

## **Curso de Tecnologia em Biocombustíveis**

# **CARACTERIZAÇÃO FÍSICO- QUÍMICA DE MADEIRA DE EUCALIPTO PARA PRODUÇÃO DE PELLETS**

**LUÍS FELIPE GARDENGHI DE SOUZA**

**Orientadora: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Nádia Figueiredo de Paula**

**Trabalho apresentado à Faculdade de Tecnologia  
de Jaboticabal - Fatec, para obtenção do título de  
Tecnólogo em Biocombustíveis.**

**Jaboticabal – SP  
1º Semestre/2012**

Souza, Luís Felipe Gardenghi  
S729c Caracterização físico-química de madeira de eucalipto para produção de pellets /Luis Felipe Gardenghi de Souza — Jaboticabal : Fatec, 2012.  
32p.

Orientador: Nádia Figueiredo de Paula

Trabalho (graduação) – Apresentado ao Curso de Tecnologia em Biocombustíveis, Faculdade de Tecnologia de Jaboticabal, 2012.

1. Clones de eucalipto. 2. Energia. 3. Propriedades físico-químicas. I. PAULA, N. F. II. Dra.

CDU 662.71

## **Curso de Tecnologia em Biocombustíveis**

### **CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

**TÍTULO:** CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DE MADEIRA DE EUCALIPTO  
PARA PRODUÇÃO DE PELLETS

**AUTOR:** LUIS FELIPE GARDENGHI DE SOUZA

**ORIENTADOR(A):** PROF(a). DR(a). NÁDIA FIGUEIREDO DE PAULA

Trabalho de Graduação aprovado pela Banca Examinadora como parte das exigências para conclusão do Curso Superior de Tecnologia em Biocombustíveis, apresentado à FATEC-JB para a obtenção do título de Tecnólogo.

**PROF<sup>a</sup> Dra. NÁDIA FIGUEIREDO DE PAULA**

**PROF Dr. RINALDO CÉSAR DE PAULA**

**PROF<sup>a</sup> RITA DE CÁSSIA VIEIRA MACRI**

Data da apresentação: 22 de junho de 2012.

---

Presidente da Comissão Examinadora

Se você quer construir um navio, não chame as pessoas para juntar madeira ou atribua-lhes tarefas e trabalho, mas sim ensine-os a desejar a infinita imensidão do oceano.

Antoine de Saint-Exupéry.

Dedico esse trabalho em especial ao meu pai Luiz Donizete, a quem me inspiro, e foi uma das pessoas, que possibilitou que estivesse aqui; À minha mãe Angela pelo seu amor pela sua paciência e por não medir esforços, para me ver feliz e à minha irmã Natália, por sua compreensão e ajuda.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço em primeiro lugar a Deus por ter me concedido o dom da vida, pois sem ele hoje não estaria aqui para vivenciar esse momento.

À professora Nádia que me orientou nesse trabalho, com muita dedicação, empenho e paciência, não medindo esforços para que o concluísse. Ao Professor Rinaldo por ter concedido estágio no seu laboratório, chegando lá todas as manhãs sempre alegre, e por ter conseguido as amostras para realização do experimento.

Aos professores da FATEC, que transmitiram seus conhecimentos, alguns ainda se tornaram amigos, brincando, falando do seu time de futebol, contando suas experiências profissionais. Aos amigos de classe, pela convivência.

À minha namorada Ariane, pelo seu carinho, companheirismo e compreensão, e por sempre acreditar em mim e não me deixar desistir. À todas as pessoas que às vezes achavam que não iria conseguir, mas não deixaram de acreditar em mim.

À todas as pessoas que diretamente ou indiretamente me ajudaram para realização desse trabalho.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	VIII
LISTA DE TABELAS .....	IX
RESUMO .....	X
ABSTRACT .....	XI
1 INTRODUÇÃO .....	11
2 REVISÃO DE LITERATURA .....	13
2.1 Constituição química da madeira.....	13
2.2 Características importantes para produção de energia.....	13
2.3 Produtos energéticos da madeira .....	15
2.4 Pellets de madeira .....	16
2.5 Características da madeira para produção de pellets .....	17
2.6 Curiosidades de mercado para pellets (Suécia) .....	18
3 MATERIAL E MÉTODOS .....	19
3.1 Determinação da densidade e umidade da madeira .....	20
3.2 Determinação do teor de lignina .....	20
3.2.1. Lignina insolúvel.....	21
3.2.2.Lignina solúvel.....	22
3.3 Determinação do teor de cinzas .....	22
3.4 Análise dos dados .....	23
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	24
5 CONCLUSÕES.....	28
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	29

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Unidades de medida no comércio de madeira.....	15
FIGURA 2 - Discos de madeira de <i>Eucalyptus</i> , clones 4 e 3 (A), clones 1 e 2 (B), divididos para análises química e física. ....	20
FIGURA 3 - Digestão da madeira com H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> concentrado (A) e diluído (B) para determinação do teor de lignina.....	21
FIGURA 4 – Purificação da lignina para determinação do teor de lignina insolúvel. ....	21
FIGURA 5 - Filtrado para determinação da lignina solúvel. ....	22
FIGURA 6 - Cadinho seco e pesado (A), cadinho com madeira pronto para carbonização (B), carbonização da madeira (C) para determinação do teor de cinzas e cinzas no fundo dos cadinhos depois da carbonização (D). ....	22

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados característicos dos combustíveis sólidos feitos a partir da madeira.....	16
Tabela 2 – Identificação das amostras.....	19
Tabela 3 – Resumo das amostras – diâmetro / espessura média (cm).....	19
Tabela 4 - Resumo de análise de variância para umidade e densidade básica da madeira em clones de eucalipto em três posições no tronco.....	24
Tabela 5 – Médias de umidade na madeira de clones de eucalipto em três posições ao longo do tronco.....	25
Tabela 6 - Médias de densidade básica na madeira de clones de eucalipto em três posições no tronco.....	26
Tabela 7 – Resumo de análise de variância para umidade, densidade básica, teor de lignina insolúvel, lignina solúvel, lignina total e teor de cinzas da madeira em clones de eucalipto...	27

## RESUMO

### CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DE MADEIRA DE EUCALIPTO PARA PRODUÇÃO DE PELLETS

A demanda energética por combustíveis e a preocupação com o meio-ambiente têm à busca por alternativas para suprir e até mesmo substituir os insumos energéticos atuais. Uma das formas de combustível alternativo, à base de biomassa sólida são os pellets, partículas desidratadas e prensadas de madeira moída. No Brasil, as florestas plantadas para produção de pellets tem sido feitas no sistema de rotação curta, procurando-se utilizar madeira o mais jovem possível. Neste trabalho analisou-se características físicas e químicas de madeira de *Eucalyptus* com três, cinco e seis anos de idade com o objetivo de verificar se a madeira mais jovem apresenta características adequadas para produção de pellets. Foram avaliadas densidade, umidade, teores de lignina solúvel, insolúvel e total e teor de cinzas. Os resultados demonstram que as madeiras, de seis anos e do híbrido de três anos se destacaram com boas características, principalmente na densidade, o que é muito bom para um produto energético da madeira, sendo assim indicadas para a produção de pellets.

