

**JULIANA MARANGON JARDIM**

**POTENCIAL ENERGÉTICO DE DIFERENTES BIOMASSAS AGROFLORESTAIS**

**VIÇOSA  
MINAS GERAIS - BRASIL  
DEZEMBRO – 2014**

**JULIANA MARANGON JARDIM**

**POTENCIAL ENERGÉTICO DE DIFERENTES BIOMASSAS AGROFLORESTAIS**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa, como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia Florestal.

**VIÇOSA  
MINAS GERAIS - BRASIL  
DEZEMBRO – 2014**

**JULIANA MARANGON JARDIM**

**POTENCIAL ENERGÉTICO DE DIFERENTES BIOMASSAS AGROFLORESTAIS**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa, como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia Florestal.

APROVADA EM: 12 de dezembro de 2014

---

Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho  
(Coorientadora)

---

Artur Queiroz Lana

---

Angélica de Cássia Oliveira Carneiro  
(Orientadora)

*À minha família e amigos pelo incentivo  
e companheirismo dedicados a mim.*

## **AGRADECIMENTOS**

À minha orientadora, Professora Angélica de Cássia Oliveira Carneiro, pela exímia condução da pesquisa, pela confiança depositada em mim e pelos ensinamentos durante todo o período de convívio.

À Emylle pela ajuda imprescindível durante todo o desenvolvimento do trabalho.

Aos funcionários do Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM) por toda ajuda durante o preparo de amostras e análises.

À família LAPEM que contribuiu muito para a realização da pesquisa.

À EMBRAPA Floresta pela concessão da bolsa de iniciação científica.

Aos meus pais, Ruy e Waléria, pelo amor, incentivo e carinho dedicados a mim e às minhas irmãs Carolina e Emilia, pela preocupação, amizade e por serem meus exemplos de dedicação e responsabilidade.

Ao Bruno pelo amor, carinho, cumplicidade, amizade, companheirismo e também pelas inúmeras ajudas acadêmicas.

Obrigada a todos que contribuíram para a realização deste sonho!

## **BIOGRAFIA**

Juliana Marangon Jardim, filha de Ruy do Amaral Jardim e Waléria Marangon Jardim, nasceu em 30 de junho de 1991, em Juiz de Fora, Minas Gerais. Concluiu o ensino médio em 2008 no Colégio Ângulo de Viçosa. Em 2009 iniciou o curso de Engenharia Florestal na Universidade Federal de Viçosa, sendo o mesmo concluído em dezembro de 2014.

## SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS .....	iii
BIOGRAFIA .....	iv
SUMÁRIO.....	v
RESUMO .....	vii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	5
2.1. Objetivo geral .....	5
2.2. Objetivos específicos .....	5
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	6
3.1. Preparo das amostras .....	6
3.2. Propriedades das biomassas agroflorestais <i>in natura</i> .....	7
3.2.1. Densidade a granel .....	7
3.2.2. Composição Química Imediata .....	7
3.2.3. Poder Calorífico Superior.....	8
3.2.4. Composição Elementar .....	8

3.3.	Produção do carvão vegetal .....	8
3.4.	Análises das biomassas carbonizadas .....	9
3.4.1.	Rendimento Gravimétrico em Carvão Vegetal .....	9
3.4.2.	Composição Química Imediata .....	9
3.4.3.	Poder Calorífico Superior.....	9
3.5.	Análise dos dados .....	9
4.	RESULTADOS .....	10
4.1.	Propriedades das biomassas <i>in natura</i> .....	10
4.2.	Rendimento gravimétrico e propriedades do carvão vegetal.....	12
5.	CONCLUSÕES .....	20
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	21

## RESUMO

JARDIM, Juliana Marangon. Monografia de Graduação, Universidade Federal de Viçosa, dezembro de 2014. **Potencial energético de diferentes biomassas agrofloretais.** Orientadora: Angélica de Cássia O. Carneiro. Coorientadora: Ana Márcia M. L. Carvalho.

A atual situação ambiental tem gerado uma preocupação quanto às fontes de energia, impulsionando a substituição de fontes finitas e poluentes por fontes renováveis. Nesse contexto destaca-se a geração de energia pela utilização de biomassas agrofloretais na queima direta, produção de briquetes, pellets e carvão vegetal; o que contribui para a racionalização dos recursos e consiste em uma alternativa econômica para o setor industrial e comercial. O presente trabalho objetivou avaliar o potencial energético das principais biomassas encontradas em larga escala no Brasil, a saber: bambu; bagaço de cana-de-açúcar; casca de café; serragem de madeira de eucalipto e capim-elefante. Determinou-se a composição química imediata, poder calorífico, densidade a granel e composição elementar das biomassas. Em seguida, procedeu-se a carbonização das biomassas em forno mufla, com diferentes temperaturas finais, sendo elas 250, 300, 350, 400, 450 e 500°C, a uma taxa de aquecimento média de 2°C/min. Determinou-se o rendimento gravimétrico e as propriedades dos carvões produzidos. Os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA), e quando estabelecidas diferenças significativas entre eles, aplicou-se o teste Tukey a 5% de significância. As biomassas *in natura*, bambu, bagaço de cana-de-açúcar e serragem de eucalipto apresentaram os maiores teores de materiais voláteis, portanto espera-se que os

mesmos apresentem um desprendimento mais rápido de energia durante a queima. O capim-elefante obteve o maior teor de cinzas, o que é indesejável devido à redução da eficiência do processo. Para as biomassas carbonizadas, à medida que se aumentou a temperatura final de carbonização houve um decréscimo no rendimento gravimétrico e no teor de materiais voláteis e, um acréscimo no teor de carbono fixo e teor de cinzas. Essas reduções eram esperadas, visto que quanto maior a temperatura, maior é a degradação dos constituintes químicos da biomassa. O carvão da serragem de madeira de eucalipto apresentou o menor teor de cinzas e os maiores teores de voláteis. Todas as biomassas estudadas apresentam potencial energético satisfatório. No entanto, o bambu, o bagaço de cana-de-açúcar e a serragem da madeira de eucalipto são mais indicados para geração de energia, tanto para queima direta, quanto para a carbonização.

## 1. INTRODUÇÃO

A utilização de combustíveis fósseis e seus derivados ocasionam graves consequências ao ambiente, visto que são fontes finitas de energia, não renováveis, mais poluentes e contribuem para emissão de gases de efeito estufa o que ameaça o equilíbrio do clima da Terra. Como a queima de biomassa no máximo recicla CO<sub>2</sub> que foi retirado da atmosfera pela fotossíntese, tudo indica que a longo prazo esta será a alternativa energética para contornar a crise ambiental e a dependência do petróleo (QUESADA, 2001).

Biomassa agroflorestral é qualquer material advindo da matéria orgânica vegetal, agrícola e florestal, com a finalidade energética. A produção de material energético alternativo através da mesma representa hoje um desafio para a ciência e para os países de modo geral, principalmente os em desenvolvimento.

