

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS PARA A  
SUSTENTABILIDADE  
CAMPUS DE SOROCABA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
“PLANEJAMENTO E USO DE RECURSOS RENOVÁVEIS”

ANA LARISSA SANTIAGO HANSTED

**BIOMASSA PARA FINS ENERGÉTICOS EM UMA INDÚSTRIA DE  
PAINÉIS DE MADEIRA**

Sorocaba

2017

CAMPUS DE SOROCABA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
“PLANEJAMENTO E USO DE RECURSOS RENOVÁVEIS”

ANA LARISSA SANTIAGO HANSTED

**BIOMASSA PARA FINS ENERGÉTICOS EM UMA INDÚSTRIA DE  
PAINÉIS DE MADEIRA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em “Planejamento e Uso de Recursos Renováveis”, para obtenção do título de mestre em “Planejamento e Uso de Recursos Renováveis”

Sorocaba

2017

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família pelo apoio, amor, atenção, paciência e ajuda em todos os momentos, Laercio, Máisa e Felipe.

Ao meu orientador Fábio Yamaji por sempre estar presente, com muita dedicação e carinho pelos alunos.

Às minhas *very important people*: Gabi T., Gabi B., Ana Tereza, Marcelo, Zehla, Texugo, Lucio, Elias, Tatuí, Erick pela amizade e companheirismo.

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 - APRESENTAÇÃO E REVISÃO DA LITERATURA .....</b>	<b>6</b>
1.1. Introdução Geral .....	6
1.2. Revisão Bibliográfica .....	7
1.2.1 Combustíveis Renováveis .....	7
1.2.2. Biomassa Florestal .....	7
1.2.3. Resíduos Florestais .....	8
1.2.4. Sistemas de Geração de Calor.....	9
1.2.5. Biomassas Utilizadas pela Empresa.....	11
<b>CAPÍTULO 2 - POTENCIAL ENERGÉTICO DA CASCA DE EUCALIPTO E A INTERFERÊNCIA DO TEOR DE CINZAS NA GERAÇÃO DE CALOR .....</b>	<b>17</b>
2.1. RESUMO.....	17
2.2. ABSTRACT.....	17
2.3. INTRODUÇÃO .....	18
2.4. MATERIAIS E MÉTODOS .....	19
2.4.1 Tratamentos Realizados .....	20
2.4.2. Análise Química Imediata.....	20
2.4.3. Determinação do Teor de Umidade .....	21
2.4.4. Determinação do Poder Calorífico Superior .....	21
2.4.5. Caracterização Morfológica das Cinzas.....	21
2.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	21
2.5.1. Teor de Umidade.....	21
2.5.2. Análise Química Imediata.....	22
2.5.3. Poder Calorífico Superior .....	23
2.5.4. Caracterização Morfológica .....	24
2.6. CONCLUSÃO .....	27

<b>CAPÍTULO 3 - CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DE DIVERSOS RESÍDUOS UTILIZADOS PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA EM UMA INDÚSTRIA DE PAINÉIS DE MADEIRA.....</b>	<b>28</b>
3.1. RESUMO.....	28
3.2. ABSTRACT.....	28
3.3. INTRODUÇÃO.....	29
3.4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	31
3.4.1. Determinação do teor de umidade.....	32
3.4.3. Análise imediata.....	32
3.4.4. Poder calorífico superior.....	33
3.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	33
3.5.1. Teor de Umidade.....	33
3.5.2. Distribuição granulométrica.....	33
3.5.3. Análise química imediata e PCS.....	36
3.5.4. Poder calorífico Superior.....	39
3.6. CONCLUSÃO.....	40
<b>CAPÍTULO 4 - CONCLUSÕES GERAIS.....</b>	<b>41</b>
4.1 CONCLUSÃO.....	41
4.2. Referências.....	42

## CAPÍTULO 1 - APRESENTAÇÃO E REVISÃO DA LITERATURA

### 1.1. INTRODUÇÃO GERAL

Diante da disponibilidade de recursos renováveis no país e do aumento na procura de fontes de energias alternativas, algumas empresas passaram a utilizar a biomassa como fonte complementar ou principal de energia. O custo da geração de energia das empresas e a preocupação ambiental auxiliaram neste padrão de comportamento já encontrado atualmente. Os resíduos que eram vistos como problemas começaram a representar soluções. Mesmo com este progresso, ainda existem alguns aspectos que precisam ser estudados para que os resíduos possam ser utilizados em todo seu potencial, e com maior previsibilidade. Este trabalho foi desenvolvido em uma indústria de painéis de madeira reconstituída. Foram estudadas as biomassas utilizadas pela empresa como combustível para as caldeiras.

Na produção dos painéis de madeira reconstituída, é utilizado como matéria-prima o cavaco de madeira de eucalipto, e no processo produtivo são gerados resíduos: casca de eucalipto, pó de lixa e pó de serra.

O sistema de geração de energia para a produção dos painéis é feito com caldeiras, geralmente utilizando a biomassa como combustível. Na caldeira ocorre a produção de vapor, ar quente e aquecimento do óleo da prensa. As biomassas utilizadas na caldeira são: casca, resíduos da própria produção (pó da lixadeira e pó da serra), resíduos de construção civil e cavaco. A casca de eucalipto é uma das principais fontes de combustível para a empresa, devido à disponibilidade e ao grande volume gerado, aproximadamente 50 milhões de toneladas de resíduos florestais ao ano (IBÁ, 2015). Entretanto, existem alguns problemas que dificultam seu uso. A casca de eucalipto é um material heterogêneo, principalmente quanto à sua granulometria. Possui alto teor de umidade (> 30% base seca) e com presença de contaminantes (sílica). Em função destas características a empresa vem apresentando dificuldades para utilizar a casca de eucalipto nas caldeiras.

O trabalho foi dividido em quatro capítulos. O capítulo 1 faz uma introdução ao assunto bem como uma revisão bibliográfica dos temas que serão abordados no desenvolvimento do trabalho. O capítulo 2 apresenta a caracterização físico-química da

casca de eucalipto e os problemas dos contaminantes presentes no material. O capítulo 3 aborda a caracterização físico-química de todas as biomassas utilizadas pela empresa, e as formas de otimizar o uso da casca de eucalipto para a geração de energia. No capítulo 4 foi realizada uma conclusão geral.

## 1.2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 1.2.1 Combustíveis Renováveis

Os combustíveis fósseis são fonte da geração de poluentes e gases agravantes do efeito estufa. A energia gerada pelos combustíveis não renováveis pode ser parcialmente, se não totalmente, substituída por fontes renováveis. Esta troca de matriz é o objetivo de diversos setores industriais, pois acarreta em ganhos financeiros e ecológicos (GOLDEMBERG & LUCON, 2007).

Neste contexto, surgem as opções de fontes renováveis para a geração de energia. No Brasil, atualmente são utilizadas diversas fontes, entre elas eólica, solar, hidrelétrica e biomassa vegetal. O país conta com aproximadamente 40% da matriz energética primária proveniente de recursos renováveis.

A biomassa apesar de emitir CO<sub>2</sub> na queima, participa na fixação do mesmo durante o crescimento da cultura (CASSOL, et al., 2015). Desta forma, a participação expressiva de hidrelétrica e biomassa na matriz energética do Brasil, resultam em menor emissão de CO<sub>2</sub> pelo país, 1,52 toneladas CO<sub>2</sub>/tep<sup>1</sup>, quando comparado à media mundial, 2,37 toneladas CO<sub>2</sub>/tep (MME, 2015).

### 1.2.2. Biomassa Florestal

A biomassa é qualquer matéria orgânica que possa ser transformada em energia, seja esta térmica, elétrica ou mecânica. A origem da biomassa pode ser urbana, industrial, agrícola ou florestal. Todas as formas em que a biomassa é obtida são vistas como fontes de energia promissora, com pouca representatividade no passado, porém com potencial de crescimento no mercado nacional e internacional (ANEEL, 2008).

A biomassa florestal para a geração de energia pode ser produzida por plantios com finalidade energética, ou a partir de resíduos gerados no processo de colheita e

---

<sup>1</sup> Tep: tonelada equivalente de petróleo

processamento da madeira. As vantagens econômicas são inúmeras, é um combustível barato, quando proveniente de resíduos; a mão-de-obra utilizada para a coleta e manuseio não precisa ser qualificada, gerando muitas oportunidades de emprego; e o armazenamento pode ser feito ao ar livre, mesmo que isso altere o potencial energético (MME, 1996).

A área de florestas plantadas para fins industriais no país supera os 7 milhões de hectares, apenas os plantios de eucalipto representam mais de 5 milhões de hectares. Este valor é crescente, e os estados que mais plantam são Minas Gerais, São Paulo e Mato Grosso. O estado de São Paulo apresenta aproximadamente um milhão de hectares de plantações de eucalipto. Os setores industriais que geram esta demanda atualmente são: celulose e papel, construção civil e painéis. A produção de painéis no país atingiu 7,98 milhões de metros cúbicos em 2014, o que representou uma alta em relação a produtividade dos anos anteriores. É possível verificar que a produção de painéis tem concentração maior na região sul e sudeste, Figura 1 (IBÁ, 2015).



Figura 1. Distribuição geográfica das unidades produtoras de painéis de madeira reconstituída e pisos laminados. Fonte: IBÁ (2015).

### 1.2.3. Resíduos Florestais

As empresas de painéis geram resíduos no processo produtivo. Os resíduos são todos aqueles que, conforme a norma ABNT NBR 10004:

“... resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição...”

De acordo com Fontes (1994), os resíduos do processamento da madeira podem ser classificados de três formas: serragem (resíduo originado de processos à partir da serra); cepilho (resíduo gerado na formação de móveis); lenha (resíduo com dimensão maior, como costaneiras ou aparas). Em adição a estas classificações, as indústrias podem utilizar outros tipos de resíduos, como a casca da árvore, que não é utilizada no processo de fabricação dos painéis de madeira; pó de lixa e pó de serra, gerados no processo de produção de produtos madeireiros, entre outros.

#### 1.2.4. Sistemas de Geração de Calor

A indústria de painéis estudada utiliza a biomassa para geração de energia. Esta geração é feita com o uso de caldeiras. Caldeiras são estruturas com a função de produzir calor, onde é feita a queima do combustível. A geração de calor pode ser no formato de vapor, ar quente ou água quente, alimentando sistemas e instalações. Ainda, de acordo com NR-13 (BRASIL, 2014):

“Caldeiras a vapor são equipamentos destinados a produzir e acumular vapor sob pressão superior à atmosférica, utilizando qualquer fonte de energia, excetuando-se os revedores e equipamentos similares utilizados em unidades de processo.”

As caldeiras podem ser classificadas de acordo com a forma que os gases, provenientes da combustão, trocam calor. Podem ser flamatubulares, ou seja, os gases da combustão circulam dentro dos tubos, promovendo o aquecimento da água, que circunda o tubo; ou aquatubulares, quando a água circula dentro do tubo, e os gases da combustão o circundam (TORREIRA, 1995).

Entender o funcionamento de uma caldeira é imprescindível para relacionar os fatores que podem influenciar no seu bom desempenho. As caldeiras podem ter formatos diversificados, mas contam com estruturas em comum, que permitem o seu funcionamento, como descrito no manual técnico da empresa International Paper (2015):

#### Fornalha

A fornalha é o local onde é feita a queima do combustível. Comumente formada por duas partes: aparelho de combustão e câmara de combustão. Esta é uma sessão de

fundamental importância para o bom funcionamento da caldeira, pois qualquer alteração nesta etapa interfere nas etapas seguintes.

#### Grelhas Rotativas

As grelhas da caldeira podem variar a estrutura. Os diferentes tipos de combustíveis podem exigir armações distintas. No caso da biomassa, que pode contar com uma quantidade grande de contaminantes, o mais indicado é que as grelhas sejam rotativas. Esta modalidade permite que o material, que não faz parte da queima, seja removido do processo com maior facilidade.

#### Queimadores

Os queimadores são estruturas auxiliares que podem permitir a continuidade na geração de energia, com a utilização de óleos combustíveis, quando a biomassa está em falta. Outra finalidade dos queimadores é aumentar o rendimento energético quando a biomassa apresenta algum problema, como o alto teor de umidade.

#### Superaquecedor

O superaquecedor deve ser responsável por elevar a temperatura de vapor saturado. Devem ser instalados de maneira que façam a troca de calor com o máximo de proveito dos gases provindos da combustão.

