

ANA FLÁVIA NEVES MENDES CASTRO

**POTENCIAL DOS RESÍDUOS FLORESTAIS E DOS GASES DA
CARBONIZAÇÃO DA MADEIRA PARA GERAÇÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de Doctor Scientiae.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2014

Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da
Universidade Federal de Viçosa - Campus Viçosa

T

C355p
2014 Castro, Ana Flávia Neves Mendes, 1986-
Potencial dos resíduos florestais e dos gases da carbonização da
madeira para geração de energia elétrica / Ana Flávia Neves Mendes
Castro. - Viçosa, MG, 2014.
x, 110f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Biomassa florestal. 2. Resíduos vegetais. 3. Carbonização. 4.
Energia elétrica. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de
Engenharia Florestal. Programa de Pós-graduação em Ciência Florestal. II.
Título.

CDD 22. ed. 333.9539

ANA FLÁVIA NEVES MENDES CASTRO

**POTENCIAL DOS RESÍDUOS FLORESTAIS E DOS GASES DA
CARBONIZAÇÃO DA MADEIRA PARA GERAÇÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de Doctor Scientiae.

APROVADA: 05 de dezembro de 2014.

Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho
(coorientadora)

Benedito Rocha Vital
(coorientador)

Renato Vinícius Oliveira Castro
(examinador externo)

Cláudio Homero Ferreira Silva
(examinador externo)

Angélica de Cássia Oliveira Carneiro
(orientadora)

AGRADECIMENTOS

À Deus que sempre esteve comigo, iluminando meus passos e minhas decisões.

Aos meus pais, José Maria Mendes e Maria Aparecida Neves e aos meus irmãos André e José Victor por todo amor, carinho, compreensão e incentivo.

Ao Renato, por estar sempre ao meu lado e pelo amor, carinho, paciência e dedicação e à minha filha Ana Clara, que encheu de luz a minha vida.

Às famílias, Oliveira Castro e Neves Mendes e às minhas amigas-irmãs que mesmo de longe sempre estão presentes. Aos amigos de Viçosa que fizeram essa trajetória muito mais agradável.

À professora Angélica de Cássia Oliveira Carneiro pela valiosa orientação, pelos permanentes incentivos e confiança depositada antes e durante o desenvolvimento do trabalho. Agradeço pela dedicação e exemplo de profissional.

À professora Ana Márcia que despertou em mim o interesse pela “Tecnologia da Madeira”, e me incentivou a continuar na busca pelo conhecimento. Pela confiança, amizade, e apoio em todos os momentos.

Ao professor Benedito Rocha Vital, ao pesquisador Cláudio Homero Ferreira Silva pelas importantes sugestões para esse trabalho.

Ao Paulo César Faria Andrade e ao Wanderley Luiz Paranaíba Cunha pela acolhida na ArcelorMittal BioFlorestas e importantes sugestões para esse trabalho.

Aos funcionários dos Laboratórios de Painéis de Energia, Laboratório de Propriedades da Madeira, que me ajudaram em todas as etapas do desenvolvimento desse trabalho, e além de tudo me proporcionaram ótimos momentos!

À ArcelorMittal BioFlorestas e à Cemig pela parceria na elaboração e execução desse projeto.

À Universidade Federal de Viçosa (UFV) e ao Departamento de Engenharia Florestal pela oportunidade de desenvolver esta tese.

Aos professores e funcionários da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM), pelos ensinamentos, convivência e companhia durante minha graduação.

À CAPES, ao CNPq, à FAPEMIG pelo apoio financeiro.

Agradeço a todos aqueles que, direta ou indiretamente, colaboraram na execução deste trabalho.

BIOGRAFIA

ANA FLÁVIA NEVES MENDES CASTRO, filha de José Maria Mendes e Maria Aparecida Neves, nasceu em Belo Horizonte, Minas Gerais, aos 25 de julho de 1986.

Residiu em Sete Lagoas, onde cursou o ensino fundamental na Escola Estadual Dr. Ulisses de Vasconcelos e o ensino médio no Colégio Impulso.

Ingressou no curso de Engenharia Florestal na Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM), Diamantina, em fevereiro de 2005. Obteve o título de Engenheira Florestal em julho de 2009.

Em agosto de 2009 ingressou no mestrado pelo programa de Pós-Graduação da Universidade Federal de Viçosa (UFV), onde obteve o título de Mestre em Ciência Florestal em 25 de julho de 2011.

Em agosto de 2011 ingressou no curso de doutorado, também pelo programa de Pós-Graduação da Universidade Federal de Viçosa (UFV), submetendo à defesa de tese, para obtenção do título de doutora em Ciência Florestal, em 05 de dezembro de 2014.