O Brasil tem uma das matrizes energéticas mais limpas do planeta e a utilização de resíduos de biomassa vegetal para fins energéticos é uma realidade (PAULA, 2010). Contudo, ainda gera discussões diante de sua possível concorrência com a produção de alimentos, porém trabalhos científicos demonstram que o país tem terras disponíveis e grande potencial para ser o maior produtor de bioenergia.

Biomassas agroflorestrais residuais e de baixo custo de obtenção podem ter o valor econômico agregado através do seu aproveitamento. Porém, a sua utilização não deve ser distante da sua obtenção, visto que o seu transporte é custoso, o que pode acabar o

inviabilizando. Vale ressaltar que se essa biomassa for utilizada de forma responsável, tem potencial de redução da dependência energética das indústrias.

Existem distintas formas de aproveitamento, podendo-se citar a geração de energia pela queima direta, produção de combustíveis sólidos (carvão vegetal, briquetes e *pellets*), líquidos, biogás, bio-óleo, além de produtos químicos diversos. Desse modo, é possível converter a biomassa em energia e evitar o descarte ou subuso, além de contribuir para a racionalização de recursos florestais e oferecer uma alternativa econômica para as empresas.

De acordo com Vale e Gentil (2008), o principal objetivo da carbonização é a eliminação da maior parte do oxigênio e do hidrogênio presente na biomassa pela ação do calor e, conseqüentemente, a concentração do carbono na fração sólida – carvão vegetal. A transformação da biomassa em carvão é um processo de decomposição térmica físico-química irreversível, que se inicia com a secagem, e depois de perdida a água livre e a água de adesão inicia-se a fase de pirólise, produzindo gases condensáveis e não condensáveis, além do carvão.

Outra forma energética de utilização da biomassa é através da queima direta desse material para produzir energia térmica e elétrica. Esse processo já vem sendo utilizado no país, na cogeração de energia nas fábricas de papel e celulose.

Muitas são as biomassas agroflorestais com potencial energético, sendo destacado nesse estudo o bagaço da cana-de-açúcar, bambu, casca de café, capim-elefante e serragem de eucalipto.

A cana-de-açúcar é uma cultura consolidada e em plena expansão, com destaque mundial e com vasta utilização no país. O Brasil é o maior produtor do mundo, ficando em primeiro lugar na produção de etanol de cana-de-açúcar. Segundo o Conselho Nacional de Abastecimento (CONAB, 2014) a produção total de cana-de-açúcar moída foi de 658,82 milhões de toneladas na safra 2013/14 e em seu segundo levantamento para a safra 2014/15, a previsão de área colhida é de aproximadamente 9 mil hectares. Em seu processamento é gerado o bagaço, um resíduo fibroso, que por apresentar-se como uma matéria-prima economicamente atrativa e disponível em abundância, tem despertado grande interesse no que tange sua utilização para a produção de carvão vegetal (GONÇALVES *et al.*, 2006).

Outra gramínea indicada na geração de energia é o capim-elefante. Espécie de rápido crescimento e grande produção de biomassa vegetal. Essa gramínea está entre as espécies de alta eficiência fotossintética (metabolismo C4), resultando numa grande capacidade de acumulação de matéria seca, que varia de 15 a 45 toneladas por hectare por ano, possuindo também características qualitativas que a credenciam a ser estudada para a produção de energia como, por exemplo, um percentual de fibra elevado, semelhante à cana-de-açúcar. Nos últimos anos, vem sendo desenvolvida uma nova técnica de se substituir o carvão mineral utilizado em pelotas de minério de ferro, por carvão derivado de biomassa seca de capim elefante, e neste sentido, um novo rumo deve ser dado em relação às características que se deseja obter da planta para a produção de carvão (QUESADA, 2001).

O Brasil é grande produtor mundial do grão de café, estima-se uma produção de café para a safra 2014/2015 de 45,35 milhões de sacas de 60 quilos do produto beneficiado, em uma área de 2.251.969,2 ha (CONAB 2014). Em seu beneficiamento tem-se a casca como rejeito. Esse resíduo tem baixo uso comercial, porém apresenta um bom potencial energético. Atualmente é utilizado na adubação, como uma forma de reduzir o gasto com fertilizantes químicos e na alimentação de animais. Estima-se que dois milhões de toneladas de casca de grãos de café são produzidas anualmente no Brasil tornando um resíduo interessante, do ponto de vista da produção de energia (VALE *et al.*, 2007).

O bambu também pode ser uma boa alternativa de combustível limpo e sustentável. Apresenta alta taxa de crescimento, além de emitir brotos anualmente. Esse material possui uma vasta aplicabilidade, podendo ser utilizado na irrigação de culturas, culinária, construção civil, artesanato, produção de papel, móveis e compensados. Particularmente para o Brasil, país que utiliza intensamente a biomassa para atendimento de suas necessidades energéticas, o bambu poderá ser uma importante alternativa (BRITO *et al.*, 1987).

Anualmente são geradas toneladas de serragem de eucalipto no Brasil, resíduo advindo do desdobramento da madeira, tornando necessário o desenvolvimento de alternativas para o uso desse grande volume de rejeito. Esse material, quando isento de substâncias químicas tóxicas, é usado na geração de energia, produção de briquetes, *pellets* e chapas, compostagem e na forragem para animais.

Quimicamente, essa biomassa lignocelulósica é uma mistura complexa de polímeros naturais de carboidratos conhecidos como celulose, hemicelulose, além de lignina e pequenas

quantidades de outras substâncias, como extrativos e cinzas. Em muitas fábricas de celulose de eucalipto a serragem é separada dos cavacos e usada como combustível para uma caldeira de biomassa (FOELKEL, 2007).

Diante a vasta fonte de biomassas agrofloretais no Brasil, aliado ao conhecimento do seu caráter renovável, potencial energético e capacidade de mitigação dos efeitos do aquecimento global, faz-se necessária a caracterização das mesmas a fim de determinar a sua melhor utilização, bem como o seu processo de conversão em energia térmica.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo geral**

Avaliar o potencial energético de diferentes biomassas agroflorestais.

### **2.2. Objetivos específicos**

- Determinar e avaliar as propriedades químicas e densidades das biomassas *in natura*;
- Avaliar o efeito da temperatura final de carbonização no rendimento e qualidade dos carvões vegetais produzidos a partir das diferentes biomassas agroflorestais.

### **3. MATERIAL E MÉTODOS**

O presente estudo foi conduzido no Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM), na Universidade Federal de Viçosa (UFV).

Utilizaram-se cinco biomassas agroflorestais, a saber: bambu, casca de café, capim-elefante, bagaço de cana-de-açúcar e serragem de eucalipto.

#### **3.1. Preparo das amostras**

As biomassas bambu, bagaço de cana-de-açúcar e capim-elefante, para devida condução do experimento, foram seccionados em amostras de aproximadamente 5 (cinco) cm de comprimento. Já a serragem de madeira de eucalipto e a casca de café foram utilizadas na granulometria proveniente de seu processamento.