#### Soprador de Fuligem

O soprador de fuligem auxilia na retirada dos materiais que podem prejudicar a transferência de calor à caldeira, como as cinzas, borras e fuligens em geral. Os sopradores podem ser instalados permanentemente nos locais em que há maior depósito de componentes indesejados, ou inseridos alternadamente nas regiões críticas.

#### Chaminé

A chaminé consiste na parte em que é feita a circulação dos gases quentes do sistema.

#### Válvulas de Segurança

As válvulas de segurança tem a função de manter a pressão interna da caldeira. Caso o sistema ultrapasse a pressão estabelecida, as válvulas são abertas, descarregando o calor para a atmosfera. As válvulas só se fecham quando ocorre a regularização da pressão interna.

#### Sistemas de Segurança (Trips)

As caldeiras podem apresentar sistemas de segurança. Estes sistemas são previamente programados, e protegem os processos de eventuais falhas mecânicas, elétricas, instrumentais ou humanas.

#### Sistema de Controle de Poluentes Atmosféricos

O controle das emissões é feito com um precipitador eletrostático. Desta forma, as partículas emitidas são atraídas pelos eletrodos de captação e ali ficam depositadas.

#### Sistema Contínuo de Monitoramento de Emissões

As caldeiras podem apresentar um sistema de medição dos gases emitidos. Este sistema apresenta a medição contínua de oxigênio na saída dos gases da fornalha.

### 1.2.5. Biomassas Utilizadas pela Empresa

As biomassas utilizadas na indústria de painéis são: casca de eucalipto, cavaco, pó de lixa e de serra e resíduos de construção civil. O cavaco é a matéria-prima para a produção dos painéis, e só é utilizado em ocasiões especiais: alta umidade na casca. O material obtido em maior quantidade é a casca, que é um resíduo gerado no processo de fabricação dos painéis. As biomassas são misturadas de acordo com as características em que são obtidas.

O processo de produção dos painéis pode ser visualizado na Figura 2.

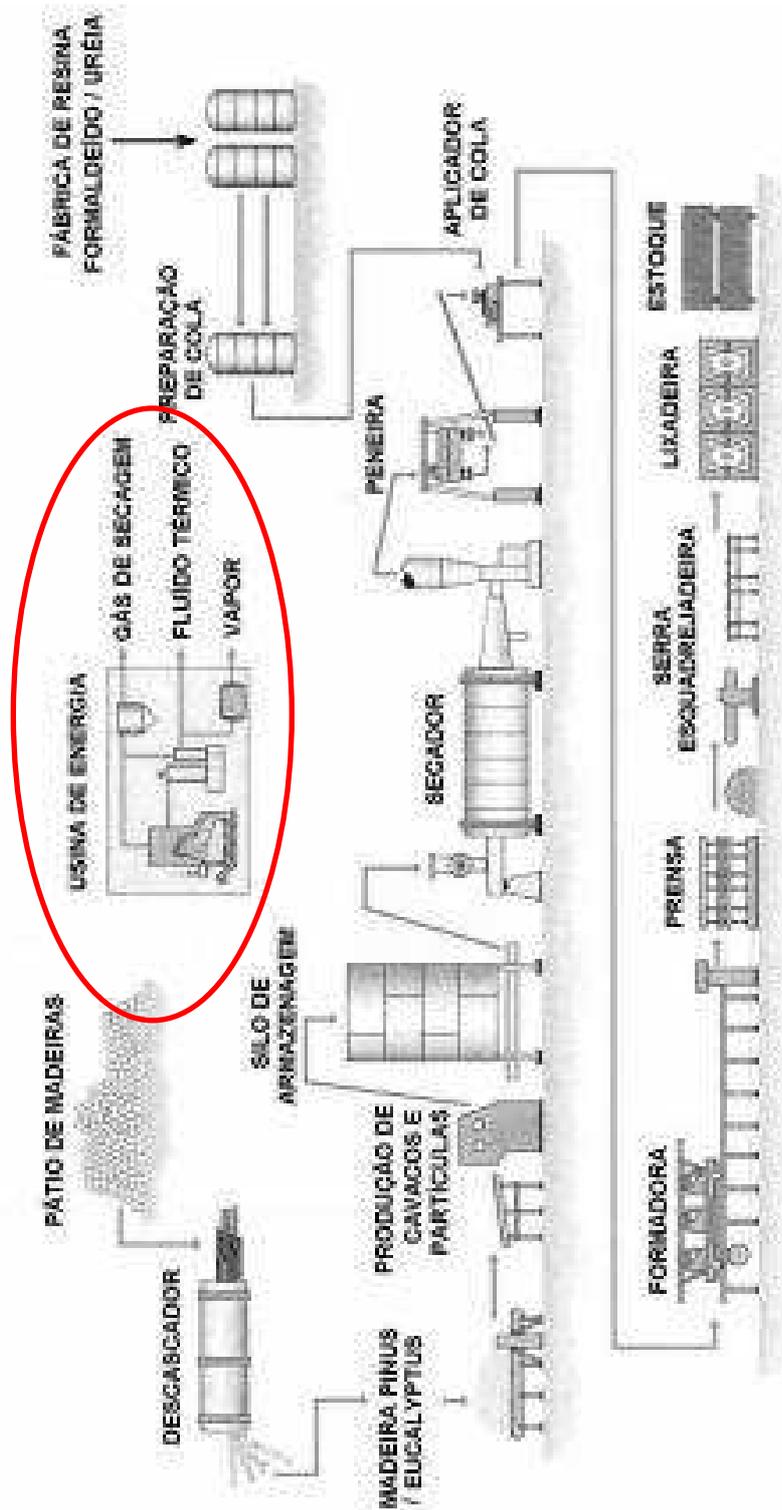


Figura 2. Processo de produção de painéis de madeira. Em destaque, o sistema de geração de calor do processo, caldeira. Fonte: Adaptado do Manual Técnico UFPR, s.d.

## Casca

A casca de uma árvore pode ter características distintas da madeira, apresentando componentes e/ou quantidades dos componentes diferenciadas. A casca do eucalipto, resíduo formado com a maioria dos processos de utilização da madeira, já conta com diversas utilizações. Pode ser empregada na ciclagem dos nutrientes quando deixada no local da colheita, ou na geração de energia para empresas que geram este resíduo (VITAL, 2007). Mesmo com composição heterogênea, a casca do eucalipto é um resíduo com potencial energético conhecido e já utilizado por indústrias (BRITO et al., 1979). A composição deste material pode variar de acordo com a espécie, as condições do ambiente e da coleta, e tais fatores podem influenciar na contaminação presente (FREDO et al., 1999).

Um estudo feito por Almeida e colaboradores (2010), com três espécies de eucalipto: *E. grandis*, *E. saligna* e *E. citriodora*, mostrou a variação na composição da madeira, em relação à casca dos mesmos indivíduos. Dentre os parâmetros que apresentaram diferença, estão os componentes: lignina, celulose e taninos. Na análise química imediata, os teores de cinzas, voláteis e carbono fixo, desta biomassa também apresentam diferenças significativas, como já apresentadas por outros estudos (HANSTED, et al. 2016; BRITO & BARRICHELO, 1978; RAGLAND et al., 1991).

O teor de cinzas de um material, para fins energéticos, é um componente que deve ser calculado previamente ao uso, pois representa a porção do material que não faz parte da combustão (GONÇALVES et al., 2009). Desta forma, quanto maior for o teor de cinzas, menor a geração de calor. Outro aspecto negativo quanto ao teor de cinzas elevado é a manutenção que pode gerar nas caldeiras, em função do processo de corrosão das estruturas, e do espessamento das paredes, impedindo a passagem do calor (GARCIA et al., 2014).

A indicação para o uso de uma biomassa na geração de energia, é que o teor de cinzas seja de até 2% (ENPLUS, 2015). Porém, quando o valor excede o indicado, não significa que o material não possa ser utilizado, mas pode gerar maior custo com manutenção e pode resultar em perdas significativas na geração de calor. Para a madeira de eucalipto, os valores não costumam exceder 1%, porém, a casca apresenta valores mais altos. Este aumento pode ser atribuído à incrustação de terra na casca no momento

da colheita (HANSTED et al., 2016; BRITO & BARRICHELO, 1979). O teor de cinzas da casca do eucalipto pode variar muito, na literatura apresenta valores entre 3,6 e 19% (CHEN et al., 2015; ALMEIDA et al., 2010; SARIN & PANT, 2006).

O poder calorífico da casca do eucalipto apresenta valores entre 16000 e 21300 J.g<sup>-1</sup> (GARCIA et al., 2014; ALMEIDA et al., 2010). Estes valores tornam a casca do eucalipto uma biomassa com potencial para o uso em energia, similar a madeira de eucalipto que pode apresentar valores entre 17500 J.g<sup>-1</sup> e 21160 J.g<sup>-1</sup> (EUFRADE JÚNIOR et al., 2016; NÚÑES-REGUEIRA et al., 2002).

### Pó de serra e pó de lixa

Após a formação da estrutura dos painéis, eles devem passar pela esquadrejadeira, em que são feitos os ajustes para a regularização do formato dos painéis, ou seja, são estabelecidas as medidas conforme os padrões pré-estabelecidos pela empresa. Nesta parte do processo é gerado o pó de serra. O lixamento ocorre no final do processo de produção, e nesta etapa é feita a preparação da superfície das chapas, conforme o acabamento desejado, gerando o pó de lixa. O pó de lixa é gerado em menor quantidade, não apresentando quantidades significativas para a empresa.

O pó de serra é um resíduo com grande potencial para o aproveitamento energético. Apresenta características consideradas pertinentes para a geração de energia: baixo teor de umidade, alto poder calorífico, e tamanho reduzido das partículas. Desta forma, o material tem alto poder de explosão e auxilia no início da combustão (BELINI et al., 2014).

A geração deste resíduo é variável, depende dos equipamentos que são utilizados pela empresa. Os valores para geração de pó de serra podem variar de 5,0 a 7,5%, quando há um alto rendimento do processo, enquanto o pó de lixa representa apenas 3% (OLANDOSKI 2001; ANDRADE, 1992; OLANDOSKI 2001; ANDRADE, 1992).

### Cavaco

A utilização da madeira para a geração de calor é uma prática comum nos setores industriais e domésticos. A madeira é o combustível mais antigo e com maior disponibilidade no território do Brasil. O emprego da madeira em tamanhos reduzidos,

como o cavaco, como fonte de energia surgiu a partir da dificuldade do uso de toras da madeira para a queima (NASCIMENTO E BIAGGIONI, 2010). A redução no tamanho das partículas facilita o manuseio do material e aumenta a superfície de contato do mesmo, o que pode resultar em ganhos na eficiência energética (NOGUEIRA, 2000).

Os cavacos podem ser provenientes de diversas fontes: resíduos florestais, resíduos de construção civil, resíduos de serraria, resíduos de podas urbanas entre outros. Os resíduos são coletados, processados e podem ser comercializados ou utilizados pelas empresas que os produzem. Podem ser utilizados para empresas de todos os setores na produção de energia térmica (LOPES, et al., 2016).

O cavaco que a empresa em questão utiliza, tem origem de madeira de eucalipto, apresenta as qualidades da espécie, com as vantagens ao se utilizá-la: rápido crescimento, alta produtividade e facilidade de adaptação. A obtenção dos cavacos, para a geração de energia, pode ser feita com idade de plantio variada, desde os 2 anos - short-rotation. Assim, sua utilização passa a ter custo reduzido, tornando o processo mais viável economicamente (CORTEZ et al., 2009).

### Resíduos construção civil

Os resíduos de construção civil utilizados pela empresa consistem no material que é retirado de entulhos na cidade de Salto/SP. Entre os resíduos são encontradas diversas estruturas de madeira, com formato variado e baixa umidade.

Antes da utilização deste resíduo, é necessário fazer uma limpeza para a retirada de objetos que não devem entrar no queimador, como pregos e plásticos, figura 3.



Figura 3. Materiais retirados na limpeza do resíduo de construção civil. Fonte: AUTOR.

Esta prática, de utilização de resíduos de um setor de alta produtividade, como é o caso da construção civil, não só apresenta vantagens econômicas como ambientais. A alta geração de entulhos nas cidades pode ser um problema, e a quantidade gerada pode ser comparada a massa de resíduo domiciliar (JOHN & AGOPYAN, 2000).

A madeira proveniente da utilização na construção civil apresenta um teor de umidade baixo, uma vez que o material deve apresentar estabilidade dimensional. Este valor varia em torno de 12% em base seca. Desta forma, esta característica também desejada na geração de calor, é uma vantagem para o emprego na empresa. (ZENID, 2011). Outro aspecto positivo de sua utilização é a alta densidade que a madeira de construção civil deve apresentar, implicando em alto rendimento energético, já que materiais mais densos apresentam maior massa em um mesmo volume (SANTOS et. al, 2012).