Palavras-chave: clones de eucalipto, energia, propriedades químicas e físicas.

## ABSTRACT

### PHYSICAL AND CHEMICAL CHARACTERIZATION OF EUCALYPTUS WOOD FOR PRODUCTION OF PELLETS

The demand for energy fuels and concern for the environment has led to the growth of the search for alternatives to supplement and even replace the current energy inputs. One way of alternative fuel from biomass are the pellets, dried and pressed particles of ground wood. In Brazil, the forests planted for the production of pellets has been made in short rotation system, attempting to use wood as young as possible. In this work we analyzed physical and chemical characteristics of *Eucalyptus* with three, five and six years old in order to verify that the younger wood has characteristics suitable for production of pellets. We evaluated density, moisture, content of lignin, insoluble, and total ash content. The results show that wood six and three years old of hybrid stood out with good characteristics, particularly density, which is very good for an energy product of the wood, thus being suitable for the production of pellets.

**Key words:** eucalyptus clones, energy, physical and chemical properties.

# 1 INTRODUÇÃO

Atualmente com o uso dos combustíveis fósseis, surge a preocupação com o meio-ambiente, e com alternativas para suprir e até mesmo substituir esses insumos energéticos. O uso de biomassa como geração de energia na indústria deve dobrar até 2050 (REMADE, 2010). A biomassa utilizada como combustível pode ser na forma sólida, líquida ou gasosa, e na forma sólida, destaca-se a madeira, como uma ótima fonte de energia, que depende diretamente de suas características químicas e físicas.

A madeira do gênero *Eucalyptus* é conhecida por sua grande versatilidade de uso. São centenas de espécies, quase 1000 espécies já identificadas em sua área de ocorrência natural (BROOKER; KLEINING, 2006) com propriedades físicas e químicas tão diversas que fazem com que os eucaliptos sejam usados para as mais diversas finalidades. Mesmo dentro de uma mesma espécie, propriedades podem variar marcadamente, fazendo com que determinadas progênies ou procedências sejam apropriadas para um determinado processo industrial e que outras sejam totalmente inviabilizadas (TRUGILHO et al., 2007).

Para produzir uma madeira de qualidade, geralmente são adotadas duas estratégias. A primeira consiste em melhorar geneticamente a qualidade da madeira, e a segunda é a identificação de espécies produtoras de madeira com características satisfatórias para um determinado uso, posteriormente destinadas a aumentar a produtividade de tal espécie. Sendo assim a qualidade da madeira é de fundamental importância para definir sua melhor aplicação.

Algumas características intrínsecas da madeira que afetam a produção de biomassa sólida para fins energéticos são a densidade básica e o teor de lignina na madeira. Estimativas dessas características passam a ser de fundamental importância quando a madeira é destinada a produção de energia. Com isso, empresas do setor florestal fazem previsões de quantidades de produto a ser gerado por área, por clone, por hectare e por ano.

Uma das formas de combustível à base de biomassa sólida são os pellets, partículas

desidratadas e prensadas de madeira moída. A maior vantagem da “peletização” é de concentrar maior valor energético por tonelada. Portanto, é a forma mais eficiente de transportar biomassa por longas distâncias (SUZANO, 2012). O mercado de biomassa deve crescer muito nos próximos anos, principalmente na Europa e em todo o mundo. Regiões como a Europa não contam com esses recursos, fazendo com que sua produção de energia seja dependente de combustíveis fósseis, por isso despertou um grande interesse na “peletização”. O Velho Continente deu um passo à frente nos investimentos na área de biomassa sólida, e, acompanhando esse interesse, empresas brasileiras começam a investir na produção de madeira para fabricação de pellets. As florestas plantadas para produção de pellets tem sido feitas no sistema de rotação curta, ou seja, os plantios são realizados com espaçamentos bem menores que o tradicional para que a floresta atinja a idade de corte mais cedo. Dessa forma, intenciona-se utilizar madeira o mais jovem possível.

Neste trabalho analisou-se características físicas e químicas de madeira de *Eucalyptus* com três, cinco e seis anos de idade com o objetivo de verificar se a madeira mais jovem apresenta características adequadas para produção de pellets.

## **2 REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 Constituição química da madeira**

A composição química da madeira, em base seca, é de aproximadamente 50% de carbono, 6% de hidrogênio e 44% de oxigênio (VALE et al., 2010), sem considerar traços de nitrogênio e de outro elementos, mantendo-se constantes. Estes elementos estão organizados, formando o tecido lenhoso, como celulose, hemicelulose e lignina, numa proporção de 50:20:30 % somados aos extrativos.

### **2.2 Características importantes para produção de energia**

Densidade básica da madeira: é definida como a massa seca por unidade de volume saturado e é uma das principais e mais importante característica a ser considerada, quando se pretende avaliar a qualidade da madeira.

Segundo Cunha et al. (1989), citado por QUIRINO et al.(2005) não há correlação entre densidade básica e o poder calorífico. Entretanto, em relação ao volume de madeira a ser queimado a densidade está positivamente relacionada com o conteúdo calórico da madeira, estimulando o interesse de madeiras pesadas para a queima.

Oliveira (1988), citado por MORAES (2011), por sua vez, em trabalho desenvolvido com a madeira de eucalipto, correlacionou a densidade com alguns parâmetros anatômicos e químicos. Quanto maior a densidade básica da madeira, maior o teor de lignina e extrativos, maior a espessura e comprimento das fibras e menor o teor de holocelulose.

O uso de madeiras de maiores densidades, para fins energéticos, apresenta as seguintes

vantagens: a) menor área de estocagem e manuseio da madeira; b) maior rendimento energético no transporte; c) maior rendimento das caldeiras para queima direta da madeira; e) maior rendimento dos gaseificadores da madeira para produção de gasogênio ou gás de síntese do metanol; f) maior rendimento dos reatores para hidrólise ácida.