Na figura 1 são apresentadas as amostras utilizadas.



**Figura 1** – Biomassas utilizadas. (1) casca de café, (2) bambu, (3) bagaço de cana-de-açúcar, (4) serragem de eucalipto e (5) capim-elefante.

### **3.2. Propriedades das biomassas agrofloretais *in natura***

#### **3.2.1. Densidade a granel**

A determinação da densidade a granel das amostras foi baseada na norma ABNT NBR 6922 (ABNT, 1981). Para tal, foi utilizado um recipiente cilíndrico, com um volume de aproximadamente  $0,003 \text{ m}^3$ . O valor de densidade a granel foi obtido pela divisão da massa do material pelo volume do recipiente.

#### **3.2.2. Composição Química Imediata**

As amostras foram moídas em um moinho de laboratório do tipo Wiley e, posteriormente, peneiradas. A fração utilizada para as análises foi a que passou pela peneira com malha de 40 mesh e ficou retida na peneira com malha de 60 mesh (ASTM, 1982).

Para a determinação dos teores de carbono fixo (CF), cinzas (CZ) e materiais voláteis (MV), foi realizada a análise química imediata, de acordo com metodologia descrita pela norma ABNT NBR 8112 (ABNT, 1986) com algumas adequações. Estas consistiram na substituição dos cadinhos de platina por porcelana, e da redução de temperatura de  $750 \text{ }^\circ\text{C}$  para  $600 \text{ }^\circ\text{C}$ , na determinação do teor de cinzas.

### **3.2.3. Poder Calorífico Superior**

O Poder Calorífico Superior (PCS) foi determinado de acordo com a metodologia descrita pela norma da ABNT NBR 8633 (ABNT, 1984), utilizando-se uma bomba calorimétrica adiabática.

### **3.2.4. Composição Elementar**

Para a análise elementar (carbono, nitrogênio, hidrogênio, enxofre e oxigênio), foi utilizada uma massa de 2,0 mg de amostra seca, selecionada em peneiras sobrepostas de 200 e 270 mesh, utilizando-se a fração retida na peneira de 270 mesh.

O equipamento utilizado foi o Vario Micro Cube CHNS-O, da marca Elementar, que pode atingir temperaturas de até 1200 °C e proporcionar a combustão da amostra. Durante o procedimento ocorrem reações químicas que geram gases. Esses gases são conduzidos aos tubos redutores presentes em um compartimento específico. Os elementos químicos são identificados por termocondutividade, onde cada elemento tem interação e pico específico. O valor de oxigênio é quantificado pelo somatório do C, N, H, S e cinzas decrescido de 100.

## **3.3. Produção do carvão vegetal**

As biomassas foram submetidas a carbonizações em um forno elétrico do tipo mufla com controle manual da temperatura. O processo foi iniciado a uma temperatura de 100 °C com um incremento de 50 °C a cada 30 minutos, variando o tempo total e temperatura final de carbonização.

No interior da mufla foi inserido um *container* metálico contendo o material previamente seco (em estufa, a  $103 \pm 2$  °C, até massa constante). Os gases condensáveis foram recuperados, em um recipiente, por meio de um condensador tubular acoplado à porta da mufla, no orifício de saída dos gases.

Foram avaliadas 6 (seis) temperaturas finais de carbonização, sendo elas: 250, 300, 350, 400, 450 e 500 °C a uma taxa de aquecimento média de 2 °C/min. Foram procedidas 3 (três) repetições por marcha, para cada material, totalizando 90 carbonizações.

### **3.4. Análises das biomassas carbonizadas**

#### **3.4.1. Rendimento Gravimétrico em Carvão Vegetal**

As amostras foram pesadas antes e após o procedimento de carbonização, de forma que o rendimento gravimétrico em carvão vegetal foi determinado pela divisão da massa de carvão pela massa seca da biomassa, multiplicada por 100.

#### **3.4.2. Composição Química Imediata**

As amostras foram moídas em um moinho de laboratório do tipo Wiley e, posteriormente, peneiradas. A fração utilizada para as análises foi a que passou pela peneira com malha de 40 mesh e ficou retida na peneira com malha de 60 mesh (ASTM, 1982).

Para a determinação dos teores de carbono fixo (CF), cinzas (CZ) e materiais voláteis (MV), foi realizada a análise química imediata, de acordo com metodologia descrita pela norma ABNT NBR 8112 (ABNT, 1986) com algumas adequações. Estas consistiram na substituição dos cadinhos de platina por porcelana, e da redução de temperatura de 750 °C para 600 °C, na determinação do teor de cinzas.

#### **3.4.3. Poder Calorífico Superior**

O Poder Calorífico Superior (PCS) foi determinado de acordo com a metodologia descrita pela norma da ABNT NBR 8633 (ABNT, 1984), utilizando-se uma bomba calorimétrica adiabática.

### **3.5. Análise dos dados**

O experimento foi instalado segundo um Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC) em esquema fatorial duplo 5x6 (5 biomassas e 6 temperaturas finais de carbonização), com três repetições, totalizando 90 unidades amostrais.

Os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA), e quando estabelecidas diferenças significativas entre eles, foi aplicado o teste Tukey a 5% de significância. Para isso, foi utilizado o software de análise estatística R, versão 2.13.1.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Propriedades das biomassas *in natura*

Na Tabela 1 estão apresentados os valores médios das propriedades das biomassas.

**Tabela 1** – Propriedades das biomassas *in natura*

Biomassa	Análise Química Imediata			Densidade a granel (kg/m <sup>3</sup> )	PCS (kcal/kg)
	MV	CZ	CF		
Bambu	84,78 a	1,25 c	13,97 bc	319,40 a	4589 a
Bagaço de cana-de-açúcar	84,35 a	1,01 c	14,64 b	68,95 c	4241 ab
Casca de café	79,19 b	3,49 b	17,31 a	88,97 b	4122 b
Capim-elefante	76,81 b	7,80 a	15,39 b	40,04 c	4131 b
Serragem de eucalipto	83,25 a	3,27 b	13,47 bc	84,07 b	4439 a

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si a 5% de significância pelo teste tukey.

As propriedades das biomassas, tais como composição química imediata, densidade a granel e PCS, afetam a combustão da biomassa; processo de oxidação de um combustível que resulta na liberação de calor útil.

O percentual de materiais voláteis (MV) é desejável, uma vez que aceleram o processo e mantêm a chama uniforme. Sendo assim, das biomassas estudadas, o bambu, bagaço de cana-de-açúcar e serragem de eucalipto, se destacaram pelo seu alto teor, não havendo diferença significativa entre essas matérias-primas.

Outro componente a ser analisado é o teor de cinzas, visto que ocasionam atraso na combustão e contribuem para uma maior demanda de limpeza dos equipamentos. Observa-se que o capim-elefante é a biomassa menos indicada para o processo devido ao seu elevado teor de cinzas. Além disso, apresentou baixo teor de MV em relação às demais biomassas, e alto teor de umidade inicial, sendo esses seus principais gargalos para uso energético.

