potential of 23 species from fast growing plantation. Madison, **IUFRO Division. V conference on Energy From Biomass**, 1983.12p.

VALE, A. T.; BRASIL, M. A. M.; LEÃO, A. L. Quantificação e caracterização energética da madeira e casca de espécies do cerrado. **Ciência Florestal**, Santa Maria, nº 1, p. 71-80, 2002.

VIANNA, A.; VIEIRA, L. S. R.; NASCIMENTO, M. V. **Manual de aplicação de sistemas descentralizados de geração de energia elétrica para projetos de eletrificação rural** - Energia Biomassa - Versão 1. Rio de Janeiro: CEPEL, 2000. 41p. (Relatório Técnico ADG-A/ PER - 789/00).

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

WALTER, A. **Estado de arte das tecnologias de alto desempenho de produção de eletricidade a partir da biomassa**. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANELL), disco compactado digital. 82293252-246, São Paulo, 1998.

ZOBEL, B. J. The changing quality of the world wood supply. **Wood Sei Technol**, n. 18, p. 1-17, 1984.

## 7. APÊNDICE

**APÊNDICE.** (folha 1). Determinação da massa úmida da madeira com casca (Mucc) da massa úmida de madeira sem casca (Musc), volume de madeira com casca (Vcc), massa úmida de casca (Mucasca), massa de água (MH<sub>2</sub>O) e teor de umidade com base em massa úmida (**u**) do gênero de *Eucalyptus spp.*

Amostras	Mucc	Musc	Vcc	Mucasca	MH <sub>2</sub> O	u
	(g)	(g)	(cm <sup>3</sup> )	(g)	(g)	(%)
1	757,18	662,08	723,20	95,10	365,58	48,28
2	593,08	520,04	570,01	73,04	284,60	47,99
3	445,37	388,92	409,01	56,45	218,84	49,14
4	241,21	195,83	215,00	45,38	106,26	44,05
5	1025,18	907,35	955,50	117,83	501,28	48,90
6	667,87	588,75	615,40	79,12	322,38	48,27
7	531,89	450,67	477,60	81,22	237,54	44,66
8	218,44	183,35	194,90	35,09	96,89	44,36
9	1029,60	901,71	952,80	127,89	499,04	48,47
10	675,69	617,20	604,90	58,49	333,47	49,35
11	439,58	385,66	391,20	53,92	213,50	48,57
12	226,61	191,61	198,80	35,00	106,13	46,83
13	1003,68	895,95	926,30	107,73	503,32	50,15
14	746,71	662,12	675,80	84,59	360,68	48,30
15	435,91	380,81	391,70	55,10	206,92	47,47
16	324,46	262,75	287,60	61,71	146,63	45,19
17	890,73	738,81	824,00	151,92	421,48	47,32
18	706,59	608,50	669,00	98,09	344,30	48,73
19	359,91	306,70	341,90	53,21	173,17	48,11
20	157,31	129,42	141,20	27,89	76,58	48,68
21	1067,87	894,94	1003,20	172,93	530,70	49,70
22	704,35	608,00	667,50	96,35	352,30	50,02
23	451,84	384,57	434,30	67,27	222,57	49,26
24	185,83	154,21	174,50	31,62	91,19	49,07
25	949,36	837,55	870,50	111,81	462,32	48,70
26	700,11	619,39	634,70	80,72	335,39	47,91
27	477,45	418,98	426,20	58,47	227,98	47,75
28	210,78	176,36	187,70	34,42	98,77	46,86
29	937,24	825,46	855,20	111,78	451,90	48,22
30	671,83	624,25	607,40	47,58	341,69	50,86
31	466,48	419,69	418,60	46,79	228,77	49,04
32	198,89	166,57	174,30	32,32	92,14	46,33
33	1601,23	1353,82	1513,30	247,41	772,94	48,27
34	1291,53	1104,09	1245,10	187,44	608,82	47,14
35	604,30	501,71	572,50	102,59	274,13	45,36
36	357,35	291,31	320,60	66,04	156,23	43,72
37	1372,60	1158,54	1267,90	214,06	668,65	48,71
38	1141,14	962,90	1081,20	178,24	532,44	46,66
39	769,4	636,84	724,90	132,56	338,27	43,97
40	371,95	300,78	336,90	71,17	172,93	46,49

**APÊNDICE.** (folha 2). Determinação da massa úmida da madeira com casca (Mucc) da massa umida de madeira sem casca (Musc), volume de madeira com casca (Vcc), massa úmida de casca (Mucasca), massa de água (MH<sub>2</sub>O) e teor de umidade com base em massa úmida (**u**) do gênero de *Eucalyptus spp.*

Amostras	Mucc	Musc	Vcc	Mucasca	MH <sub>2</sub> O	u
	(g)	(g)	(cm <sup>3</sup> )	(g)	(g)	(%)
41	1316,14	1169,23	1195,90	146,91	627,33	47,66
42	826,84	754,28	746,60	72,56	400,7	48,46
43	528,84	468,51	474,40	60,33	249,57	47,19
44	278,88	233,59	244,60	45,29	126,07	45,21
45	1391,33	1232,74	1277,50	158,59	681,41	48,98
46	953,92	861,46	869,40	92,46	467,7	49,03
47	616,48	541,57	557,90	74,91	295,42	47,92
48	314,51	265,81	276,90	48,7	144,22	45,86
49	1825,02	1570,8	1707,00	254,22	915,24	50,15
50	1175,67	1015,1	1116,00	160,57	568,77	48,38
51	740,96	624,53	721,30	116,43	341,05	46,03
52	378,86	305,06	347,60	73,8	176,52	46,59
53	1606,44	1391,46	1513,80	214,98	826,19	51,43
54	1049,28	910,28	1028,80	139	521,5	49,70
55	634,91	534,32	607,00	100,59	302,8	47,69
56	334,49	276,18	304,10	58,31	163,7	48,94
57	1559,4	1383,94	1475,20	175,46	779,6	49,99
58	1149,29	1027,67	1078,00	121,62	558,01	48,55
59	823,14	708,38	756,10	114,76	364,25	44,25
60	421,05	355,62	384,20	65,43	192,32	45,68
61	1707,97	1511,33	1563,10	196,64	815,31	47,74
62	1350,28	1210,27	1229,60	140,01	643,79	47,68
63	784,72	690,53	694,50	94,19	358,27	45,66
64	422,83	352,42	377,70	70,41	191,61	45,32
65	1397,32	1240,14	1302,20	157,18	704,12	50,39
66	873,01	786,84	797,80	86,17	442,49	50,69
67	609,64	546,35	548,40	63,29	308,79	50,65
68	352,04	301,35	316,50	50,69	168,74	47,93
69	1304,52	1173,62	1209,40	130,9	683,64	52,41
70	973,94	885,66	891,90	88,28	507,63	52,12
71	683,12	608,96	613,20	74,16	335,24	49,07
72	334,82	286,16	298,60	48,66	164,17	49,03
<b>Média</b>	<b>760,11±420,05</b>	<b>661,70±370,73</b>	<b>702,88±395,81</b>	<b>98,41±53,12</b>	<b>368,12±209,91</b>	<b>48,43±1,94</b>