## **CAPÍTULO 2 - POTENCIAL ENERGÉTICO DA CASCA DE EUCALIPTO E A INTERFERÊNCIA DO TEOR DE CINZAS NA GERAÇÃO DE CALOR**

### **2.1. RESUMO**

A casca de eucalipto é um resíduo que pode ser usado como combustível pela indústria. Um dos problemas da utilização deste resíduo é a contaminação. O objetivo deste trabalho foi a caracterização físico-química da casca do eucalipto utilizada como combustível em uma indústria de painéis de madeira reconstituída. Para diminuir os contaminantes, foi feita uma lavagem da casca em água corrente. Foram realizados seis tratamentos de acordo com o tamanho de partícula e processo de lavagem: T1 (850 $\mu$ m a 425 $\mu$ m / não lavado), T2 (250 $\mu$ m / não lavado), T3 (<150 $\mu$ m / não lavado), T4 (850 $\mu$ m a 425 $\mu$ m / lavado), T5 (250 $\mu$ m / lavada), T6 (<150 $\mu$ m / lavada). O material foi avaliado quanto ao teor de umidade no momento da coleta. Os tratamentos foram submetidos a análise química imediata e determinado o poder calorífico superior (PCS). As cinzas foram analisadas em MEV-EDS, a fim de identificar os componentes/contaminantes. Os dados obtidos neste estudo foram analisados estatisticamente utilizando o software R. O material apresentou teor de umidade de 70% em base seca, o que é considerado elevado para utilização na bioenergia. Componentes contaminantes, tais como o cálcio e sílica foram identificados nas cinzas do material. A análise química imediata mostrou uma diferença significativa entre os tratamentos, o teor de cinzas apresentou valores de 2,63% (T1) a 13,86% (T3). O processo de lavagem da casca foi eficiente para a redução do teor de cinzas apenas no tamanho de partícula <150 $\mu$ m. A separação da casca em diferentes tamanhos de partículas forneceu resultados satisfatórios para redução dos contaminantes.

Palavras-chave: resíduo, contaminação, teor de cinzas, poder calorífico superior.

### **2.2. ABSTRACT**

The bark is a residue that can be used as fuel by industry. One of the problems of the use is the contamination. The purpose of this paper was the physico-chemical characterization of eucalyptus bark used as a fuel in a wood panel industry, relating the high heating value (HHV) with the ash content. Six treatments were provided according

to the particle size: T1 (850µm to 425 µm / unwashed), T2 (250 µm / unwashed), T3 (<150 µm / unwashed), T4 (850µm to 425 µm / washed), T5 (250 µm / washed), T6 (<150 µm / washed). The material was assessed regarding moisture content. The treatments were subjected to HHV and proximate analysis. The ashes were analyzed under SEM-EDS in order to identify the components/contaminants. The data obtained in this study were statistically analyzed using the software R. The material presented moisture content of 70% on a dry basis, which is considered high for use in bioenergy. Contaminants components such as calcium and silica were identified in the ash material. The proximate analysis showed a significant difference among treatments, the ash content presented values from 2.63% (T1) to 13.86% (T3). The process of washing the bark was efficient for the reduction in ash content only in the particle size <150 µm. The separation in particle size extracts of the bark presented a good technique to reduce the contaminants.

Keywords: residue, contamination, ashes content, high heating value.

### 2.3. INTRODUÇÃO

A geração de energia é um tópico que ao longo dos anos vem ganhando maior importância em função de sua influência na estabilidade econômica, e nas questões políticas e ambientais. Os recursos renováveis são fontes alternativas de energia. Podem apresentar vantagens como a alta disponibilidade, fácil trabalhabilidade e custo reduzido, quando comparados aos combustíveis fósseis. A energia de fonte renovável passou a ser vista como sustentável, e já apresenta uma taxa de uso crescente (NEMATOLLAHI et al., 2016; EIA, 2015).

No Brasil existe uma alta disponibilidade de biomassa florestal. Esta biomassa pode ser proveniente de plantios próprios para energia ou de resíduos de plantios para outros fins. A área de florestas plantadas no Brasil é de 7,6 milhões de hectares, sendo que aproximadamente, 70% são florestas de eucalipto (IBÁ, 2014).

O material que antes era tido como resíduo passou a ser utilizado por empresas para a geração de energia, ou vendido com a mesma finalidade. Desta maneira, o material que implicava em custos de descarte, passou a representar fonte de economia.

O processo de queima da biomassa gera as cinzas, um resíduo inorgânico. O teor de cinzas é a porcentagem do material que não faz parte do processo de queima, dessa maneira, desta forma há uma relação entre poder calorífico superior e teor de cinzas.

Este componente pode ainda, implicar em danos nos equipamentos de queima, formando depósitos de material nas estruturas, reduzindo a capacidade térmica, ou ainda, causando processos corrosivos (GARCIA *et al.*, 2014). Assim, há uma preocupação quanto à redução destes componentes a fim de evitar manutenção de equipamentos, ou para potencializar a geração de calor.

O teor de cinzas de um material pode variar de acordo com a disponibilidade de minerais do local em que a madeira é plantada. Os minerais são absorvidos pelo organismo e podem ser encontrados em todos os órgãos e tecidos do vegetal. Quando o teor de cinzas encontrado está acima do esperado, existe a possibilidade do material estar com algum tipo de contaminação (FREDO *et al.*, 1999).

As cinzas são heterogêneas quanto à sua composição, variando de acordo com a fonte da biomassa utilizada e o processo de queima (VASSILEV E VASSILEVA, 2007). Podem ser citados como principais componentes os silicatos, partículas com forma de cristais, compostas por dióxido de silício (SiO<sub>2</sub>); as cenosferas, partículas com formato esférico compostas por uma mistura de óxidos metálicos; além de os componentes que podem remanescer, os carbonosos, partículas com formato irregular, que são presentes quando ocorre queima incompleta das plantas (AHMARUZZAMAN, 2010; CORDEIRO *et al.*, 2008; HWANG e SUN, 2002).

O principal objetivo deste trabalho foi a caracterização físico-química da casca de eucalipto utilizada como combustível em uma indústria de painéis. Os objetivos específicos foram caracterizar as cinzas por meio de espectroscopia e morfologia e identificar possíveis componentes no material que possam interferir em seu potencial calorífico.

## 2.4. MATERIAIS E MÉTODOS

A biomassa foi coletada em uma empresa madeireira na cidade de Itapetininga/SP. O material é procedente de plantios do híbrido *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*, com sete anos de idade. O material utilizado foi a casca obtida após o descascamento das toras, realizado por um descascador de tambor no pátio da empresa, Figura 1.



Figura 1.: Casca de eucalipto no pátio da empresa.

#### 2.4.1 Tratamentos Realizados

O material foi submetido à um processo para redução do tamanho de partículas com o auxílio de um moinho de facas do tipo Willey. Depois foi feita a separação granulométrica e o processo de lavagem (L), em água corrente por 10 minutos (total 2 l), e não lavado (NL). Foram obtidos seis tratamentos, tabela 1:

Tabela 1. Tratamentos obtidos por meio da separação em estratos granulométricos e processo de lavagem (L) e não lavado (NL).

Processos	Tratamentos	Mesh	$\mu\text{m}$
NL	T1	20-40	850-425
	T2	60	250
	T3	<100	>150
L	T4	20-40	850-425
	T5	60	250
	T6	<100	>150

#### 2.4.2. Análise Química Imediata

A determinação do teor de cinzas foi feita conforme a norma ASTM D1102-84 (2007), e o teor de voláteis, conforme a norma ABNT NBR 8112/86; ambos em triplicatas. O teor de carbono fixo foi calculado segundo a equação (1):

$$TCF = 100 - (TC + TV) \quad (1)$$

Onde:  $TCF$  = teor de carbono fixo (%);  $TC$  = teor de cinzas (%); e  $TV$  = teor de voláteis (%).

### 2.4.3. Determinação do Teor de Umidade

O teor de umidade foi determinado no momento da coleta dos materiais, conforme a norma ABNT NBR 8112/86. As biomassas foram pesadas em uma balança semi-analítica, e posteriormente inseridas em uma estufa à  $105 \pm 2^\circ\text{C}$ . Foram feitas pesagens até os materiais apresentarem massa constante. O teor de umidade foi calculado em base seca, conforme a equação (2):

$$\text{TU} = \frac{(P_u - P_s)}{P_s} * 100 \quad (2)$$

Sendo TU: teor de umidade em base seca (%);  $P_u$ : peso úmido (g);  $P_s$ : peso seco (g).

### 2.4.4. Determinação do Poder Calorífico Superior

O poder calorífico superior (PCS) foi obtido na bomba calorimétrica IKA C200 com base nos padrões da norma ASTM D5865-98. Foram realizadas três repetições para cada tratamento.

### 2.4.5. Caracterização Morfológica das Cinzas

A caracterização morfológica das cinzas foi realizada com a microscopia eletrônica de varredura (MEV). Os ensaios foram realizados no Laboratório de Microscopia Eletrônica do Laboratório Nacional de Nanotecnologia utilizando o microscópio da marca FEI modelo Inspect F50. Também foi utilizado o periférico de espectroscopia de energia dispersiva (EDS).

## 2.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 2.5.1. Teor de Umidade

O material foi adquirido nas condições em que é utilizado pela empresa, sem nenhum tipo de beneficiamento ou limpeza. O teor de umidade obtido foi de aproximadamente 70%. Este alto teor pode ser explicado devido ao armazenamento em silos, sem secagem prévia, mantendo a umidade no material. O alto teor de umidade é um agravante para o uso em geração de calor, uma vez que há uma perda do potencial energético para a retirada desta água em excesso. O teor de umidade máximo, recomendado, da biomassa para uso como combustível é de 10 a 20% (BORGES et al., 2008; FARINHAQUE, 1981).

### 2.5.2. Análise Química Imediata

Na análise química imediata foram encontrados os resultados do teor de cinzas, teor de voláteis e carbono fixo, Tabela 2. A análise estatística ANOVA e o teste Tukey foram aplicados.

Tabela 2. Valores médios e desvio padrão da análise química imediata da casca nos tratamentos estabelecidos, onde NL: material não lavado, e L: material lavado.

Processos	Tratamentos	Cinzas (%)	Voláteis (%)	Carbono Fixo (%)
NL	T1	2,63 c ( $\pm 0,28$ )	80,23 a ( $\pm 0,26$ )	17,12 ( $\pm 0,34$ )
	T2	5,23 b ( $\pm 0,36$ )	76,89 b ( $\pm 0,62$ )	17,86 ( $\pm 0,40$ )
	T3	13,86 a ( $\pm 0,26$ )	68,15 c ( $\pm 0,20$ )	17,98 ( $\pm 0,38$ )
L	T4	2,78 c ( $\pm 0,12$ )	79,58 a ( $\pm 0,27$ )	17,62 b ( $\pm 0,33$ )
	T5	3,12 b ( $\pm 0,15$ )	79,73 a ( $\pm 0,30$ )	17,13 b ( $\pm 0,23$ )
	T6	5,15 a ( $\pm 0,12$ )	76,16 b ( $\pm 0,06$ )	18,45 a ( $\pm 0,30$ )

Foi possível verificar diferenças significativas entre os tratamentos, com as distintas granulometrias utilizadas. Para os dois parâmetros, NL e L, a maior porcentagem de cinzas se concentrou nas menores granulometrias (T1 e T4). Quando calculada a ANOVA entre os mesmos estratos granulométricos, com a diferença do parâmetro lavagem, foi possível verificar que entre T1 e T4, não houve diferença significativa, ou seja, a lavagem não é necessária para partículas de 20 a 40 mesh. O mesmo comportamento foi observado para as partículas de 60 mesh, ou seja, não houve diferença significativa entre os tratamentos T2 e T5. Para o material mais fino, <100 mesh (T3 e T6), a lavagem resultou em diminuição significativa no teor de cinzas. O material que não apresentou diferença significativa com a lavagem (20 a 60 mesh) representa 67% do total estudado, indicando que a lavagem não foi um método eficiente para eliminar os contaminantes. A separação granulométrica foi mais eficiente que o processo de lavagem e é indicada para redução no teor de cinzas.