Segundo Leite (2013), a madeira tem uma pequena fração de cinzas, enquanto gramíneas possuem um alto valor. O autor afirma ainda que o conteúdo de cinzas da biomassa pode ser dividido em duas categorias: natural e contaminação. O teor advindo da contaminação consiste na incrustação de materiais como terra, areia e pedra que se agregam a biomassa durante as atividades de colheita, transporte e manuseio; e o natural é muito variável entre espécies, localização onde o indivíduo se desenvolve e nutrição mineral.

Em relação ao PCS, verificou-se que o bambu, bagaço de cana-de-açúcar e serragem de eucalipto foram as que apresentaram os maiores valores médios, apresentando, provavelmente devido ao teor de carbono e hidrogênio presente nestas biomassas (Tab. 1).

Na Tabela 2 estão apresentados os valores médios da Composição Elementar das biomassas.

**Tabela 2** – Composição Elementar das biomassas (%)

<b>Biomassa</b>	<b>C</b>	<b>H</b>	<b>S</b>	<b>N</b>	<b>O</b>	<b>Cinzas</b>
Bambu	50,70	5,95	0,20	0,40	41,50	1,25
Bagaço de cana-de-açúcar	46,00	6,10	0,20	0,30	46,40	1,00
Casca de café	49,45	6,15	0,20	1,10	39,60	3,50
Capim-elefante	45,80	5,75	0,20	1,30	39,15	7,80
Serragem de eucalipto	51,75	5,95	0,15	0,30	38,85	3,00

Pela análise elementar são determinados os teores de carbono (C), hidrogênio (H), oxigênio (O), nitrogênio (N), enxofre (S) e cinzas dos materiais, dos quais os elementos de maior contribuição para o poder calorífico são o carbono e o hidrogênio, pois quanto maior for a relação C/H mais energético será o material (VALE E GENTIL, 2008).

De acordo com Penedo (1980), a madeira é constituída de, aproximadamente, 50% de carbono, 6% de hidrogênio e 44% de oxigênio. No entanto, para resíduos agrícolas, essa composição pode variar, principalmente devido à influência das cinzas, uma vez que

biomassas com maiores teores de hemiceluloses e cinzas, como é o caso das gramíneas, apresentam maior razão oxigênio/ carbono do que madeiras (OASMAA *et al.*, 2010).

Cortez *et al.* (2008) ressaltam que a composição química elementar é a base para a análise dos processos de combustão, sendo útil para o cálculo dos volumes de ar, gases e entalpia e para a determinação do poder calorífico do combustível.

Os teores de nitrogênio e enxofre são de extrema relevância para produção de carvão vegetal, visto que o carvão quando produzido por biomassa com baixo teor de N e S, também conterá baixos teores em sua composição final, o que caracteriza uma vantagem ambiental.

Rousset *et al.* (2011) encontraram teores, em porcentagem (%), de C, H, N e O para bambu de 46,80; 6,38; 0,25 e 46,59, respectivamente. Ramos e Paula *et al.* (2011) para bagaço de cana-de-açúcar obtiveram 45,30; 6,80; 0,50 e 47,10. Huang *et al.* (2012) observaram para capim-elefante 46,50; 5,60; 1,70 e 46,90. E Oasmaa *et al.* (2010), encontraram 50,10; 6,00; 0,10 e 44,00 para eucalipto. Nota-se que os valores obtidos no presente estudo são semelhantes aos obtidos na literatura.

#### 4.2. Rendimento gravimétrico e propriedades do carvão vegetal

Na Tabela 3 são apresentados os valores médios de Rendimento Gravimétrico em Carvão Vegetal (RGCV) das biomassas estudadas. De acordo com a análise de variância houve efeito significativo da interação tipo de biomassa e temperatura final de carbonização.

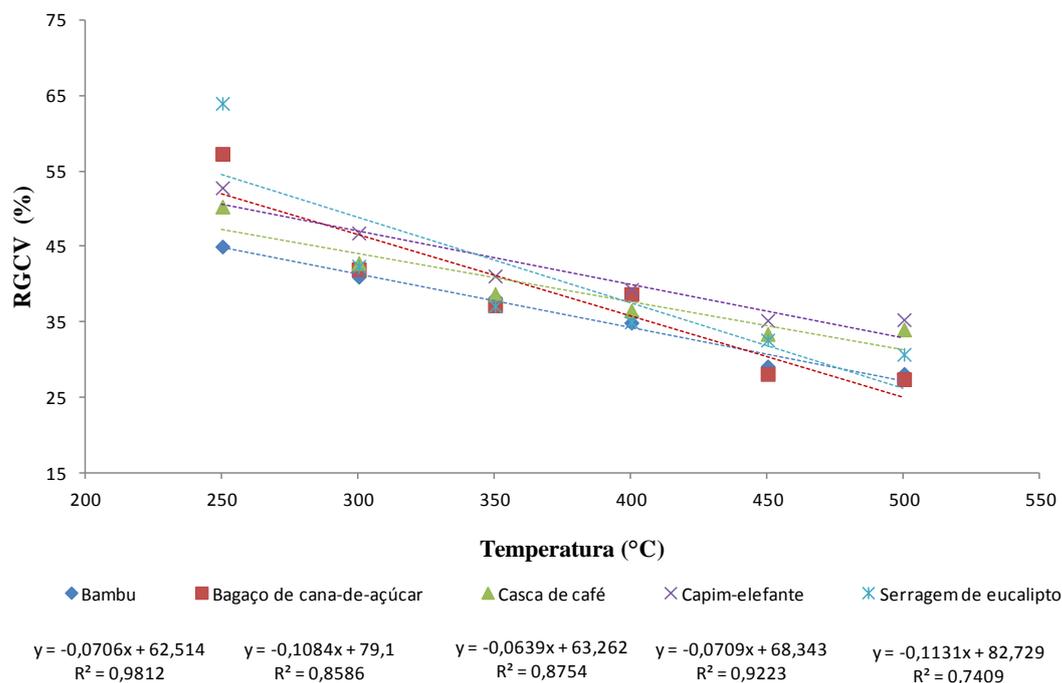
**Tabela 3** – Rendimento Gravimétrico em Carvão Vegetal, em %, das diferentes biomassas em função das temperaturas finais de carbonização

Biomassa	Temperatura final de carbonização (°C)					
	250	300	350	400	450	500
Bambu	45,0 Ca	41,0 Aab	38,2 Aab	34,9 Abc	29,1 Ac	28,1 Ac
Bagaço de cana-de-açúcar	57,3 ABa	42,0 Ab	37,2 Ab	38,7 Ab	28,1 Ac	27,4 Ac
Casca de café	50,3 BCa	42,8 Aab	38,7 Abc	36,5 Abc	33,4 Ac	34,0 Ac
Capim-elefante	52,8 BCa	46,8 Aab	41,1 Abc	39,3 Abc	35,2 Ac	35,3 Ac
Serragem de eucalipto	64,0 Aa	42,4 Ab	37,1 Abc	35,0 Abc	32,6 Ac	30,7 Ac

Médias seguidas de mesma letra maiúscula entre linhas (biomassa) e minúscula entre colunas (temperatura final de carbonização) não diferem entre si a 5% de significância pelo teste tukey.