**Teor de lignina:** A lignina é considerada o constituinte mais importante na produção de carvão, pois tem implicações diretas no rendimento gravimétrico e no teor de carbono fixo.

O teor de lignina relaciona-se positivamente com o rendimento gravimétrico em carvão e com o teor de carbono fixo do carvão produzido, e negativamente com os compostos voláteis e teor de cinzas. Quanto maior o teor de lignina na madeira, maior é o seu poder calorífero (FOELKEL, 2005, citado por MORAES, 2011).

**Teor de cinzas:** é a fração que permanece como resíduo, após a combustão do carvão vegetal. Varia de 0,5% a mais de 5%, dependendo da espécie, da quantidade de casca e da presença de terra e areia na madeira. O conteúdo dos componentes minerais da madeira também influenciam no teor de cinzas, porém normalmente é pequeno, formado principalmente por óxidos minerais, tais como: óxidos de cálcio, de magnésio, de fósforo, de silício, de potássio, dentre outros. A presença de alguns desses componentes, como o cálcio, o fósforo e o enxofre, em dosagens elevadas, são prejudiciais e até mesmo limitantes, para determinadas finalidades industriais. Teores muito elevados exigem limpezas mais frequentes e podem provocar corrosão em equipamentos metálicos. Um carvão vegetal de boa qualidade deve ter um teor de cinzas inferior a 3% (STURION et al., 1988).

**Umidade:** A água, que nas árvores é condição de sobrevivência do vegetal, existe na madeira em três estados: água de constituição, água de embebição e água livre. No abate, as madeiras tem um grau de umidade de aproximadamente de 52% (COUTINHO, 1999). A queima da madeira úmida proporciona menos energia devido ao consumo no aquecimento e vaporização da água. Para que ocorra uma boa combustão, a madeira deve ser utilizada com umidade abaixo de 25%. Teores superiores a 25%, além de diminuir a quantidade de calorías, reduzem as temperaturas da câmara de queima e dos gases de escape. Adicionalmente, promovem a formação de crostas de fuligem nas chaminés e interior da câmara de combustão.

**Carbono fixo:** O porcentual de carbono fixo refere-se à fração de carvão que se queima no estado sólido. Combustíveis com teores mais elevados de carbono fixo são preferíveis, porque queimam mais lentamente (PEREIRA et al., 2000)

**Teor de voláteis:** Os voláteis compreendem a parte do combustível que se evapora quando ele é aquecido a altas temperaturas e têm um importante papel na combustão. Após a evaporação, misturam-se com o oxigênio do ar e entram em combustão. De um modo geral,

as madeiras com altos teores de voláteis queimam mais rapidamente.

**Poder calorífico:** O poder calorífico pode ser superior ou inferior, conforme o calor liberado pela condensação da água de constituição do combustível seja considerado ou não. O poder calorífico da madeira relaciona-se negativamente com o seu grau de umidade. O poder calorífico inferior é a energia efetivamente disponível por unidade de massa de combustível após deduzir as perdas com a evaporação da água (JARA (1989), citado por QUIRINO et al.,2005).

**Teor de extrativos:** Extrativos são compostos químicos acidentais, considerados não essenciais para a estrutura das paredes celulares e lamela média. São solúveis em água ou outros solventes orgânicos neutros. Entre os extrativos, citam-se os terpenos, as resinas, os óleos voláteis, as graxas, as ceras e os taninos. Freitas (1977), citado por CUNHA *et al.* (1989), relata que a variação na composição química, dimensões, forma e arranjo dos elementos anatômicos e a ocorrência de extrativos acarretam uma diferenciação nas características energéticas de várias madeiras.

**Volume:** Devido à influência do peso, as fontes de biomassa são tratadas em medidas de volume. Consequentemente, o método de armazenamento e a forma geométrica são muito importantes para a determinação do poder calorífico, com base no volume da biomassa sólida (ALTERNER, 2004). Para a madeira existem três medidas cúbicas principais, mostradas na (Figura 1,):

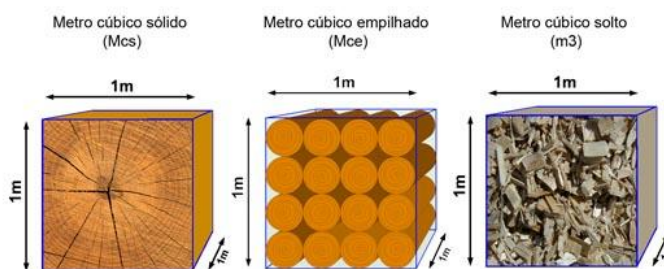


FIGURA 1 - Unidades de medida no comércio de madeira  
Gráfico: Dobelmann / www.sesolutions.de – ALTERNER (2004).

### 2.3 Produtos energéticos da madeira

O uso da madeira para energia não é uma idéia nova. O uso do fogo, tendo madeira como combustível, para aquecer, cozinhar, produzir peças cerâmicas e fornecer luz remonta a

200.000 anos. Ainda hoje, além da lenha, utiliza-se madeira para produção de carvão, etanol, metanol, gás e bioóleo (BOWYER et al., 2007). O resíduo da fabricação de papel (licor negro) é utilizado para geração de energia elétrica na indústria, assim como o coque de lignina, resíduo da hidrólise da madeira. Os resíduos sólidos (serragem, cavacos, casca, etc) são usados para produção de briquetes e pellets (PEKSA-BLANCHARD et al., 2007; CORTEZ et al., 2008).

Tabela 1 - Dados característicos dos combustíveis sólidos feitos a partir da madeira.

<i>Produtos de madeira</i>	<i>Massa</i>	<i>Teor de água</i>	<i>Poder calorífico</i>	<i>Teor energético</i>	<i>Aquecimento a óleo equivalente</i>	<i>Teor de Cinza</i>
Peso medido 1t	[kg]	[%]	[MJ]	[kWh]	[litros]	[kg]
Pelletes - Estufa	1000	10	17,0	4725	471	5,3
Serragem - Estufa	1000	10	17,0	4536	453	5,4
Chips de madeira - Estufa	1000	10	17,0	4425	442	5,8

Dados: Basisdaten Bioenergie / ALTERNER (2004).