O teor baixo de cinzas é uma das características da madeira de eucalipto, que o torna viável para o uso em energia, apresenta valores inferiores a 1% (GOMINHO et.al, 2012). Os valores de cinzas obtidos neste trabalho, para a casca de eucalipto, ultrapassaram 2% (T1), e atingiram aproximadamente 14% para T3. Com a separação

granulométrica, e a lavagem do material, foi possível identificar a presença de contaminantes na biomassa. Para a casca de árvores, é previsto que exista maior susceptibilidade à contaminação de terra, ou qualquer impureza do ambiente externo (PEREIRA et. al, 2000).

O teor de carbono fixo está diretamente relacionado com a qualidade do biocombustível, a quantidade presente na biomassa pode definir o potencial para a geração de energia. Quando em quantidades altas, de 15 a 25% (VANLOO & KOPPEJAN, 2002), aumenta o rendimento energético, em função da queima vagarosa na fase sólida (EROL et al, 2010; TODARO et.al, 2010; BRITO & BARRICHELO, 1978). Assim, o carbono fixo e o teor de voláteis são inversamente relacionados para geração de energia, uma vez que o teor de voláteis representa a fração do material que deve queimar rapidamente na forma gasosa, resultando em menor tempo de queima (BRITO & BARRICHELO, 1978).

### 2.5.3. Poder Calorífico Superior

O comportamento do material seguiu o padrão esperado, apresentando diminuição do poder calorífico, conforme o aumento no teor de cinzas, Figura 2.

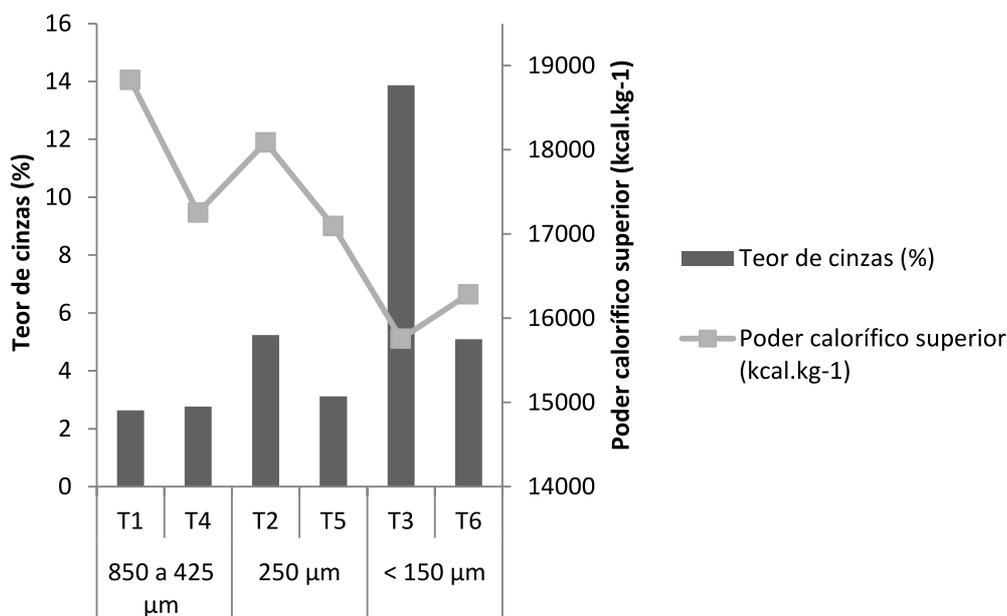


Figura 2. Teor de cinzas dos tratamentos, com a variação no poder calorífico encontrado. Figura com a comparação do teor de cinzas dos tratamentos analisados com o percentual de cinzas gerado.

Elevados teores de cinzas (minerais) não impedem a utilização do material, porém, representam diminuição significativa no potencial energético, como pode ser verificado em Figura 2. Os minerais não participam do processo de combustão, desta forma são inversamente proporcionais à geração de calor e ainda, podem acarretar em danos nos equipamentos, aumentando a necessidade de manutenção (SABATTI, et. al, 2014; PROTÁSIO et. al, 2011; MONTES, 2011; BRAND, 2010).

#### 2.5.4. Caracterização Morfológica

A Figura 3 apresenta as micrografias das partículas encontradas com maior frequência nas amostras de cinzas geradas após a queima da biomassa em diferentes magnificações.

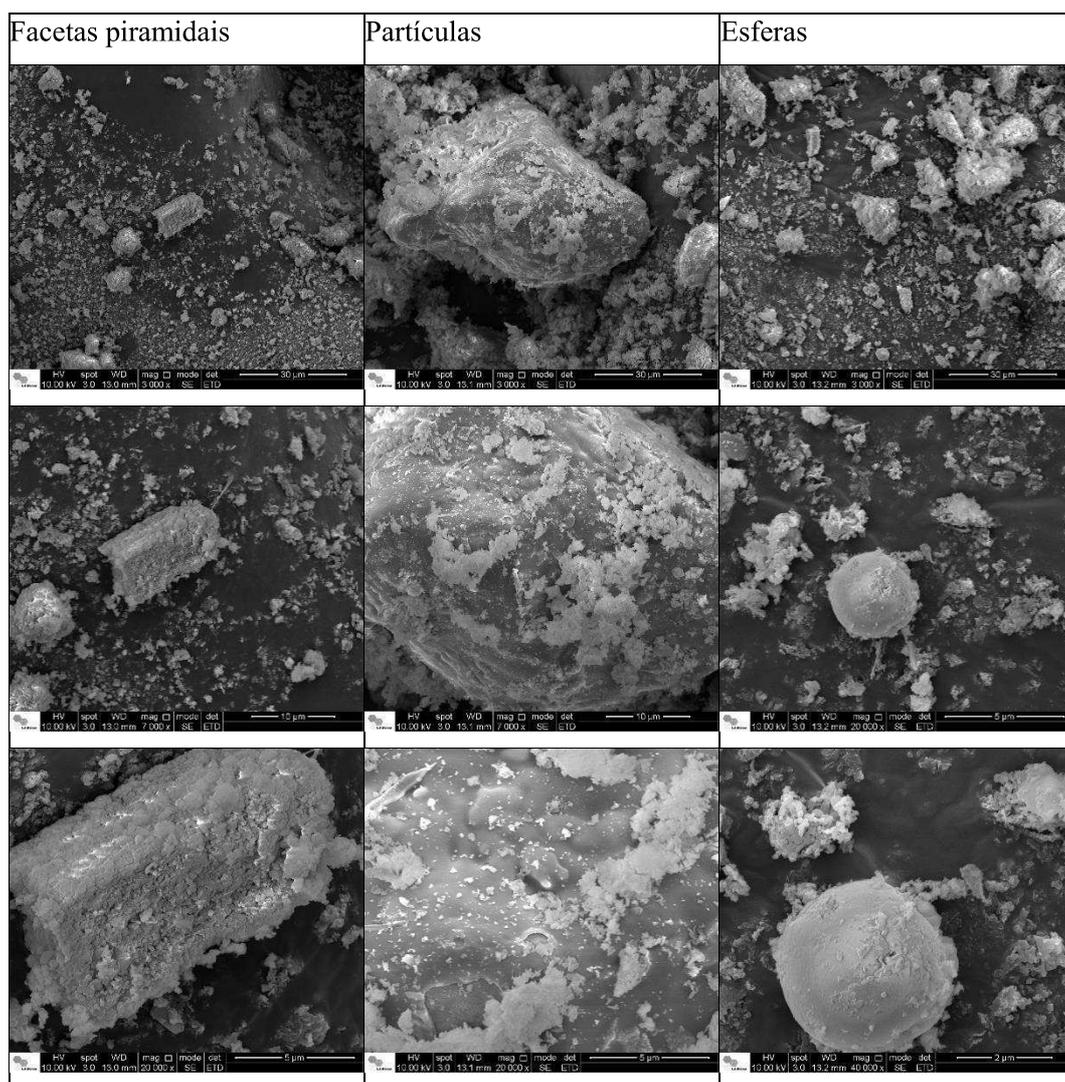


Figura 3. Micrografias das partículas encontradas com maior frequências nas amostras, em diferentes magnificações.

Na primeira coluna é possível observar as partículas de formato cristalino com diversos poros na superfície. Esta foi a partícula encontrada em maior proporção nas amostras.

Na segunda coluna é possível observar as partículas com paredes angulares e superfície lisa, conhecidas na literatura como silicatos (AHMARUZZAMAN, 2010), são apontadas como componentes comuns das cinzas (BLISSETT e ROWSON, 2012).

Na terceira coluna são encontradas as partículas esféricas conhecidas como cenosferas. A formação delas está associada à presença de carbono e metais nas amostras. Podem ser formadas pela presença de umidade na amostra (FOMENKO et al., 2015).

Na Figura 4 são observadas as micrografias com os resultados do mapeamento por EDS em diferentes espectros de adsorção obtidos a partir das estruturas encontradas nas amostras.

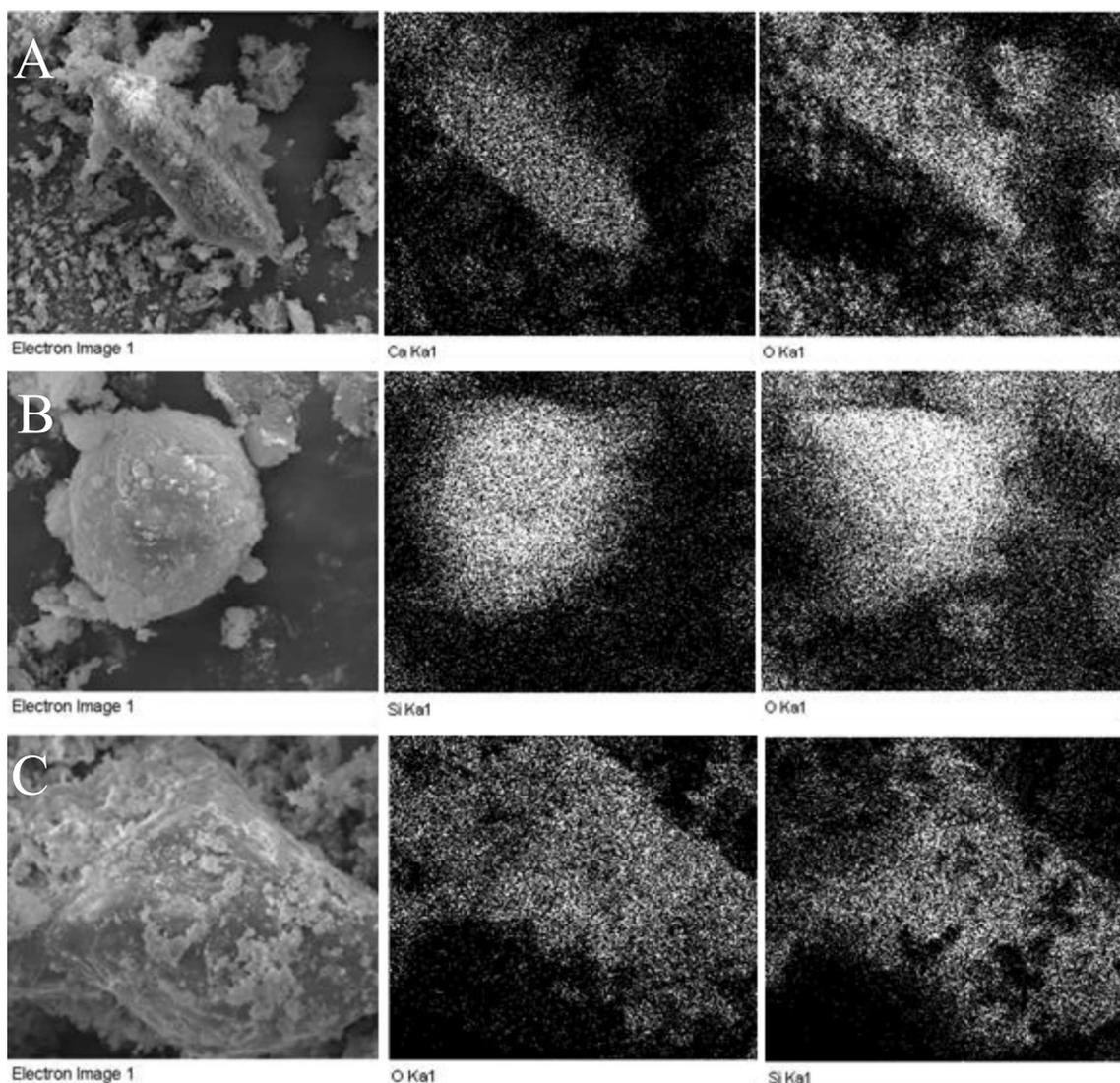


Figura 4. Micrografia das partículas de cálcio e sílica encontradas nas cinzas do eucalipto utilizando a técnica de Espectroscopia de Energia dispersiva nos espectros: Figura A. Partículas angulares de cálcio nos espectros o oxigênio de o cálcio; Figura B. Cenospheras nos espectros do oxigênio e do silício; Figura C. Silicatos nos espectros do oxigênio e do silício.