Observa-se que à medida que se eleva a temperatura final de carbonização ocorre um decréscimo de rendimento. Isso já era esperado e se deve ao aumento na degradação dos constituintes químicos das biomassas pela exposição a altas temperaturas, ocasionando perda de massa.

Pereira (2012) obteve RGCV variando de 34,3 a 35,7% para diferentes clones de eucalipto também em fornos do tipo mufla e a uma temperatura final de carbonização de 450 °C. Esses valores estão próximos aos obtidos no presente estudo à 400 °C.



**Figura 2** – Rendimento Gravimétrico em Carvão Vegetal, em %, das diferentes biomassas em função das temperaturas finais de carbonização.

Observa-se na Figura 2 uma redução do RGCV com o aumento da temperatura final de carbonização, e a alta correlação existente entre eles, representada pelos coeficientes de determinação ( $r^2$ ).

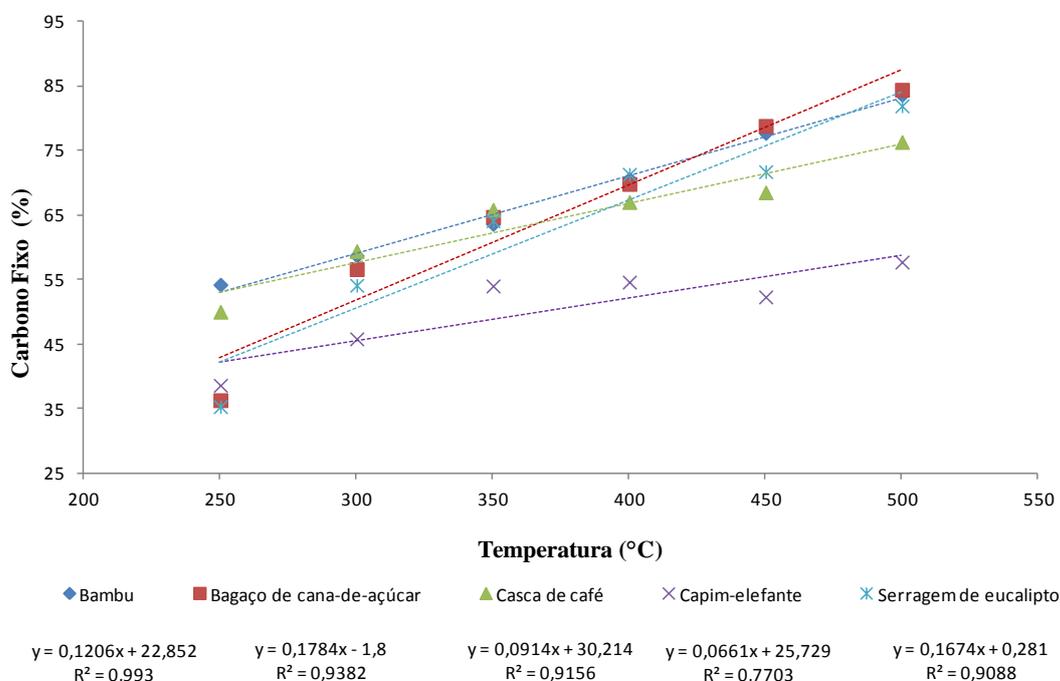
Na Tabela 4 estão apresentados os teores de carbono fixo das biomassas em função da temperatura final de carbonização. De acordo com a análise de variância houve efeito significativo da interação tipo de biomassa e temperatura final de carbonização.

**Tabela 4** – Teor de Carbono Fixo, em %, das diferentes biomassas em função das temperaturas finais de carbonização

Biomassa	Temperatura final de carbonização (°C)					
	250	300	350	400	450	500
Bambu	54,2 Ae	58,7 Ade	63,6 Ad	70,6 Ac	77,7 Ab	83,6 Aa
Bagaço de cana-de-açúcar	36,3 Be	56,6 Ad	64,7 Ac	69,8 Ac	78,8 Ab	84,4 Aa
Casca de café	50,0 Ad	59,4 Ac	65,8 Ab	67,0 Ab	68,5 Bb	76,3 Ba
Capim-elefante	38,6 Bc	45,8 Bb	54,0 Ba	54,6 Ba	52,3 Ca	57,7 Ca
Serragem de eucalipto	35,3 Be	54,1 Ad	64,1 Ac	71,3 Ab	71,7 Bb	81,9 Aa

Médias seguidas de mesma letra maiúscula entre linhas (biomassa) e minúscula entre colunas (temperatura final de carbonização) não diferem entre si a 5% de significância pelo teste tukey.

Observa-se que quanto maior a temperatura final de carbonização maior foi o percentual de carbono fixo no carvão vegetal, sendo os maiores valores à temperatura de 500 °C. Analisando o teor de CF das biomassas, nota-se que o bambu, bagaço de cana-de-açúcar e serragem de eucalipto obtiveram os maiores valores. A casca de café apresentou um teor intermediário e o capim-elefante o menor (Tabela 4).



**Figura 3** – Teor de Carbono Fixo, em %, das diferentes biomassas em função das temperaturas finais de carbonização.

Nota-se na Figura 3 a alta correlação também existente entre a temperatura final de carbonização e o teor de carbono fixo na biomassa, explicitado pelos elevados  $r^2$ .

Trugilho *et al.* (2001) ao analisarem o teor de CF no carvão da madeira de eucalipto encontraram valores variando entre 78,2 e 81,5%. Sendo assim, os carvões das biomassas estudadas, com exceção do capim-elefante, apresentam qualidade semelhante ao carvão de madeira de eucalipto e podem ser utilizados na siderurgia para injeção nas ventaneiras de alto-fornos, por exemplo.

Observa-se que houve um aumento do CF, dos carvões produzidos de bambu e bagaço de cana-de-açúcar, entre as temperaturas finais de 450 e 500°C. Porém, não há necessidade da utilização da temperatura máxima uma vez que os teores a 450°C já são satisfatórios.