## 2.4 Pellets de madeira

Pellet é um produto energético da madeira que consiste em madeira desidratada, moída e prensada. Tem um formato cilíndrico com diâmetro de 6 a 8 mm e seu comprimento não deve ser superior a 38 mm, tornando-o assim fácil seu transporte (LEAVER, 2002).

Como resultado da secagem e compactação, os pellets têm um teor de água máximo de 8% (OLSSON et al., 2003), o que é menor do que metade do que em lenha seca tradicional. Além disso apresentam uma densidade de mais de 650 kg por metro cúbico. Assim os pellets de madeira apresentam um poder calorífico constante entre 4,9 e 5,4 kWh por quilograma. Regra geral, 2 kg de pellets de madeira substituem cerca de 1 litro de óleo de aquecimento.

Comparado a outros combustíveis em uso hoje, os pellets de madeira podem ser considerados como um tipo de combustível relativamente novo. No entanto, pellets são usados na América do Norte desde os anos 1970 onde, somente em 2006 cerca de 2.300.300 toneladas foram produzidas. Na Europa, a produção de pellets começou nos anos 1980, na Suécia. Mais tarde muitos membros da União Européia se juntaram à Suécia e produziram em 2007 aproximadamente 4.500.000 de toneladas (PEKSA-BLANCHARD et al., 2007). A

maior parte deste combustível é consumida em aquecimento doméstico mas existe um mercado mundial crescente para outros usos, como a geração de eletricidade em larga escala, na Suécia (LEAVER, 2002).

Para os devidos fins, os pellets apresentam várias vantagens como: alto poder calorífico, baixo nível de resíduo, estabilidade e rapidez na resposta da temperatura, completamente automatizado, menor mão de obra, menor manutenção de grelhas e fornalha, menor necessidade de estoque, o produto é seco e padronizado, chega pronto para queima, maior higiene, produto de fácil compra e controle, pois é vendido por tonelada, pouca cinza (0,5%,) o que o tornam uma excelente alternativa neste seguimento.

## **2.5 Características da madeira para produção de pellets**

Teor de lignina - no processo de produção de pellets de madeira, o material é compactado sob alta pressão e alta temperatura. A lignina da madeira age como aderente ou ligante das partículas, porém quando a madeira apresenta baixo teor de lignina torna-se necessário a adição de outros produtos para exercer essa função, o que aumenta o custo do processo (LEAVER, 2002). Portanto, o teor de lignina na madeira é uma das características importantes para produção de pellets. Browning (1963), citado por CUNHA et al. (1989) afirma que o poder calorífico é mais alto quanto maior o teor de lignina, porque os mesmo contêm menos oxigênio que os polissacarídeos presentes na holocelulose.

Teor de cinzas - alto teor de cinzas diminui o poder de aquecimento e implica em risco de sinterização afetando negativamente o equipamento de pelletização (LEHTIKANGAS, 2000). Assim a quantidade resultante em cinzas deve ser a menor possível.

Umidade - a água atua como um dos agentes de ligação no processo de granulação. No entanto, alta umidade faz com que a matéria-prima torne-se escorregadia e desliza através dos furos do equipamento, reduzindo a qualidade do pellet. Materiais muito secos também podem prejudicar o processo interferindo na resistência dos rolos do equipamento (LEHTIKANGAS, 2001). De acordo com Alakangas e Paju (2002) a umidade ideal do material a ser peletizado é entre 10-15%.

Densidade – A transmissão de calor da madeira bem como o calor produzido por unidade de volume durante a combustão aumentam com a densidade da madeira (BOWYER et al. 2007).

Portanto, para produção de energia é esperado que a madeira tenha maior teor de lignina e maior densidade possível, umidade entre 10 e 15% e baixo teor de cinzas.

## **2.6 Curiosidades de mercado para pellets (Suécia)**

Segundo a EIA - Agência Internacional de Energia (2007), citado por PEKSA-BLANCHARD et al., (2007) a produção de pellets de madeira na Suécia começou em 1982, porém com custos altos para produzir, baixa demanda e a falta de tecnologia fez com que os pellets não se adaptassem ao mercado naquela época. Dez anos mais tarde o governo sueco impôs um imposto no preço de combustíveis fósseis e da noite para o dia os pellets se tornaram baratos e começaram a serem usados. Em 2003 começaram a usar os pellets em caldeira e estabeleceram o sistema de eletricidade verde. Consequentemente tornaram-se os maiores consumidores de pellets, e em 2006 consumiram cerca de 1.670.000 toneladas, 60% desse montante utilizado em estações de energia (PEKSA-BLANCHARD et al., 2007).

A Suécia tornou-se também o maior produtor de pellets na Europa, em 2006 produziu 1.458.000 toneladas. Sua principal matéria prima era o resíduo de madeira, devido à vasta gama de silvicultura e outros subprodutos, porém essa matéria prima não atendia a demanda, devido ao crescente aumento da produção de pellets. Com isso houve a necessidade de importar matéria prima para atender sua produção.

Os pellets produzidos seguem um padrão de qualidade, o SS 18 71 20, que os diferem de acordo com o seu tamanho e com os teores de cinzas.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

Foram utilizadas madeiras de *Eucalyptus grandis* com três, cinco e seis anos de idade, e um híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* proveniente de um povoamento localizado no Município de Lençóis Paulistas – SP.

Tabela 2 – Identificação das amostras.

<i>Clone</i>	<i>Idade (anos)</i>	<i>Espécie / híbrido</i>
1	3	<i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i>
2	3	<i>Eucalyptus grandis</i>
3	5	<i>Eucalyptus grandis</i>
4	6	<i>Eucalyptus grandis</i>

Tabela 3 – Resumo das amostras – diâmetro / espessura média (cm).

<i>Clone</i>	<i>Base</i>	<i>Meio</i>	<i>Topo</i>
1	15,05 / 3,85	12,30 / 4,43	8,50 / 3,90
2	9,95 / 3,60	7,30 / 3,65	6,90 / 3,40
3	13,70 / 6,40	12,90 / 6,30	9,85 / 5,50
4	17,50 / 6,60	14,70 / 5,50	11,60 / 4,70

Foram utilizados discos de três posições: base, meio e topo das árvores (sendo 12,5%, 37,5% e 62,5% da altura comercial, diâmetro mínimo de 4 cm.). Os discos foram divididos (Figura 2), sendo uma parte preparada e destinada para determinação dos teores de lignina, (solúvel e insolúvel) e teores de cinzas, e outra para determinação de densidade e da umidade da madeira.