Foi possível verificar que em todos os tratamentos, as mesmas estruturas foram encontradas. O que possibilita constatar que os tratamentos resultaram em diferenças quantitativas nas contaminações, mas não qualitativas. As seguintes estruturas foram observadas: partículas com formatos regulares (4A), formatos esféricos (4B), e formatos angulares (4C). Os componentes identificados foram cálcio (4A), e sílica (4B e 4C). Estes componentes são encontrados com frequência nas cinzas de casca de eucalipto, e indicam a contaminação presente no material (GARCIA, 2014; GONZALES 2009; BORLINI, 2005).

## 2.6. CONCLUSÃO

Com este estudo foi possível caracterizar a casca de eucalipto como biocombustível. Foi identificada uma elevada quantidade de teor de cinzas no material (T3 = 13,86 %) que indica a contaminação. A maior quantidade de contaminação foi detectada nos menores tamanhos de partícula ( $< 250 \mu\text{m}$ ).

Os procedimentos testados para reduzir a contaminação no material foram lavagem com água e separação em diferentes tamanhos de partículas. O processo de lavagem não mostrou eficiência em relação à diminuição da contaminação em todos os tratamentos, apenas nas menores granulometrias estudadas ( $< 250 \mu\text{m}$ ). O processo de separação em diferentes tamanhos de partícula teve um melhor resultado e melhorou a eficiência energética da biomassa analisados. Desta forma, é possível indicar o processo de separação mecânica para reduzir o teor de cinzas das biomassas.

## **CAPÍTULO 3 - CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DE DIVERSOS RESÍDUOS UTILIZADOS PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA EM UMA INDÚSTRIA DE PAINÉIS DE MADEIRA**

### **3.1. RESUMO**

O objetivo do trabalho foi a caracterização físico-química das biomassas utilizadas para a geração de energia, em uma indústria de painéis de madeira reconstituída. Os materiais avaliados foram biomassas de: casca de eucalipto, cavaco, reciclado (resíduos de construção civil) e pó de serra. Todos os materiais foram submetidos à determinação do teor de umidade, classificação granulométrica, análise imediata e poder calorífico superior (PCS), nas condições iniciais de coleta. A casca de eucalipto, material considerado mais importante devido ao maior volume, passou por tratamentos para potencializar a geração de calor. Foram realizados três tratamentos quanto ao tamanho das partículas: E1 (>2 mm), E2 (<2 mm e >0,84 mm) e E3 (<0,84 mm), e calculados o teor de cinzas e poder calorífico superior. Paralelamente, foram realizados 11 tratamentos quanto ao teor de umidade da casca, T1 (0%), T2 (10%), T3 (20%), T4 (30%), T5 (40%), T6 (50%), T7 (60%), T8 (70%), T9 (80%), T10 (90%), T11 (100%), o PCS foi calculado para todos os tratamentos. Os materiais apresentaram teor de umidade com grande variação, de 4% (pó de serra) à 73% (casca de eucalipto). A análise imediata da casca revelou contaminação no material com um teor de cinzas de 20,58%. Com a separação em estratos granulométricos, foi possível reduzir o teor de cinzas em 50%. O ajuste do teor de umidade resultou em ganhos significativos na geração de calor, com diferenças de até 100%. Foi possível verificar que os métodos foram eficientes para a redução na contaminação e potencialização do poder calorífico superior.

Palavras-chave: biomassa, contaminação, teor de cinzas, poder calorífico superior.

### **3.2. ABSTRACT**

The objective of this study was the physico-chemical characterization of the biomass used for energy generation in a wooden panels industry; optimize the energy potential of biomass through particle size separation and adjusting the moisture content. The materials tested were the biomasses: eucalyptus bark, wood chips, recycled

(construction waste) and sawdust. All the materials were submitted to the determination of moisture content, particle size classification, proximate analysis and high heating value, with the initial conditions of collection. The bark which is the material with higher generation in the company, went through treatments to enhance the generation of heat. Three treatments on the particle size were performed: E1 (> 2 mm), E2 (<2 mm and > 0.84 mm) and E3 (<0.84 mm), and the ash content and high heating value were calculated. At the same time, eleven treatments regarding the moisture content of the bark, were performed: T1 (0%), T2 (10%), T3 (20%), T4 (30%), T5 (40%), T6 (50%), T7 (60%), T8 (70%), T9 (80%), T10 (90%), T11 (100%) and the high heating value was calculated for all treatments. The materials presented moisture content with great variation, from 4% (sawdust) to 73% (bark). The proximate analysis of the bark revealed the contamination in the material, 20.58% ash content. With the particle size separation in extracts, it was possible to reduce the ash content by half. The adjustment of the moisture content resulted in significant gains in the heat generation, with differences of 100%. It was possible to verify that the methods were effective for reduction in contamination and to enhance the high heating value.

Keywords: biomass, contamination, ash content, high heating value.

### 3.3. INTRODUÇÃO

A busca por alternativas renováveis para substituir os combustíveis fósseis na geração de energia é uma preocupação atual e de todos os setores industriais. O setor de árvores plantadas pode ser considerado como adiantado neste quesito, pois gera a maior parte da energia que demanda a partir da própria biomassa. Em 2014 o setor gerou 67% da energia que consumiu (IBÁ, 2015).

A biomassa é definida como qualquer matéria proveniente de material orgânica, de origem animal ou vegetal e que conta com diversos objetivos, tais como a produção de energia (MMA 2014). Assim, pode-se utilizar como biomassa o lixo doméstico, resíduos agrícolas, florestais, entre outros.

A biomassa florestal mostra-se com grande perspectiva no mercado, uma vez que conta com tendências de aumento da produtividade, ampliando desta maneira, a sua acessibilidade (SIMONI & HOELFLICH, 2010). Conta com vantagens como a disponibilidade dos recursos, a rápida industrialização e a mão de obra acessível

(GOLDEMBERG & LUCON, 2007), além de não emitir dióxido de enxofre durante sua combustão, causando menores danos ambientais quando em comparação com combustíveis fósseis (GRAUER & KAWANO, 2008).

No Brasil são geradas por volta de 41 milhões de toneladas de resíduos de base florestal, provindo da indústria de processamento de madeira e da colheita florestal (IBÁ, 2015). Este número representa um padrão ambientalmente correto, mesmo quando comparado com outros tipos de energia renovável, pois não somente utiliza fontes renováveis, mas especificamente resíduos (HALDER, 2014). Desta forma é possível verificar o potencial do país para o emprego e desenvolvimento de técnicas na produção de energia das formas mais diversas (ALVES et al., 2015; LENÇO, 2010).

Os resíduos podem ser utilizados como combustíveis em caldeiras que são equipamentos que possibilitam a transformação da energia da biomassa em energia térmica (calor). Permitem também o processo de cogeração, ou seja, geração de energia elétrica e térmica (SORDI et al., 2002). O processo de geração de energia em caldeiras pode ser influenciado por inúmeros fatores, como o tempo de funcionamento do equipamento, o custo com os estoques, a proporção das misturas nos materiais combustíveis, e as características gerais da biomassa em questão. Estas variações podem levar a margens de erro, elevando o custo de forma desnecessária, além de gerar variações na produção de calor (ROCCO & MORABITO, 2012). Alguns problemas podem surgir com estas variações, como é o caso de aumento na manutenção, corrosão das estruturas e espessamento da parede, prejudicando a passagem de calor (GARCIA et al., 2014).

Ao empregar a biomassa para a produção de energia, é necessário avaliar aspectos que influenciem no comportamento do material, de forma que a escolha seja feita de acordo com a finalidade proposta, seja esta menor geração de resíduos, maior geração de calor ou até disponibilidade dos recursos na região (SIMONI & HOELFLICH, 2010). Pontos importantes como poder calorífico, teor de umidade, composição química, granulometria devem ser estimados uma vez que estão interligados e quando alterados, podem resultar em ganhos ou perdas no processo.

O teor de umidade é um aspecto da biomassa que deve ser analisado antes da sua utilização. É conhecida a relação inversamente proporcional entre a geração de calor e o teor de umidade (LIMA et al., 2008; FURTADO et al., 2012). O teor de umidade, quando em valores acima de 20%, pode fazer com que o material não apresente o seu

potencial energético, uma vez que a eficiência é alterada pela perda do calor que é requerido para, primeiramente, realizar a evaporação da água presente (JIMÉNEZ & GONZÁLEZ, 1991). A composição de elementos orgânicos e inorgânicos também pode afetar não só no poder calorífico, mas também na trabalhabilidade do material, provocando desgastes nos equipamentos e formando resíduos no processo (YAMAN, 2004). Já a distribuição granulométrica do material pode implicar em heterogeneidade na performance energética, provocando oscilações no processo (BRAND, 2007).

O objetivo do trabalho foi a caracterização físico-química de todas as biomassas utilizadas para a geração de energia, em uma empresa produtora de painéis de madeira reconstituída. Os objetivos específicos foram viabilizar a geração de energia da biomassa por meio da separação granulométrica e verificar a influência do teor de umidade no poder calorífico superior.

#### 3.4. MATERIAIS E MÉTODOS

As biomassas analisadas foram coletadas em uma empresa na cidade de Salto/SP. Os materiais utilizados foram: a casca de eucalipto, obtida após o descascamento das toras, procedente de plantios do híbrido *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*, com sete anos de idade.; o pó de serra, resíduo do processo de formação dos painéis; o cavaco, matéria-prima para a formação dos painéis; e o material denominado reciclado, proveniente da compra de resíduos de construção civil da região de Salto / SP, Figura 1.

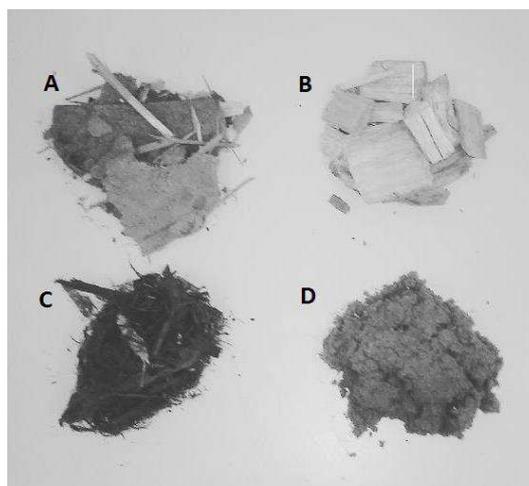


Figura 1. Biomassas coletadas na empresa. A: Resíduo de construção civil; B: Cavaco; C: Casca de eucalipto; D: Pó de serra.

O ensaio para verificar a influência do teor de umidade no poder calorífico superior (PCS) foi realizado com a casca de eucalipto. Foi realizado o ajuste do teor de umidade resultando em dez tratamentos: T1 (0%), T2 (10%), T3 (20%), T4 (30%), T5 (40%), T6 (50%), T7 (60%), T8 (70%), T9 (80%), T10 (90%), T11 (100%)

A casca de eucalipto também foi utilizada para verificar a influência da granulometria do material na eficiência energética. Foi feita a separação granulométrica da casaca de eucalipto, resultando em três tratamentos: E1 (>2 mm), E2 (<2 mm e >0,84 mm) e E3 (<0,84 mm).

#### 3.4.1. Determinação do teor de umidade

O teor de umidade foi determinado nas condições em que os materiais se encontravam no momento da coleta. Os ensaios foram realizados conforme a norma ABNT NBR 8112/86. As biomassas foram pesadas em uma balança semi-analítica, e posteriormente inseridas em uma estufa à  $105 \pm 2^\circ\text{C}$ . Foram feitas pesagens até os materiais apresentarem massa constante. O teor de umidade foi calculado em base seca, conforme a equação (1):

$$TU = \frac{(Pu - Ps)}{Ps} * 100 \quad (1)$$

Onde TU: teor de umidade em base seca; Pu: peso úmido; Ps: peso seco.

#### 3.4.2. Classificação granulométrica

A distribuição granulométrica foi realizada em um agitador de peneiras com batidas intermitentes Marconi MA-750. Foram utilizadas as peneiras com abertura de 50,80 mm, 25,40 mm, 12,70 mm e 6,35 mm para casca de eucalipto, cavaco e reciclado. Para o pó de serra foram utilizadas as peneiras de 4 mm, 2 mm, 0,85 mm e 0,42 mm. A classificação granulométrica foi feita com base na norma ABNT NBR NM 248/2003.