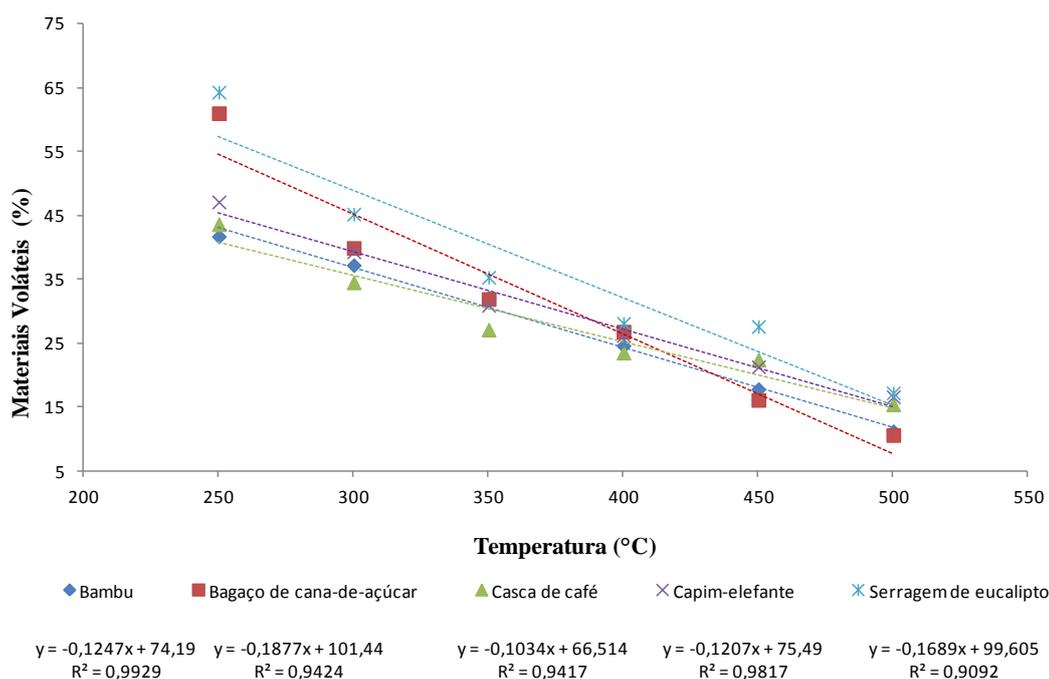
Na Tabela 5 estão apresentados os teores de materiais voláteis das biomassas em função da temperatura final de carbonização.

**Tabela 5** – Teor de Materiais Voláteis, em %, das diferentes biomassas em função das temperaturas finais de carbonização.

Biomassa	Temperatura final de carbonização (°C)					
	250	300	350	400	450	500
Bambu	41,7 Ba	37,2 BCab	32,1 ABb	24,6 Ac	17,8 BCd	11,2 BCe
Bagaço de cana-de-açúcar	61,0 Aa	39,9 ABb	31,9 ABc	26,8 Ac	16,1 Cd	10,6 Cd
Casca de café	43,6 Ba	34,5 Cb	27,1 Bc	23,5 Ac	22,4 Abc	15,4 ABCd
Capim-elefante	47,1 Ba	39,3 BCb	30,9 ABc	26,2 Acd	21,3 BCde	16,6 ABe
Serragem de eucalipto	64,3 Aa	45,2 Ab	35,3 Ac	28,1 Ad	27,6 Ad	17,2 Ae

Médias seguidas de mesma letra maiúscula entre linhas (biomassa) e minúscula entre colunas (temperatura final de carbonização) não diferem entre si a 5% de significância pelo teste tukey.

Observa-se que na Tabela 5 e Figura 4 que a tendência dos teores de MV é a mesma do RGCV, ou seja, diminui com o aumento da temperatura. Isso se deve ao fato de uma maior exposição da biomassa a elevadas temperaturas promover um maior desprendimento de compostos voláteis devido a uma maior degradação dos seus componentes químicos, além disso, há uma maior fixação de carbono no carvão produzido.



**Figura 4** – Teor de Materiais Voláteis, em %, das diferentes biomassas em função das temperaturas finais de carbonização.

Santos (2008) afirma que baixos teores de voláteis são desejáveis, visto que esse parâmetro apresenta comportamento inversamente proporcional ao teor de carbono fixo, comprometendo, dessa forma, a eficiência do carvão vegetal para diferentes usos. Logo, com base no teor de MV obtidos, os carvões produzidos à 450 °C podem ser utilizados os diversos fins, com a exceção da serragem de eucalipto, que demandou uma temperatura superior.

Na Tabela 6 estão apresentados os teores de cinzas das biomassas em função da temperatura final de carbonização.

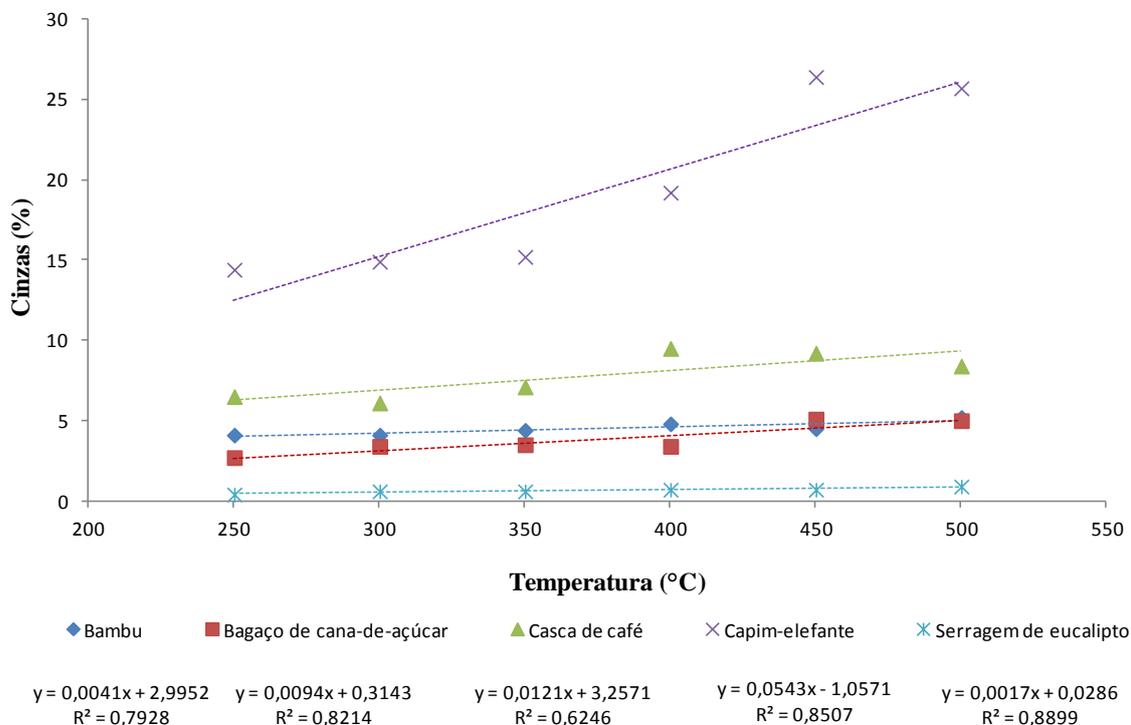
**Tabela 6** – Teor de Cinzas, em %, das diferentes biomassas em função das temperaturas finais de carbonização.