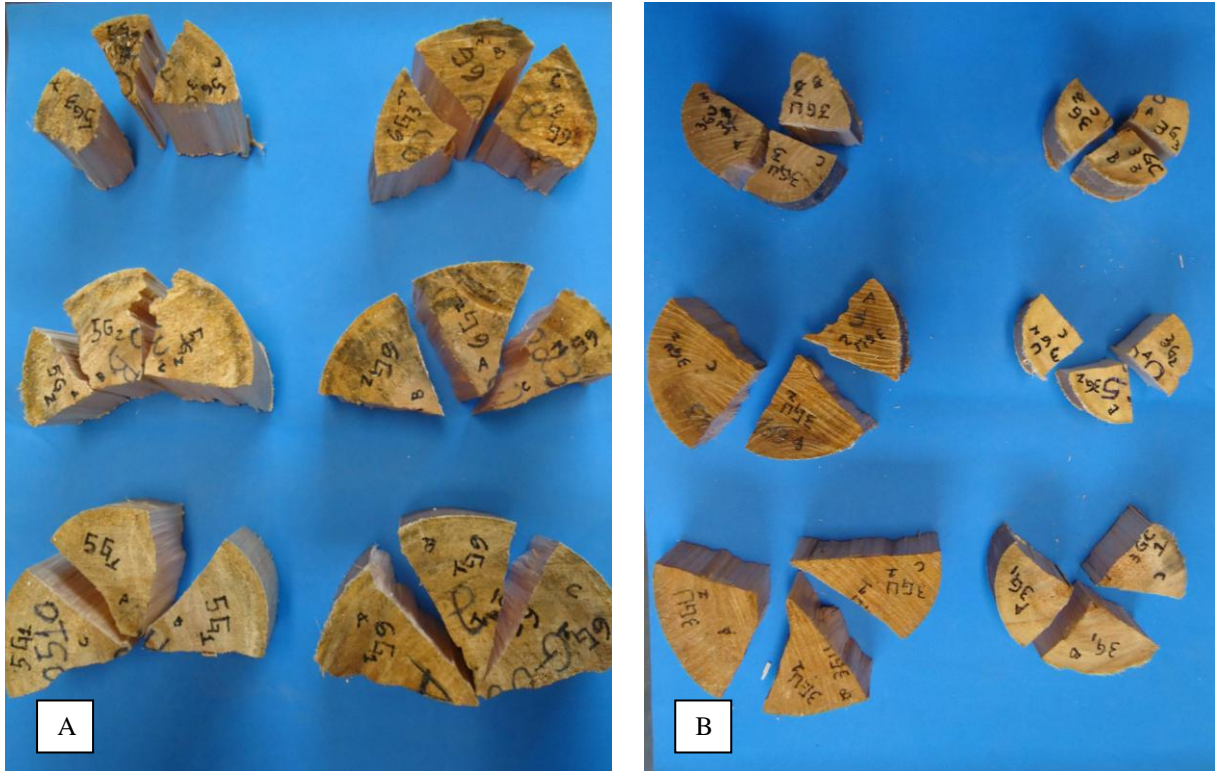


FIGURA 2 - Discos de madeira de *Eucalyptus*, clones 4 e 3 (A), clones 1 e 2 (B), divididos para análises química e física.

### 3.1 Determinação da densidade e umidade da madeira

A densidade da madeira foi determinada pelo método da imersão em água, na balança, de acordo com Vital (1984), em 3 repetições/posição/árvore. A umidade foi determinada pelo método gravimétrico, através de determinação indireta.

### 3.2 Determinação do teor de lignina

As amostras foram picadas e moídas conforme a norma TAPPI T 257 cm-85 (1996) e preparadas, mostrado na (Figura 3) conforme TAPPI T 264 om-88 (1996). Para eliminação dos extrativos as amostras foram submetidas à extração em água quente e em álcool.

Extração em água quente – para eliminação de extrativos solúveis em água (sais inorgânicos, açúcares, polissacarídeos de baixa massa molecular e algumas substâncias fenólicas) as amostras foram mantidas em água fervente por uma hora, em seguida foram lavadas com água deionizada, filtradas e secas em estufa.

Extração em toluol/etanol (2:1) – para a eliminação de extrativos solúveis em álcool (resinas, óleos, ceras, graxas e compostos insolúveis em éter etílico) as amostras livres de extrativos solúveis em água foram mantidas sob refluxo em solução toluol/etanol durante três horas, em seguida foram filtradas, lavadas com água deionizada, com etanol, novamente com água e secas em estufa.

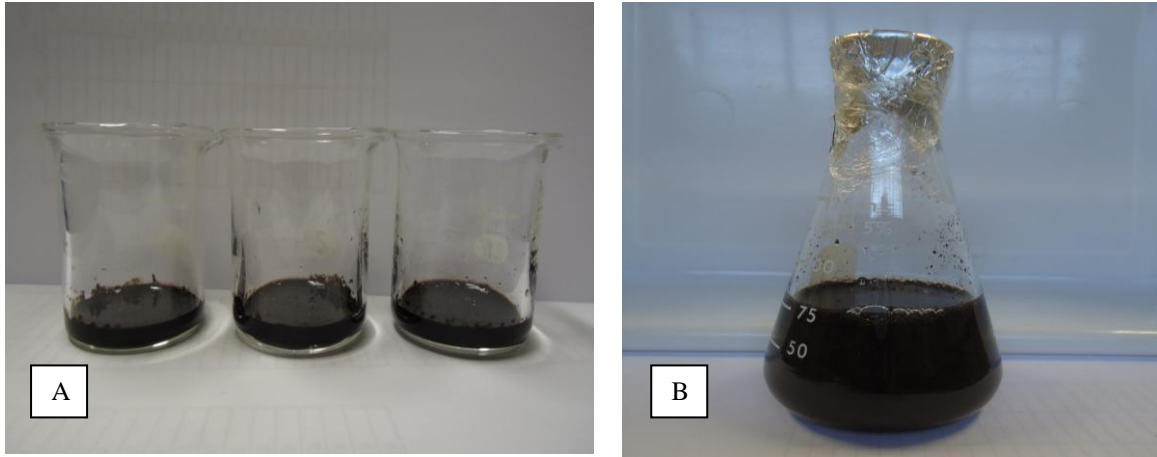


FIGURA 3 - Digestão da madeira com  $H_2SO_4$  concentrado (A) e diluído (B) para determinação do teor de lignina.