#### 3.4.3. Análise imediata

Na análise imediata, foi determinado o teor de cinzas, conforme a norma ASTM D1102-84 (2013), e o teor de materiais voláteis, conforme a norma ABNT NBR 8112/86. O teor de carbono fixo foi calculado segundo a equação (2):

$$TCF = 100 - (TC + TV) \quad (2)$$

Onde  $TCF$  = teor de carbono fixo (%);  $TC$  = teor de cinzas (%); e  $TV$  = teor de materiais voláteis (%).

#### 3.4.4. Poder calorífico superior

O poder calorífico superior (PCS) foi obtido no calorímetro IKA C200 com base nos padrões da norma ASTM D5865-13. O PCS de todos os materiais foi calculado com o teor de umidade em que a biomassa é utilizada pela empresa, conforme calculado em item 3.4.1.

### 3.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.5.1. Teor de Umidade

Os valores encontrados para o teor de umidade em base seca podem ser visualizados a seguir, Tabela 1:

Tabela 1. Resultados obtidos quanto ao teor de umidade de todos os materiais utilizados pela indústria de painéis.

Material	Teor de umidade (%)
Casca	73,0 ( $\pm 3,4$ )
Cavaco	62,0 ( $\pm 1,7$ )
Reciclado	20,0 ( $\pm 1,3$ )
Pó de serra	4,0 ( $\pm 0,13$ )

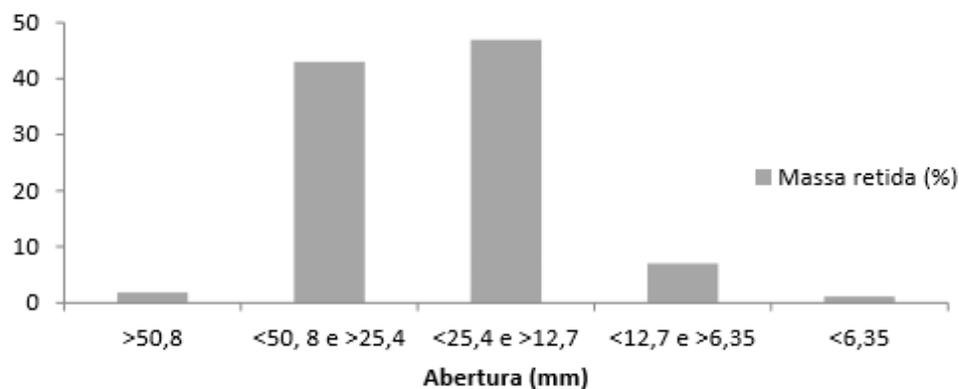
É possível verificar que os resultados se mostraram heterogêneos, e com valores de teor de umidade altos. O indicado para o uso em energia, é que o teor de umidade esteja abaixo de 20% (FARINHAQUE, 1981). Na empresa não existe um processo de secagem para as biomassas. O material é depositado em pátio aberto e ficam sujeitas às condições meteorológicas. Desta forma, foi possível estimar que os materiais, cavaco e casca de eucalipto não terão bom desempenho energético.

#### 3.5.2. Distribuição granulométrica

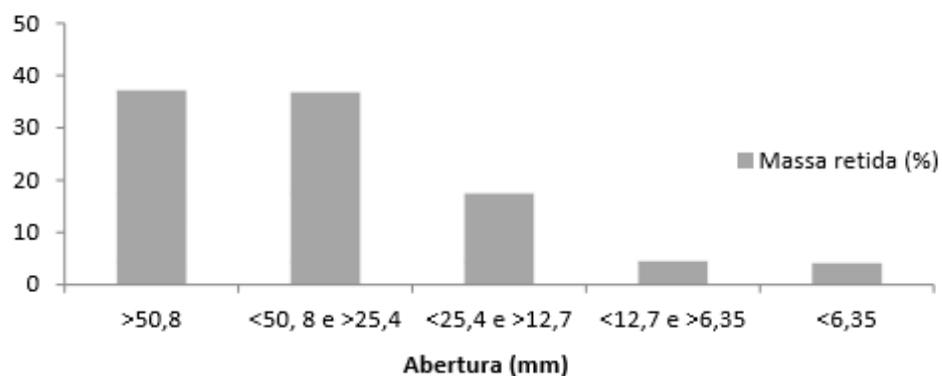
As distribuições granulométricas podem ser visualizadas na figura 2. O método da análise granulométrica por meio do peneiramento mecânico é uma técnica de muito

utilizada atualmente, em função da simplicidade de procedimento e confiabilidade quando empregado da forma correta (JORDAN et. al, 2016).

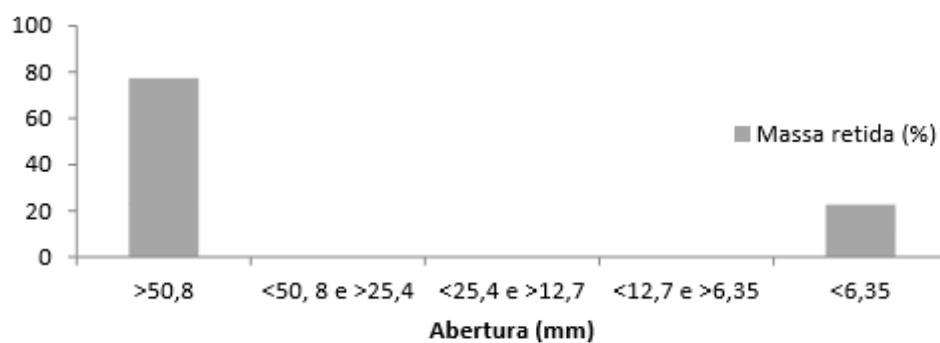
### Cavaco



### Reciclado



### Casca



### Pó

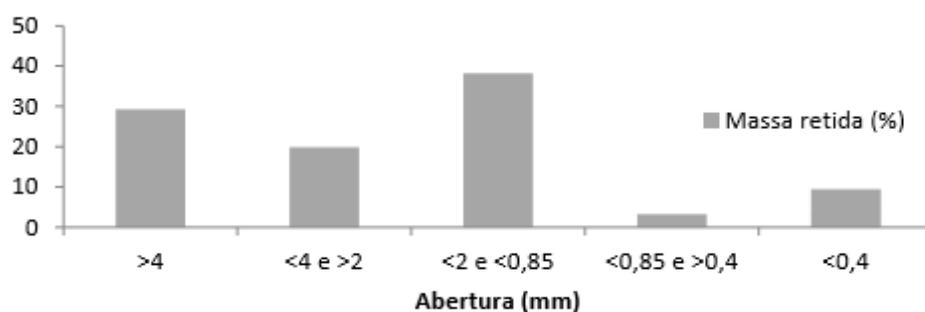


Figura 2. Distribuição granulométrica dos quatro materiais utilizados para a queima na empresa.

O tamanho das partículas da biomassa pode influenciar no potencial energético. As menores dimensões podem proporcionar maior índice de perda de massa, o que acarreta em diminuição da permanência do calor no sistema. Por outro lado as menores partículas se aquecem de forma mais uniforme, aumentando a previsibilidade térmica do processo (AKHTAR & AMIN, 2012).

### 3.5.3. Análise química imediata e PCS

A análise química imediata e o PCS foram realizados para todos os materiais, e os resultados podem ser verificados na tabela 1.

Tabela 1. Análise imediata dos materiais combustíveis utilizados na empresa.

Material	Teores (%)			
	Cinzas	Voláteis	Carbono fixo	PCS (J/g)
Cavaco	1,09 ( $\pm 0,21$ )	81,56 ( $\pm 0,36$ )	17,34 ( $\pm 0,16$ )	11782 ( $\pm 34$ )
Casca	20,58 ( $\pm 0,24$ )	61,27 ( $\pm 0,12$ )	18,15 ( $\pm 0,25$ )	7964 ( $\pm 38$ )
Reciclado	2,24 ( $\pm 0,10$ )	79,20 ( $\pm 0,19$ )	18,55 ( $\pm 0,28$ )	15984 ( $\pm 133$ )
Pó	0,78 ( $\pm 0,08$ )	80,32 ( $\pm 0,64$ )	18,89 ( $\pm 0,62$ )	18187 ( $\pm 160$ )

Foi possível verificar diferenças significativas entre a composição dos materiais utilizados pela empresa. O teor de cinzas da casca de eucalipto foi 26 vezes superior ao pó de serra. O teor de cinzas é a porção do material formado pelos materiais minerais, como alumínio, sílica e cálcio que não contribuem para com a combustão, (THY, 2009). O teor de cinzas quando em valores altos (acima de 3%) pode indicar uma contaminação com terra ou areia. Vale et al. (2002), estudaram diversas espécies e encontraram diferenças de até 18 vezes no teor de cinzas, entre a madeira, e a casca da mesma espécie. O indicado neste caso, é que se promova algum tipo de tratamento, uma vez que as cinzas podem corroer estruturas e diminuir a capacidade térmica de equipamentos como caldeiras (PEREIRA et al., 2000).

O teor de voláteis indica a porção do material que deve dar início à combustão. É a fração liberada no princípio da combustão e influencia diretamente na capacidade térmica do material. Quando presente em teores representativos na biomassa pode iniciar a combustão em temperaturas mais baixas (NOGUEIRA & LORA 2010). Os

valores de teor de voláteis para os resíduos de madeira podem ser variáveis, de acordo com a origem do material. Paula (2010) apresentou valores de 78 a 83% para resíduos de madeira, Souza et al. (2012) apresentou valores de 82 a 86%. Os resultados mostram que o teor de voláteis dos resíduos estudados neste trabalho estão próximos dos descritos na literatura, destacando o potencial energético dos materiais analisados. A casca de eucalipto apresentou teores de voláteis relativamente mais baixos, em função do alto teor de contaminação, o que elevou o teor de cinzas encontrado.

O teor de carbono fixo é a porção do material que deve permanecer em queima mesmo após a saída de todos os componentes voláteis, orgânicos e inorgânicos. O carbono fixo é responsável pela queima vagarosa na fase sólida, desta forma mantém o material em queima por um período maior do que o teor de voláteis (BRITO & BARRICHELO, 1978). É esperado que para resíduos florestais, o valor esteja entre 10 e 30% para o teor de carbono fixo (NOGUÉS, 2010). Quanto maior for o teor de carbono fixo, maior o tempo da combustão do material, resultando em maior permanência nos aparelhos de queima (BRITO & BARRICHELO, 1982). Todos os materiais aqui analisados estão de acordo com o descrito na literatura.

Quanto ao poder calorífico, é possível constatar uma diferença de 77% entre a biomassa com maior PCS (pó de serra) e a com menor PCS (casca). Esta diferença faz com que a inserção da casca na caldeira prejudique a geração de calor. Foi constatado pela empresa que não ocorre o consumo de toda casca gerada, fazendo com que as outras biomassas sejam inseridas na mistura.

Com a finalidade de se estabelecer em qual porção do material há maior quantidade de impurezas, a casca foi separada em estratos granulométricos. Após a separação mecânica, foi possível verificar a maior porcentagem do material retida na peneira de 4 mm (75%), nas peneiras de 2 a 0,84 mm apenas 11% do material foi retido, e o restante apresentou partículas menores de 0,84 mm (14%), Figura 2.

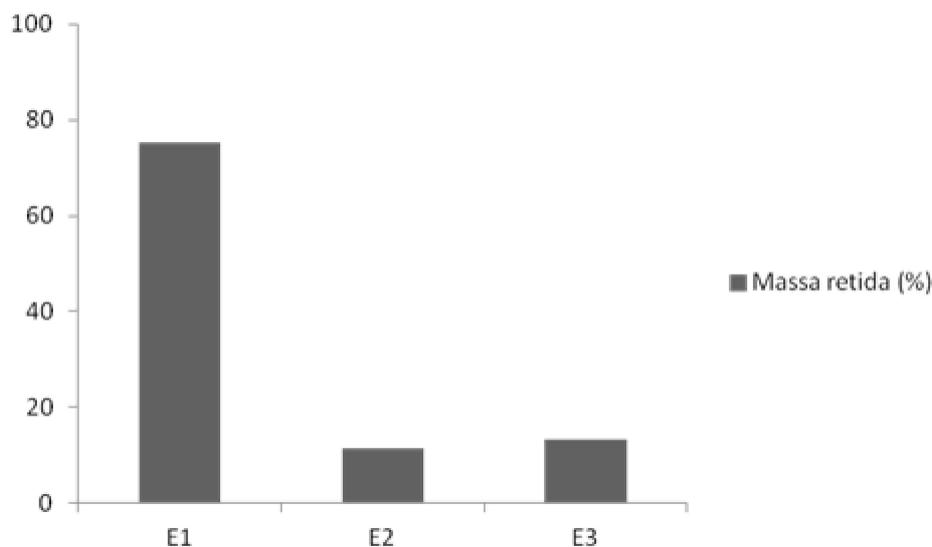


Figura 3. Distribuição granulométrica da casca.