Biomassa	Temperatura final de carbonização (°C)					
	250	300	350	400	450	500
Bambu	4,1 Ca	4,1 Ca	4,4 Ca	4,8 Ca	4,5 Ca	5,2 Ca
Bagaço de cana-de-açúcar	2,7 Db	3,4 Cb	3,5 Cb	3,4 Db	5,1 Ca	5,0 Ca
Casca de café	6,5 Bb	6,1 Bb	7,1 Bb	9,5 Ba	9,2 Ba	8,4 Ba
Capim-elefante	14,4 Ac	14,9 Ac	15,2 Ac	19,2 Ab	26,4 Aa	25,7 Aa
Serragem de eucalipto	0,4 Ea	0,6 Da	0,6 Da	0,7 Ea	0,7 Da	0,9 Da

Médias seguidas de mesma letra maiúscula entre linhas (biomassa) e minúscula entre colunas (temperatura final de carbonização) não diferem entre si a 5% de significância pelo teste tukey.

Para as biomassas bambu e serragem de eucalipto a temperatura final de carbonização não afetou significativamente o teor de cinzas presentes nos carvões produzidos. Já para as demais biomassas foi observado um aumento significativo das CZ, isso se deve ao fato de ocorrer uma maior degradação dos constituintes orgânicos da biomassa pelo aumento da temperatura, concentrando, assim, os constituintes inorgânicos no carvão produzido.

Nota-se que o carvão de capim-elefante possui o maior teor de cinzas dentre as biomassas estudadas, o que pode vir a inviabilizar a sua utilização para algumas atividades, por exemplo para redução do minério de ferro. Os carvões de bambu, bagaço de cana-de-açúcar e casca de café também apresentaram valores acima do recomendado, o que pode prejudicar a utilização em determinadas atividades. Sendo assim, apenas o carvão produzido com serragem de eucalipto apresentou valores desejáveis de cinzas. Esses altos valores podem ser explicados pela contaminação dessas biomassas.



**Figura 5** – Teor de Cinzas, em %, das diferentes biomassas em função das temperaturas finais de carbonização.

Na Figura 5 observa-se correlação significativa e positiva entre a temperatura final de carbonização e o teor de cinzas.

Na Tabela 7 está apresentado o PCS das biomassas em função da temperatura final de carbonização.

De acordo com Oliveira *et al.*(2010), a temperatura final tem significativa influência na qualidade do carvão vegetal e quando carbonizados com temperatura final próximo a 450°C o carvão tende a apresentar elevado poder calorífico e teor de carbono fixo em sua constituição. Observa-se que as diferentes biomassas estudadas nesta pesquisa tiveram o mesmo comportamento.

**Tabela 7** – Poder Calorífico Superior, em kcal/kg, das diferentes biomassas em função das temperaturas finais de carbonização.

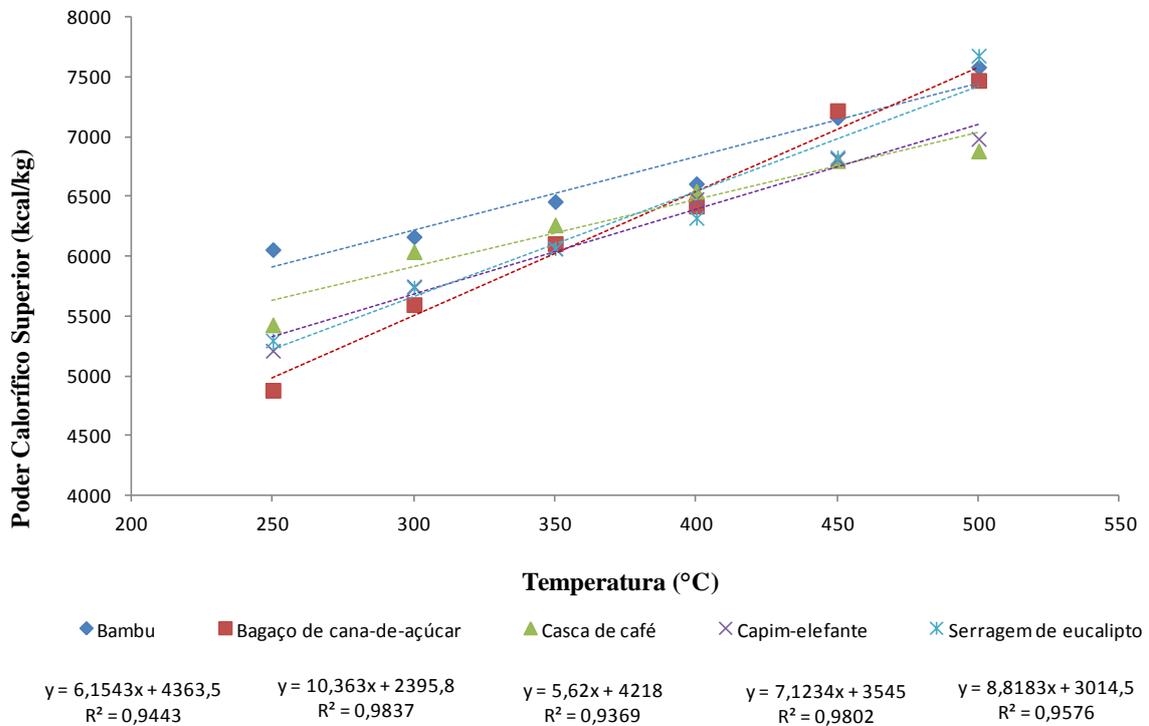
Biomassa	Temperatura final de carbonização (°C)					
	250	300	350	400	450	500
Bambu	6056 Ad	6164 Ad	6458 Ac	6607 Ac	7161 Ab	7582 Aa
Bagaço de cana-de-açúcar	4880 Ce	5596 Bd	6106 Bc	6420 ABb	7218 Aa	7471 Aa
Casca de café	5427 Be	6039 Ad	6262 ABcd	6544 ABbc	6800 Bab	6881 Ba
Capim-elefante	5211 Be	5748 Bd	6065 Bc	6478 ABb	6814 Ba	6982 Ba
Serragem de eucalipto	5296 Be	5739 Bd	6066 Bc	6321 Bc	6828 Bb	7678 Aa

Médias seguidas de mesma letra maiúscula entre linhas (biomassa) e minúscula entre colunas (temperatura final de carbonização) não diferem entre si a 5% de significância pelo teste tukey.

O carvão de bambu, casca de café e serragem de eucalipto apresentaram o seu maior PCS na temperatura final de 500°C. Já o carvão de bagaço de cana-de-açúcar e de capim-elefante, o maior valor foi observado a partir da temperatura de 450°C e não houve diferença significativa entre as temperaturas de 450 e 500°C, o que indica que não há necessidade de utilizar temperaturas tão elevadas para essas matérias-primas.

Dentre as biomassas estudadas o bambu, bagaço de cana-de-açúcar e serragem de eucalipto apresentaram os maiores valores de PCS, não diferindo estatisticamente entre si.

Na Figura 5 observa-se um aumento do poder calorífico das biomassas carbonizadas à medida que se eleva a temperatura final. O que evidencia a alta correlação entre esses parâmetros, assim como foi observado entre temperatura final e CF e temperatura final e MV.