### 3.2.1. Lignina insolúvel

Após eliminação dos extrativos, o teor de lignina insolúvel foi determinado pelo método Klason, modificado de acordo com o procedimento proposto por Gomide e Demuner (1986). No momento da filtração, parte do filtrado foi coletado para determinação da lignina solúvel (Figura 4). Foram feitas 3 repetições por árvore utilizando-se amostras compostas das diferentes posições de amostragem.



FIGURA 4 – Purificação da lignina para determinação do teor de lignina insolúvel.

### 3.2.2.Lignina solúvel

A lignina solúvel foi determinada no filtrado da análise de lignina insolúvel, (Figura 5). A solução foi analisada em espectrofotômetro a 215 nm, de acordo com a metodologia de Ehrman (1996).

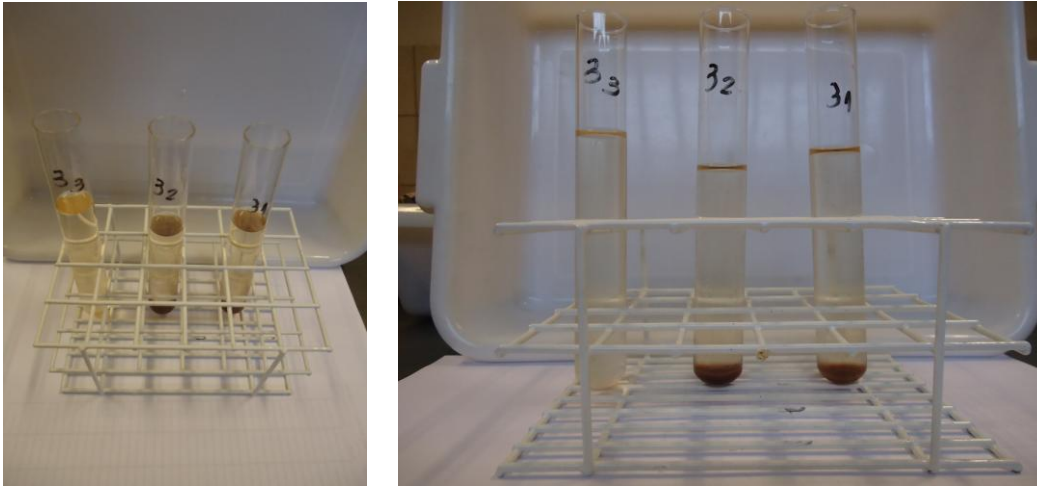


FIGURA 5 - Filtrado para determinação da lignina solúvel.

### 3.3 Determinação do teor de cinzas

Para determinação do teor de cinzas colocou-se os cadinhos de porcelana, de um dia para o outro, em estufa a 105 °C. Depois o material foi pesado nos cadinhos, previamente tarados e levados à mufla a 525 °C. Após entrar em combustão, aguardou-se o fim das chamas e a mufla foi fechada. Depois de 2h:30min, a mufla foi desligada, os cadinhos retirados, esfriados em dessecador e novamente pesados, (Figura 6).

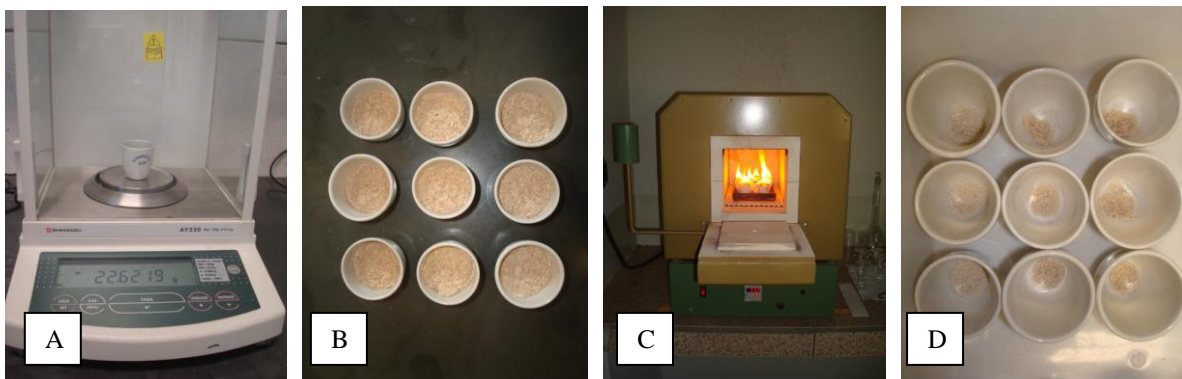


FIGURA 6 - Cadinho seco e pesado (A), cadinho com madeira pronto para carbonização (B), carbonização da madeira (C) para determinação do teor de cinzas e cinzas no fundo dos cadinhos depois da carbonização (D).

### **3.4 Análise dos dados**

Os dados obtidos com as análises feitas foram anotados e depois digitalizados em planilhas para análises estatísticas.

Os dados de umidade e densidade básica da madeira foram submetidos à análise de variância seguindo o delineamento inteiramente ao acaso, no esquema fatorial 4x3 ( 4 clones x 3 posições), com três repetições. As médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Os dados de teores de lignina solúvel, lignina insolúvel, lignina total, teor de cinzas, umidade e densidade, foram submetidos à análise de variância seguindo o delineamento inteiramente ao acaso, com quatro tratamentos (4 clones) e três repetições. As médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 4 apresenta-se o resumo da análise de variância e as médias para as características umidade e densidade da madeira. Observa-se que o efeito de clone e de posição foram significativos tanto para umidade quanto para densidade, ou seja, as características analisadas podem ser maiores ou menores em cada clone, o que era esperado, que variasse de acordo com a idade e de acordo com as posições, porém a interação CxP foi significativa apenas para densidade. De acordo com Trugilho et al., (2007) a densidade varia tanto no sentido transversal como no longitudinal do fuste das árvores, diferentes formas de amostragem longitudinais no tronco podem levar a diferentes estimativas de densidade. Já em relação à umidade a interação não foi significativa, ou seja, a umidade não varia de forma diferenciada entre o clone e a posição, isso porque a madeira já era seca e não recém cortada.

Tabela 4 - Resumo de análise de variância para umidade e densidade básica da madeira em clones de eucalipto em três posições no tronco.