A partir da distribuição granulométrica estabelecida, foi calculado o teor de cinzas para os diferentes estratos granulométricos formados, e o poder calorífico superior, Tabela 2.

Tabela 2. Determinação teor de cinzas para os estratos granulométricos estabelecidos, E1 (>2 mm), E2 (<2 mm e >0,84 mm) e E3 (<0,84 mm). Poder calorífico calculado para os estratos estabelecidos. As letras distintas após o desvio-padrão indicam que a 5% de significância, as médias apresentaram diferença significativa pelo teste Tukey.

Granulometria	Teor de cinzas (%)	Poder calorífico superior (J.g <sup>-1</sup> )
E1	9,30 c (±0,39)	16583 a (±41,52)
E2	22,74 b (±0,86)	14189 b (±100,59)
E3	79,32 a (±1,52)	3517 c (±67,12)

Com a separação granulométrica foi possível obter uma diminuição no teor de cinzas nos estratos com maiores partículas (> 0,84 mm), com destaque em E1. Ateaga-Pérez e colaboradores (2015) encontraram para a casca, teor de cinzas de 9%, valor similar ao deste trabalho para o material E1.

O teor de cinzas total para esta amostragem foi calculado em 20,58%. Com a separação em estratos granulométricos, eliminando E3, o teor de cinzas no material total

seria de 9,48%. Desta forma, a empresa poderia diminuir em aproximadamente 50% o seu total de cinzas na casca. A partir deste resultado, foi possível verificar como a separação das partículas foi eficiente para a diminuição na contaminação da casca. A separação mecânica é uma prática indicada para a empresa no controle de contaminantes da biomassa.

#### 3.5.4. Poder calorífico Superior

Os resultados do poder calorífico superior em função do teor de umidade podem ser vistos na Figura 4.

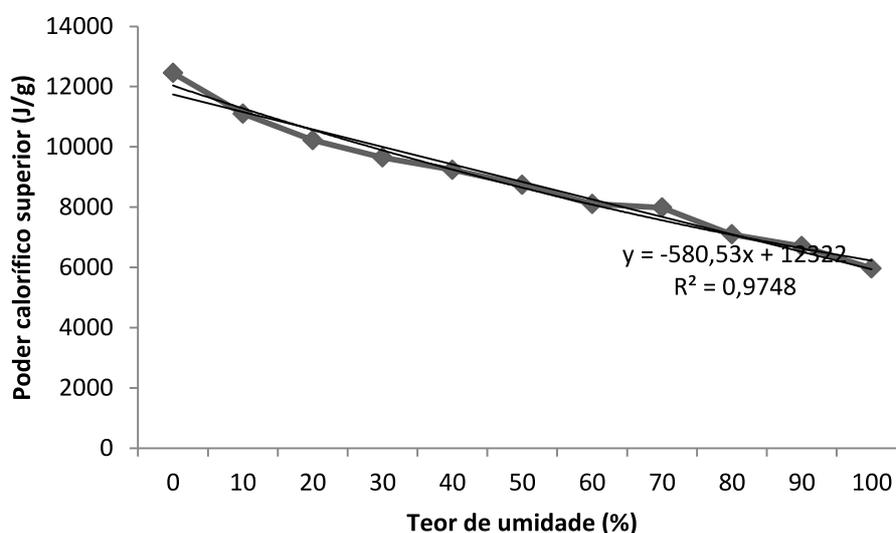


Figura 4. Variação do poder calorífico superior ( $J.g^{-1}$ ) com o ajuste do teor de umidade (%).

Foi possível verificar uma relação direta entre o poder calorífico e o teor de umidade ajustado. O teor de umidade se mostra inversamente proporcional à geração de calor. Isso ocorre uma vez que parte da massa analisada é composta por água, portanto não gera calor. Em adição a isso, a energia liberada na combustão é utilizada na evaporação da água presente na amostra, resultando em uma relação com linearidade não completa (LIMA *et al.*, 2008;).

Outra recomendação para o uso em escala industrial seria deixar o material perder parte da água ao ar livre. A casca é utilizada em uma umidade de 73% em base seca, caso o teor de umidade fosse reduzido pela metade, o poder calorífico teria um ganho de 25%. A madeira de eucalipto pode levar aproximadamente 240 dias para

reduzir seu teor de umidade de 83% para 19%, o que indica em um tempo menor, o ganho energético de 25% seria possível (REZENDE et al., 2010).

### 3.6. CONCLUSÃO

Com a caracterização dos materiais, foi possível observar que as biomassas são utilizadas sem o melhor aproveitamento energético do material. A casca, principal biomassa utilizada pela empresa, apresentou teor de contaminação elevado (teor de cinzas de 20,58%), e teor de umidade acima do indicado para geração de energia (teor de umidade de 73%). Os métodos utilizados neste estudo para otimizar o potencial energético da biomassa, indicaram que é possível melhorar as características energéticas dos combustíveis usados pela indústria. Foi possível reduzir o teor de contaminação pela metade com a separação granulométrica. Com o ajuste no teor de umidade, o poder calorífico superior pode apresentar valores com aumento de até 100%.

## **CAPÍTULO 4 - CONCLUSÕES GERAIS**

### **4.1 CONCLUSÃO**

Foi possível verificar o potencial energético de todos os resíduos avaliados neste trabalho. O material que apresentou maior dificuldade quanto à utilização para a geração de energia foi a casca de eucalipto. Considerações sobre as biomassas utilizadas:

- Casca: A utilização da casca para a geração de energia foi identificada como problemática para a empresa. Através da caracterização realizada neste estudo foi possível verificar os pontos negativos deste material para geração de energia, sendo estes:

-alto teor de substâncias contaminantes, o que influencia negativamente a geração de calor, e provoca processos corrosivos nas estruturas em que a biomassa é utilizada. Foram estudadas duas técnicas para a redução dos contaminantes no material, a lavagem com água e a separação granulométrica. As duas técnicas foram capazes de reduzir a contaminação, porém, a indicação é que se faça apenas a separação granulométrica, pois apresentou diferença significativa em todos os tratamentos e evita processos burocráticos ao se inserir água no processo.

-alto teor umidade, o teor de umidade encontrado para a casca foi de aproximadamente 70% em base seca, considerado alto para o uso em geração de calor. A casca é inserida na caldeira no momento em que é coletada, desta forma é utilizada com o teor de umidade elevado. Há uma relação direta entre o teor de umidade e o poder calorífico de um material, como foi possível verificar em Capítulo 3. A indicação para a utilização da casca com maior potencial energético é que se promova no material uma secagem previa ao uso.

- Pó de serra: O pó de serra é um material utilizado com condições satisfatórias para a geração de energia na empresa, com teor de umidade de aproximadamente 4% em base seca. A geração de calor é instantânea e a entrada da biomassa na caldeira deve ser controlada, de acordo com a temperatura que se deseja alcançar. A produção deste material é limitada uma vez que, é um resíduo do processo de produção de painéis.

- Cavaco: O cavado só é utilizado quando há problema na geração de calor, é matéria-prima para a produção dos painéis. É obtido com teor de umidade alto, aproximadamente 60% em base seca. A vantagem da utilização deste material é a

ausência de materiais contaminantes, já que é formado apenas pela madeira, sem a presença da casca. Porém, a utilização deste material, que não é um resíduo, gera custos para a empresa, tornando esta biomassa um material com agravantes econômicos.

- Resíduos de construção civil: o material reciclado é uma biomassa comprada pela empresa, e nas visitas ao longo de 2015 e 2016 foi informado que este era o material com maior utilização, 12000 ton/mês, em função das condições favoráveis em que a biomassa é recebida. Porém, ao fim desta pesquisa, início de 2017, foi informado que o material passou a não ser mais encontrado no mercado, obrigando a empresa a trocar esta biomassa por poda de árvore. A poda de árvore está em fase experimental na empresa.

## 4.2. REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004.

Resíduos sólidos – Classificação. 2004. 77 p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 248 -

Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8112 -

carvão vegetal - análise imediata. Rio de Janeiro, 1986. 5 p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8633 -

carvão vegetal - determinação do poder calorífico: método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984. 13 p.

AHMARUZZAMAN, M. A review on the utilization of fly ash. *Progress in Energy and Combustion Science* v. 36, p. 327-363. 2010.

AKHTAR, J.; AMIN, N.S. A review on operating parameters for optimum liquid oil yield in biomass pyrolysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v.16, n.7, p.5101-5109. 2012.

ALMEIDA, G.; BRITO, J. O.; PERRÉ, P. Alterations in energy properties of eucalyptus wood and bark subjected to torrefaction: The potential of mass loss as a synthetic indicator. *Bioresource Technology*, v. 101, p.- 9778-9784. 2010.

ALTEAGA-PÉREZ, L. E.; SEGURA, C.; BUSTAMANTE-GARCIA, V.; CÁPIRO, O. G.; JIMÉNEZ. Torrefaction Of Wood And Bark From Eucalyptus globulus and Eucalyptus nitens: Focus On Volatile Evolution Vs Feasible Temperature. v. 93, Part 2, p. 1731–1741. 2015.

ANDRADE, A.U. Tecnologias modernas para a fabricação de compensados. In: ENCONTRO INTERNACIONAL DE COMPENSADOS DE MADEIRA TROPICAL, v.1, p 117-123. 1992.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. Atlas de Energia Elétrica do Brasil. 3ª edição. 236 p. 2008.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D 1102-84 - Standard Test Method for Ash in Wood. 2007. 2 p.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D5865-13, Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke. 2013.

ALVES, M. F. A.; ALVES, F. A.; ALVES, L. R. A.; LIMA, G. A.; MOURA, E. F.; SILVA, M. M. M.; MELO, F. J. S. – A utilização de resíduos de arborização urbana como substituto aos fertilizantes na produção agrícola. INTESA (Pombal - PB - Brasil) v. 9, n. 1, p. 13-15. 2015.

BELINI, U. L.; TOMAZELLO FILHO, M.; LEITE, M. K.; WENDT, J. G. N.; LOUSADA, J. L. P. C.; GALVÃO, M. E. Diferentes biomassas para geração de energia na indústria de painéis de fibra: estudo de caso. In: XIV EBRAMEM. 8 p. 2014.

BLISSETT, R. S.; ROWSON, N. A. A review of the multi-component utilization of coal fly ash. Fuel, v.97, p. 1-23. 2012.

BORLINI, M. C.; SALES, H. F.; VIEIRA, C. M. F.; CONTE, R. A.; PINATTI, D. G.; MONTEIRO, S. N. Cinza da lenha para aplicação em cerâmica vermelha. Parte I: características da cinza. Cerâmica, v.5, p. 192-196. 2005.

BORGES, F.; SELLIN, N.; MEDEIROS, S. H. W. Caracterização e avaliação de lodos de efluentes sanitário e industrial como biomassa na geração de energia. Ciência & Engenharia, v.17, p. 27-32. 2008.

BRAND, M. A. Qualidade da biomassa florestal para o uso na geração de energia em função da estocagem. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

BRAND, M. A. Energia de Biomassa Florestal. Rio de Janeiro: Interciências. 2010. 131 p.

BRASIL, Ministério do Trabalho e Emprego. Norma Regulamentador nº 13 Caldeiras, Vasos de Pressão e Tubulações. 2014.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Carvão vegetal de madeira de desbaste de Pinus. Circular Técnica IPEF, v. 146, p. 1-12. 1982.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Características do eucalipto como combustível: análise química imediata da madeira e da casca. IPEF n.16, p.63-70, 1978.

BRITO, J. O.; COUTO, H. T. Z.; FAZZIO, E. C. M.; CORRADINI, L.; CARRARA, M. A. MIGLIORINI, A. J. Avaliação das características dos resíduos de exploração florestal do eucalipto para fins energéticos. IPEF, Circular Técnica 72. 1979.

CASSOL, G.; MELO, L. C.; MENDES, F. S.; FONSECA, R.; SANQUETTA, C. R. Redução de emissões de CO<sub>2</sub> pela produção de biocombustíveis a partir de óleo de dendê na Amazônia brasileira.