**FIGURA 6** – Poder Calorífico Superior, em kcal/kg, das diferentes biomassas em função das temperaturas finais de carbonização.

O PCS dos carvões provenientes de madeira de eucalipto, geralmente utilizados para siderurgia, apresentam valores entre 7000 e 8000 kcal/kg (CARDOSO 2010), sendo assim, os carvões produzidos de bambu, bagaço de cana-de-açúcar e serragem de eucalipto podem ser utilizados para essa finalidade.

## 5. CONCLUSÕES

- ✓ Todas as biomassas estudadas apresentaram potencial para geração de energia;
- ✓ Visando a combustão direta as biomassas mais indicadas foram bambu, bagaço de cana-de-açúcar e serragem de eucalipto, pelo alto teor de voláteis, elevado poder calorífico e relação C/H, além dos baixos valores de cinzas;
- ✓ Visando a produção de carvão vegetal, as mesmas três biomassas se destacaram. Sendo a temperatura final de carbonização de 450°C a mais indicada, visto que os carvões produzidos nessa temperatura obtiveram elevados teores de carbono fixo e poder calorífico, com rendimento gravimétrico satisfatório e baixos teores de voláteis. Vale ressaltar que na temperatura de 500°C os carvões de bambu e serragem de eucalipto apresentaram melhora nas suas propriedades químicas em relação aos de 450°C sem perda significativa de rendimento.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM. **Standard methods of evaluating properties of wood-base fiber and particles materials**. Philladelphia: 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6922**: carvão vegetal - determinação da massa específica (densidade a granel), out/1981.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8112**: carvão vegetal: análise imediata. Rio de Janeiro, 1986. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8633**: carvão vegetal: determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro, 1984. 13 p.

BRITO, J. O.; TOMAZELLO FILHO, M.; SALGADO, A. L. de B. **Produção e caracterização do carvão vegetal de espécies e variedades de bambu**. IPEF, Piracicaba, n. 36, p. 13-17, 1987.

CARDOSO, M. T. **Desempenho de um sistema de forno-fornalha para combustão de gases na carbonização de madeira**. 2010. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2010.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento de safra brasileira: cana-de-açúcar**. Segundo levantamento: Safra 2013-2014. Companhia Nacional de Abastecimento, Brasília: Conab 2014.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento de safra brasileira: Café**. Quarto Levantamento: Safra 2014/2015. Companhia Nacional de Abastecimento, Brasília: Conab 2014.

CORTEZ, L.A.B; LORA, E.E.S.; GOMEZ, E.O. Caracterização da biomassa. In: CORTEZ, L.A.B; LORA, E.E.S.; GOMEZ, E.O. (org). **Biomassa para energia**. Campinas, São Paulo: Editora da UNICAMP, 2008.

FOELKEL, C. **Resíduos sólidos industriais da produção de celulose kraft de eucalipto**. Parte 01: Resíduos orgânicos fibrosos. Eucalyptus Online Book & Newsletter. (2007).

GONÇALVES, G.C., Mendes, E.S., Pereira, N.C., Sousa, J.C. (2006) **Produção de carvão ativado a partir de bagaço e melão de cana-de-açúcar**. Acta Sci. Technol., v.28, n.1, p. 21-27.

HUANG, Y.F.; CHEN, W.R.; CHIUEH, P.T.; KUAN, W.H.; LO, S.L. **Microwave torrefaction of rice straw and pennisetum**. Bioresource Technology, v. 123, p. 1–7. 2012.

LEITE, E. R. da S. **Madeira e carvão de Coffea arabica L.: caracterização para uso energético**. 2013. 159 p. Tese. (Doutorado em Processamento e Utilização da Madeira)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013.

MORAIS, P.H.D.; RESENDE, T.M; COSTA, M.M. Biopolímeros da Cana-de-Açúcar. In: SANTOS, F; COLODETTE, J.L; QUEIROZ, J.H. **Bioenergia e Biorrefinaria: Cana-de-Açúcar e Espécies Florestais**. Viçosa: Editora UFV, 2013. p. 203-250.

OASMAA, A.; SOLANTAUSTA, Y.; ARPIAINEN, V.; KUOPPALA,E.; SISPILA , K. **Fast Pyrolysis Bio-Oils from Wood and Agricultural Residues**. Energy & Fuels, v. 24, n. 2, p. 1380-1388, 2010.

OLIVEIRA, A. C.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; ALMEIRA, W.; PEREIRA, B. L. C.; CARDOSO, M. T. Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de Eucalyptus pellita F. Muell. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 87, p. 431-439, 2010.

PAULA, L. E. R. da. Caracterização química de resíduos lignocelulósicos visando a produção de energia. In: **ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA**, 12., 2010, Lavras. Anais... Lavras: Instituto Brasileiro da Madeira e das Estruturas de Madeira, 2010.

PENEDO, W.R. **Uso da madeira para fins energéticos**. Belo Horizonte: CETEC, 1980. 49 P.

PEREIRA, B. L. C. **Qualidade da madeira de Eucalyptus para produção de carvão vegetal**. 2012. Dissertação (Ciências Florestais) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.

QUESADA, D. M. (2001) **Seleção de genótipos de capim elefante (*Pennisetum purpureum* Schum.) para a alta produção de biomassa e eficiência da fixação biológica de nitrogênio (FBN)**. 140 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ.

RAMOS E PAULA, L. E.; TRUGILHO, P. F.; NAPOLI, A.; BIANCHI, M. L. **Characterization of residues from plant biomass for use in energy generation**. Cerne, v. 17, n. 2, p. 237-246, 2011.

ROUSSET, P.; AGUIAR, C.; LABBÉ, N.; COMMANDRÉ, J. M. **Enhancing the combustible properties of bamboo by torrefaction**. Bioresource Technology, v. 102, n. 17, p. 8225–8231, 2011.

SANTOS, M. A. S. Parâmetros de qualidade do carvão vegetal para uso em alto-forno. In: **FÓRUM NACIONAL SOBRE CARVÃO VEGETAL**, 1., 2008, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: UFMG, 2008.

TRUGILHO, P.F.; LIMA, J.T.; MORI, F.A.; LINO, A.L. **Avaliação de clones de Eucalyptus para a produção de carvão vegetal**. Revista Cerne, Lavras, v.7, n.2, p.114-201, 2001.

VALE, A. T.; GENTIL, L. V. Produção e uso energético de biomassas e resíduos agroflorestais. In: OLIVEIRA, J. T. S.; FIEDLER, N. C.; NOGUEIRA, M. (Ed.). **Tecnologias aplicadas ao setor madeireiro III**. Jerônimo Monteiro-ES: 2008. P. 19-246.

VALE, A.T., GENTIL, L.V. GONÇALEZ, J.C., COSTA, A.F. (2007) **Caracterização energética e rendimento da carbonização de resíduos de grãos de café (*Coffea arabica*, L) e de madeira (*Cedrelinga catenaeformis*)**, Duke. Cerne, Lavras, v.13, n.4, p.416-420.