<i>FV</i>	<i>GL</i>	<i>QM</i>		<i>Valores de F</i>	
		Umidade	DBM	Umidade	DBM
Clone (C)	3	4,184	0,0095	18,44 **	58,23**
Posição (P)	2	1,643	0,0037	7,25**	22,80**
CxP	6	0,294	0,0015	1,30 <sup>ns</sup>	8,99**
Erro	24	0,226	0,0002		
<b>Média</b>		8,644	0,484		
<b>CV (%)</b>		5,51%	2,65 %		

FV = fator de variação; GL = grau de liberdade; QM = quadro médio; DMB = densidade básica; \*\* = valor significativo pelo teste F (  $P \leq 0,01$  ) ; ns = valor não significativo pelo teste F (  $P > 0,05$  ).

Como a interação CxP não foi significativa para umidade, observa-se na Tabela 5 a diferenciação entre as médias de cada clone e as médias de cada posição. Pode-se observar que o clone 2 difere dos demais, ou seja, ele apresenta maior umidade. Com relação às médias de cada posição pode-se observar que a posição 3 difere da posição 1 e 2, o que indica que a madeira apresentou maior umidade na parte superior do tronco (altura a 62,5% do diâmetro comercial).

Tabela 5 – Médias de umidade na madeira de clones de eucalipto em três posições ao longo do tronco.

<i>Clone</i>	<i>Posição</i>			<i>Média</i>
	1 (12,5%)	2 (37,5%)	3 (62,5%)	
1	7,932	8,078	8,856	8,289 bc
2	8,834	9,699	10,241	9,592 a
3	8,681	8,551	8,748	8,660 b
4	7,882	7,856	8,367	8,035 c
<b>Média</b>	8,332 B	8,546 B	9,053 A	

Letras seguidas pela mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem pelo teste Tukey (  $P > 0,05$ ).

Na Tabela 6 é apresentado o desdobramento da interação CxP para densidade básica da madeira. Observa-se em relação às posições em cada clone, que no clone 1 (híbrido de 3 anos) a posição 1 apresentou menor densidade, no clone 2 (com 3 anos) a posição 2 apresentou menor densidade, o clone 3 (com 5 anos) não apresentou variação na densidade ao longo do tronco e no clone 4 (com 6 anos) a densidade foi aumentando no sentido do topo da árvore. Em todos os clones de forma geral, observou-se que a posição que tem a maior densidade é a posição 3, ou seja, a parte de cima do tronco, o que está de acordo com as informações dadas pelo fornecedor das amostras. Em relação aos clones, observa-se que na posição um os clones não diferem entre si, na posição dois os clones 1 (híbrido de 3 anos) e 4 (com 6 anos) diferem dos clones 2 (com 3 anos) e 3 (com 5 anos) apresentando maior densidade na posição três. Os clones 1 e 4 apresentam maior densidade e o clone 3 a menor. De acordo com STURION et al.(1988), madeira mais densa propicia maior poder calorífico por volume. Assim, a madeira do híbrido de três anos (clone 1) e a madeira de eucalipto de seis anos (clone 4) fornece maior quantidade de calor, por unidade de volume, do que as

madeiras de eucalipto de três e cinco anos (clones 2 e 3).

Tabela 6 - Médias de densidade básica na madeira de clones de eucalipto em três posições no tronco.

<i>Clone</i>	<i>Posição</i>			
	1 (12,5%)	2 (37,5%)	3 (62,5%)	Média
1	0,492 aB	0,528 aA	0,547 aA	0,522
2	0,476 abA	0,438 cB	0,484 bA	0,466
3	0,455 bA	0,441 cA	0,450 cA	0,449
4	0,462 bC	0,496 bB	0,534 aA	0,497
<b>Média</b>	0,471	0,476	0,504	

Letras seguidas pela mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem pelo teste Tukey (  $P > 0,05$ ).

Na Tabela 7 apresenta-se o resumo da análise de variância e das médias para as características avaliadas: umidade, densidade básica, teor de lignina insolúvel, lignina solúvel, lignina total e teor de cinzas. Observam-se diferenças entre os clones, exceto para o teor de cinzas, embora os valores obtidos dos teores de cinzas, sejam comparáveis aos encontrados por Trugilho et al., 1997 citado por Botrel et al., 2010, que foi de 0,34%. Dentre as diferenças, o clone 1 destaca-se, pois o teor de lignina é relativamente maior comparando com os clones 2 e 3. Espécies mais jovens tendem a possuir uma maior proporção de madeira juvenil, que é mais rica em lignina do que a madeira madura (VITAL et al., 1984 citado por TRUGILHO et al., 1997), apesar do clone 1 ter a mesma idade do clone 2.

Tabela 7 – Resumo de análise de variância para umidade, densidade básica, teor de lignina insolúvel, lignina solúvel, lignina total e teor de cinzas da madeira em clones de eucalipto.

FV	GL	QM						Valores de F					
		UMI	DBM	LIG – I	LIG – S	LIG – T	CZ	UMI	DBM	LIG – I	LIG – S	LIG – T	CZ
Clone	3	1,395	0,0032	26,402	0,022	26,87	0,014	6,62*	4,68*	9,51**	4,43*	9,75**	3,28 <sup>ns</sup>
Erro	8	0,211	0,0007	2,776	0,005	2,76	0,004						
Média		8,644	0,484	21,93	0,70	22,63	0,370						
CV		5,31	5,39	7,60	10,17	7,34	17,72						
Clone	Média dos Clones												
		UMI	DBM	LIG – I	LIG – S	LIG – T	CZ						
	1	8,289 b	0,522 a	25,58 a	0,70 ab	26,27 a	0,382 a						
	2	9,592 a	0,466 b	18,73 b	0,70 ab	19,44 b	0,459 a						
	3	8,660 b	0,449 b	20,52 b	0,60 b	21,12 b	0,342 a						
4	8,035 b	0,497 ab	22,88 ab	0,81 a	23,69 ab	0,298 a							

FV = fator de variação; GL = grau de liberdade; QM = quadro médio; UMI = umidade; DBM = densidade básica; LIG – I = lignina insolúvel; LIG – S = lignina solúvel; LIG – T = lignina total; CZ = cinzas; \* = valor significativo pelo teste F (  $P \leq 0,05$  ); \*\* = valor altamente significativo pelo teste F (  $P \leq 0,01$  ); ns = valor não significativo pelo teste F (  $P > 0,05$  ); médias seguidas pela mesma letra na mesma coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey (  $P > 0,05$  ).

## 5 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos permitem concluir que:

A madeira de *Eucalyptus grandis* com três anos de idade (clone 2) não apresentou boas características para produção de pellets, portanto não é indicada para produção.