CHEN, M.; YU, D.; WEI, Y. Evaluation on ash fusion behavior of eucalyptus bark/lignite blends. Powder Technology, v. 286, p. 39-47. 2015. Floresta, v.46, p. 135-144. 2015.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; TAVARES, L. M.; FAIRBAIRN, E. R. M. Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars. Cement & Concrete Composites, v.30, p. 410-418. 2008.

CORTEZ, C. L.; VELÁZQUEZ, S. M. S. G.; COELHO, S. T.; MOREIRA, J. R.; AMENDOLA, F. C. B.; GAVIOLI, F. Análise do processo produtivo do eucalipto no sistema “short rotation” para uso como combustível em uma usina termoeletrica. In: IV Congresso Internacional de Bioenergia. 2009.

EIA, Energy Information Administration. Electricity supply, disposition, prices and emissions. 2015. Disponível em: <<http://tinyurl.com/qdg2wj2>>. Acesso em janeiro de 2016.

EUFRADES JÚNIOR, H. J.; OGURI, G.; MELO, R. X.; BALLARIN, A. W.; GUERRA, S. P. S. Storage of whole-tree chips from high-density energy plantations of Eucalyptus in Brazil. *Biomass and Bioenergy*, v. 93, p. 279-283. 2016.

EROL, M.; HAYKIRI-ACMA, H.; KBAYRAK, S. K. Calorific value estimation of biomass from their proximate analyses data. *Renewable Energy* p. 170–173. 2010.

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

FOMENKO, E. V.; ANSHITS, N. N.; PANVOKA, M. V.; SOLOVYOV, L. A.; ANSHITS, A. G. Fly Ash Cenospheres: Composition, Morphology, Structure, and Helium Permeability. *World of Coal Ash (WOCA) Conference*, p. 9-12. 2011.

FONTES, P. J. P. Auto-suficiência Energética em Serraria de Pinus e Aproveitamento dos Resíduos. Dissertação de Mestrado. UFPR; Curitiba, 1994.

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

FURTADO, T. S.; FERREIRA, J. C.; BRAND, M. A.; NEVES, M. D. Correlação entre teor de umidade e eficiência energética de resíduos de pinus taeda em diferentes idades. *Árvore*, v.36, p. 577-582. 2012.

GARCIA, R.; PIZARRO, C.; LAVÍN, A. G.; BUENO, J. L. Spanish biofuels heating value estimation. Part II: Proximate analysis data. *Fuel*, v. 117, p. 1139-1147. 2014.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. – Energia e meio ambiente no Brasil. *Estudos Avançados*, p. 7-20 v.5. 2007.

- GOMINHO, J.; LOURENÇO, A.; MIRANDA, I.; PEREIRA H. Chemical and fuel properties of stumps biomass from Eucalyptus globulus plantations. *Industrial Crops and Products*, p. 12-16. 2012.
- GONÇALVES, J. E.; SARTORI, M. M. P.; LEÃO, A. L. – Energia de briquetes produzidos com rejeitos de resíduos sólidos urbanos e madeira de Eucalyptus grandis. *Revista Brasileira Engenharia Agrícola Ambiental*, v. 13, p.657-661. 2009.
- GONZÁLEZ, A.; NAVIA, R.; MORENO, N. Fly ashes from coal and petroleum cokecombustion: current and innovative potential applications, *Waste Management & Research*, v. p. 976-987. 2009.
- GRAUER, A.; KAWANO, M. Aproveitamento de resíduos para biomassa é rentável. *Revista da Madeira*, n. 110, 2008.
- HALDER, P. Perceptions of energy production from forest biomass among school students in Finland: Directions for the future bioenergy policies. *Renewable Energy*, v.68, p. 372- 377. 2014.
- HANSTED, A. L. S.; NAKASHIMA, G. T.; MARTINS, M. P.; YAMAMOTO, H.; YAMAJI, F. M. Comparative analyses of fast growing species in different moisture content for high quality solid fuel production. *Fuel*, v. 15 p. 180–184. 2016.
- HWANG, J. Y.; SUN, X.; LI, Z. Unburned Carbon from Fly Ash for Mercury Adsorption: I. Separation and Characterization of Unburned Carbon. *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, v.1, p. 39-60. 2002.
- IBÁ, Indústria Brasileira de Árvores. 100 p. 2014.
- IBÁ, Indústria Brasileira de Árvores. 80 p. 2015.
- INTERNATIONAL PAPER, Relatório Técnico - Caldeira de Biomassa Autossuficiência energética e sustentabilidade do negócio. 2015. 20 p.
- JIMÉNEZ, L.; GONZÁLEZ, F. Study of the physical and chemical properties of lignocellulosic residues with a view to the production of fuels. *Fuel*, v. 70, p. 947-950, 1991.

JOHN, V. M.; AGOPYAN, V. Reciclagem de resíduos de construção. CETESB, 2000. 13p.

Reciclagem de resíduos da construção Vanderley M. John (1), Vahan Agopyan (2)

JORDAN, R. A.; BALDASSIN JUNIOR, R.; CORTEZ, L. A. B.; MOTOMIYA, A. V. A. Caracterização Granulométrica De Biomassa Polidispersa Pelo Método De Peneiramento Mecânico. Eng. Agríc., v.36, n.1, p.102-113. 2016.

LENÇO, P. C. Caracterização do bagaço de cana-de-açúcar para geração de energia. 2010. 181f. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

LOPES, G. A.; BRITO, J. O.; MOURA, L. F. Uso energético de resíduos madeireiros na produção de cerâmicas no estado de São Paulo. Ciência Florestal, v. 26, p. 679-686. 2016

LIMA, E. A.; ABDALA, E. M.; WENZEL, A. A. Influência da Umidade no Poder Calorífico Superior da Madeira. Comunicado Técnico EMBRAPA. 2008. 3p.

MONTES, C. S.; SILVA, D. A.; GARCIA, R. A; MUÑIS, G. I. B.; WEBERA, J. C. Calorific value of *Prosopis africana* and *Balanites aegyptiaca* wood: Relationships with tree growth, wood density and rainfall gradients in the West African Sahel. Biomassa and bioenergy . p. 346-353. 2011.

MMA, Ministério do Meio Ambiente. Energias Renováveis – Biomassa. Disponível em: < <http://www.mma.gov.br/clima/energia/energias-renovaveis/biomassa>>. Acesso set de 2014.

MME, Ministério de Minas e Energia. Resenha Energética Brasileira- Exercício de 2014. 32 p. 2015.

MME, Ministério de Minas e Energia. Balanço Energético Nacional 1996. 130 p. 1996.

NASCIMENTO, M. D.; BIAGGIONI M. A. M. – Avaliação energética do uso de lenha e cavaco de madeira para a produção de energia em agroindústria Seropédica. Revista Energia na Agricultura, 2010.

- NEMATOLLAHI, O.; HOGHOOGHI, H.; RASTI, M.; SEDAGHAT, A. Energy demands and renewable energy resources in the Middle East. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. p. 1172–1181. 2016.
- NOGUEIRA, L. A. H.; LORA, E. E. S. *Dendroenergia: fundamentos e aplicações*. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2010. 199 p.
- NOGUÉS, F.; GARCÍA D.; REZEAU, A. Energía de la biomassa. *Textos Docentes*, v. 1, p. 125-143. 2010.
- NÚÑES-REGUEIRA, L.; PROUPÍN-CASTIÑEIRAS, J; RODRÍGUEZ- AÑON, J. A. Energy evaluation of forest residues originated from *Eucalyptus globulus* Labill in Galicia. *Bioresource Technology*, v. 82, p. 5-13. 2002.
- OLANDOSKI, D.P. *Rendimento, resíduos e considerações sobre melhorias no processo em indústrias de chapas compensadas*. 85 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2001.
- PAULA, L. E. R. *Produção e avaliação de briquetes de resíduos lignocelulósicos*. 72 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira). Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.
- PEREIRA, J. C. D.; STURION, J. A.; HIGA, A. R.; SHIMIZU, J. Y. – *Características Da Madeira De Algumas Espécies De Eucalipto Plantadas No Brasil*. Colombo: Embrapa Florestas, 2000. 113p.
- PROTÁSIO, T. P.; BUFALINO, L.; TONOLI, G. H. D.; COUTO A. M.; TRUGILHO, P. F.; GUIMARÃES JUNIOR M. *Relação entre o poder calorífico superior e os componentes elementares e minerais da biomassa vegetal*. *Pesquisa Florestal Brasileira*. Colombo, v. 31, n. 66, p. 113-122. 2011.
- RAGLAND, K. W.; AERTS, D. J.; BAKER. *Properties of wood for combustion analysis*. *Bioresour Technology*, v. 37. P. 161-168. 1991.
- REZENDE, R. N.; LIMA, J. T.; E PAULA, L. E. R.; FARIA, A. L. R. *Secagem ao ar livre de toras de *Eucalyptus grandis* em Lavras, MG*. *Cerne*, v. 16, p. 41-47. 2010.

- REZENDE, R. N.; LIMA, J. T.; PAULA, L. E. R.; da SILVA, J. R. M. Efeito da vaporização na secagem de tábuas de *Eucalyptus grandis*. *Cerne*, v.21, n.1. 2015.
- ROCCO, C. D.; MORABITO, R.. An optimization model for the operations of steam production in industrial boilers. *Gest. Prod.*, v. 19, n. 2. 2012 .
- SABATTI, M.; FABBRINI, F.; HARFOUCHEA, A.; BERITOGNOLA, I.; MARESCHI, L.; CARLINI, M.; PARIS, P.; SCARASCIA-MUGNOZZA, G. Evaluation of biomass production potential and heating value of hybrid poplar genotypes in a short-rotation culture in Italy. *Industrial Crops and Products*. p. 62–73. 2014.
- SANTOS, L. C.; CARVALHO, A. M. M. L.; PEREIRA, B. L. C.; OLIVEIRA, A. C.; CARNEIRO, A. C.; TRUGILHO, P. F. Propriedades da madeira e estimativas de massa, carbono e energia de clones de *Eucalyptus* plantados em diferentes locais. *Ver. Árvores*, v. 36, n. 5, 2012.
- SIMONI, F. J.; HOEFLICH, V. A. – Cadeia produtiva de energia de biomassa na região do Planalto Sul de Santa Catarina: uma abordagem prospectiva. *Rev. Árvore*, v. 34, n. 6, 2010.
- SARIN, V.; PANT, K. K. Removal of chromium from industrial waste by using eucalyptus bark. *Bioresource Technology*, v.97, p.15-20. 2006.
- SORDI, A., SOUZA, S. N.M., GALDINO, A. P.M. et al. – Planta de cogeração num frigorífico de francos com cavaco de pinus como fonte primária: 4º Encontro de Energia no Meio Rural.. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 4., 2002, Campinas.
- SOUZA, M. M.; SILVA, D. A.; ROCHADELLI, R.; SANTOS, R. C. Estimativa de poder calorífico e caracterização para uso energético de resíduos da colheita e do processamento de *Pinus taeda*. *FLORESTA*, v. 42, n. 2, p. 325 - 334. 2012.
- THY, P.; JENKINS, B. M.; GRUDYIG, S.; SHIRAKI, R.; LESHER, C. E. High Temperature Elemental Losses And Mineralogical Changes In Common Biomass Ashes. *Fuel*, v. 85, n. 6, p. 783-795. 2009.

TODARO, L.; RITA, A.; CETERA, P.; D'AURIA, M. Thermal treatment modifies the calorific value and ash content in some wood species. *Fuel*, v. 140 p. 1-3. 2015.

TORREIRA, R. P. Geradores de vapor. São Paulo: Companhia de Melhoramentos, 1995. p. 131-230.

VALE, A. T.; BRASIL, M. A. M.; LEÃO, A. L. Quantificação E Caracterização Energética Da Madeira E Casca De Espécies Do Cerrado. *Ciência Florestal*, v. 12, n. 1, p. 71 -80. 2002.

VANLOO, S., KOPPEJAN, J. Handbook of Biomass Combustion and Co-Firing. Twente University Press, Enschede, Netherlands. ISBN: 9036517737. 2002.

VASSILEV, S. V.; VASSILEVA, G. C. A new approach for the classification of coal fly ashes based on their origin, composition, properties, and behaviour. *Fuel* v.86, p. 1490-1512. 2007.

VITAL, M. H. F. Impacto Ambiental de Florestas de Eucalipto. *Revista do BENDES*, v. 14. p. 235-276. 2007.

YAMAN, S. Pyrolysis of biomass to produce fuels and chemical feedstocks. *Energy Conversion & Management*, v. 45, n. 5, p. 651-671. 2004.

ZENID, G. J. Madeira na construção civil. IPT, 2011. 8p.