A madeira de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla* com três anos de idade (clone 1) e a madeira de *Eucalyptus grandis* com seis anos (clone 4), apresentaram boas características para produção de pellets, podendo ser indicada para esta finalidade.

A madeira do híbrido *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla* foi a que mais se destacou o que confirma que a hibridação é feita para melhor ou até mesmo corrigir algum fator indesejado em determinada espécie, neste caso a madeira apresentou um ótimo teor de lignina e de densidade, o que é essencial para produção de energia.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALAKANGAS, E.; PAJU, P. **Wood pellets in Finland – technology, economy and market.** OPET Report 5, Jyvaskyla: VTT Process, 2002. 64.
- ALTENER. **Bioenergia - Manual sobre tecnologias, projeto e instalação.** Paraná, 2004. 242p.
- BOTREL, M. C. G.; TRUGILHO, P.F; ROSADO, S. C .S.; SILVA, J. R. M. **Seleção de clones de Eucalyptus para biomassa florestal e qualidade da madeira,** Ciência Florestal, Piracicaba, v. 38, n. 86, p. 237-245, jun. 2010.
- BOWYER, J. L.; SHMULSKY, R.; HAYGREEN, J. G. **Forest products & Wood Science – an introduction.** Iowa: Blackwell Publishing. 2007. 558p
- BROOKER, M. H. I.; KLEINING, D. A. **Field guide to Eucalypts.** 3. ed. v.1 Melbourne: Boomings books. 2006. 355p.
- CORTEZ, L. A. B., LORA, E. E. S., GÓMEZ, E. O. **Biomassa para energia.** Campinas: Editora Unicamp, 2008.
- COUTINHO, J.S. **Materiais de construção 1- Madeiras.** Porto, 1999. (Apostila).
- CUNHA, M.P.S.C.; PONTES, C.L.F.; CRUZ, I. A.; CABRAL, M. T. F. D.; CUNHA NETO, Z.B.; BARBOSA, A.P.R. **Estudo químico de 55 espécies lenhosas para geração de energia em caldeiras.** In: 3º encontro Brasileiro em madeiras e em estruturas de madeira: Anais, v.2, p. 93-121, São Carlos, 1989.
- EHRMAN, T. **Determination of acid-soluble lignin in biomass.** Chemical Analysis and Testing Task – Laboratory Analytical Procedure. Golden: NREL. 7p, 1996.
- GOMIDE, J. L.; DEMUNER, B. J. **Determinação do teor de lignina em material lenhoso: método Klason modificado.** O papel, v. 47, n. 8, p. 36-38, 1986.
- LEAVER, R.H. **Wood pellet fuel and the residential market,** Andritz Publication, 9p 2002.
- LEHTIKANGAS, P. **Quality properties of pelletised sawdust, logging residues and bark.** *Biomass and Bioenergy* 20 (2000) 351–360

MORAES, F. A.B. **Utilização da biomassa de eucalipto para produção de energia na indústria de celulose e papel.** 2011. 45 f. Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção – UNIARA- Centro Universitário de Araraquara, Araraquara, 2011.

OLSSON, M.; KJÄLLSTRAND, J.; PETERSSON, G. Oxidative pyrolysis of integral softwood pellets, **Journal of analytical and applied pyrolysis** n°67 p. 135-141, 2003.

PEKSA-BLANCHARD, M.; DOLZAN, P.; GRASSI, A.; HEINIMO, A. et al. **Global Wood Pellets Markets and Industry: Policy Drivers, Market Status and Raw Material Potential.** IEA Bioenergy Task 40. 120p. 2007.

PEREIRA, J.C.D.; STURION, J.A.; HIGA, A.R.; HIGA, R.C.V.; SHIMIZU, J.Y. **Características da madeira de algumas espécies de eucalipto plantadas no Brasil.** Colombo, Embrapa Florestas, 2000. 113p. (Embrapa Florestas. Documentos, 38).

QUIRINO, W.F.; VALE, A.T.; ANDRADE, A.P.A.; ABREU, V.L.S.; AZEVEDO, A.C.S. **Poder calorífico da madeira e de materiais lignocelulósicos,** Revista da Madeira n° 89, p. 100-106, abril 2005.

REMADE - Mercado: **Setor projeta caminhos para o crescimento,** Revista da Madeira, Curitiba – PR, n°125, nov. 2010. Disponível em:  
<[http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira\\_materia.php](http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php)> Acesso em: 21 de janeiro 2012

STURION, J.A.; PEREIRA, J.C.D.; CHEMIN, M.S. **Qualidade da madeira de *Eucalyptus viminalis* para fins energéticos em função do espaçamento e idade de corte,** Boletim de pesquisa florestal, Colombo, n.16, p.55-59, dez. 1998.

SUZANO ENERGIA RENOVÁVEL. **Pellets de madeira.** 2012. Disponível em:  
<<http://www.suzano.com.br/portal/suzano-energia-renovavel/por-que-pellets.htm>> Acesso em: 21 de janeiro 2012.

TAPPI - **Technical Association of the Pulp and Paper Industry.** TAPPI test methods T 264 om-88: preparation of wood for chemical analysis. Atlanta: Tappi Technology Park, 1996.

TAPPI - **Technical Association of the Pulp and Paper Industry.** TAPPI test methods T 257 cm-85: sampling and preparing wood for analysis. Atlanta: Tappi Technology Park, 1996.

TRUGILHO, P. F. **Densidade básica e estimativa de massa seca de lignina na madeira em espécies de *Eucalyptus*,** Ciênc. Agrotc., Lavras, v.33,n.5, p. 1228-1239. Set-Out., 2009.

TRUGILHO, P. F.; LIMA, J.T.; MENDES, L.M. **Influencia da idade nas características físico-químicas e anatômicas da madeira de *Eucalyptus saligna*,** Cerne, Lavras, v.2,n.1, 1996

TRUGILHO, P. F.; BIANCHI, M. L.; ROSADO, S. C. S.; LIMA, J. T. **Qualidade da madeira de clones de espécies e híbridos naturais de *Eucalyptus*,** Scientia Forestalis, n.73, p. 55-62. Março 2007.

VALE, A. T.; DIAS, I. S.; SANTANA, M. A. E. **Relações entre propriedades químicas, energéticas da madeira de cinco espécies de cerrado**, Ciência Florestal, Santa Maria, v.20,n.1, p. 137-145. Jan-mar., 2010.