SUMÁRIO

Página

RESUMO.....	viii
ABSTRACT.....	x
INTRODUÇÃO GERAL.....	1
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	4
CAPÍTULO I	5
QUANTIFICAÇÃO DE RESÍDUOS DA COLHEITA FLORESTAL E RESÍDUOS DA CARBONIZAÇÃO.....	5
1. INTRODUÇÃO	7
2. MATERIAL E MÉTODOS	9
2.1. Local do experimento.....	9
2.2. Inventário florestal e amostragem de biomassa	10
2.3. Sistema de colheita	11
2.4. Determinação da biomassa.....	12
2.5. Quantificação da perda de casca no processo	13
2.6. Quantificação de atíços e finos de carvão vegetal.....	14
2.7. Estimativa de biomassa por hectare	15
2.8. Análise estatística	16
3. RESULTADOS.....	17
4. DISCUSSÕES.....	22
5. CONCLUSÕES	26
6. AGRADECIMENTOS	27
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	28
CAPÍTULO II.....	31
POTENCIAL DOS RESÍDUOS DA COLHEITA FLORESTAL E RESÍDUOS DA CARBONIZAÇÃO PARA GERAÇÃO DE ENERGIA	31
1. INTRODUÇÃO	33

2.	MATERIAL E MÉTODOS	35
2.1.	Local do experimento.....	35
2.2.	Obtenção do material de estudo	36
2.3.	Quantificação de carvão vegetal, atíços e finos	37
2.4.	Qualificação da biomassa.....	37
2.4.1.	Densidade a granel das folhas e dos galhos.....	38
2.4.2.	Poder calorífico superior.....	38
2.4.3.	Potencial energético	38
2.4.4.	Análise química imediata.....	39
2.4.5.	Determinação da composição elementar.....	39
2.4.6.	Determinação do teor de minerais.....	39
2.5.	Análise estatística	40
3.	RESULTADOS.....	41
4.	DISCUSSÕES.....	49
5.	CONCLUSÕES	54
6.	AGRADECIMENTOS	55
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	56
	CAPÍTULO III.....	59
	EQUAÇÕES ALOMÉTRICAS PARA ESTIMAR ESTOQUE DE ENERGIA EM ÁRVORES DE EUCALIPTO	59
1.	INTRODUÇÃO	61
2.	MATERIAL E MÉTODOS	63
2.1.	Local do experimento.....	63
2.2.	Inventário florestal e amostragem de biomassa	63
2.3.	Estimativa de energia em árvores de eucalipto	65
2.4.	Seleção dos modelos	67
2.5.	Avaliação das equações	69
2.6.	Validação das equações.....	70
3.	RESULTADOS.....	71
4.	DISCUSSÕES.....	76
5.	CONCLUSÕES	79
6.	AGRADECIMENTOS	80
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	81
	CAPÍTULO IV.....	83
	COGERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DOS GASES DA CARBONIZAÇÃO E BIOMASSA FLORESTAL USANDO MICROTURBINA	83

1. INTRODUÇÃO	85
2. MATERIAL E MÉTODOS	87
2.1. Descrição do sistema de transporte de gases	89
2.2. Descrição do sistema de injeção de biomassa como combustível auxiliar.....	89
2.3. Descrição do queimador de gases - fornalha	90
2.4. Descrição da turbina	91
2.5. Parâmetros para avaliação do sistema de cogeração.....	96
3. RESULTADOS.....	98
4. DISCUSSÕES.....	102
5. CONCLUSÕES	106
6. AGRADECIMENTOS	107
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	108
CONCLUSÕES GERAIS	110

RESUMO

CASTRO, Ana Flávia Neves Mendes, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, dezembro de 2014. **Potencial dos resíduos florestais e dos gases da carbonização da madeira para geração de energia elétrica.** Orientadora: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro. Coorientadores: Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho e Benedito Rocha Vital.

A elevada demanda por energia no Brasil e no mundo tem estimulado o desenvolvimento de pesquisas para geração de energia a partir de combustíveis renováveis. Nesse contexto, a biomassa florestal apresenta destaque, salientando a importância dos resíduos florestais e dos gases da carbonização, uma vez que não são utilizados e podem causar problemas ambientais. Entretanto, é necessário aprimorar o conhecimento sobre esses combustíveis de modo a encontrar uma maneira mais efetiva para sua utilização. Sendo assim, esse trabalho teve como objetivo principal quantificar e qualificar o estoque de biomassa total da parte aérea de uma floresta de *Eucalyptus* em idade de corte e verificar a viabilidade do uso desse material para a geração de energia térmica e elétrica, bem como avaliar o desempenho de um sistema de cogeração de energia a partir da queima dos gases da carbonização, por meio de uma turbina a gás de combustão externa, para produção de energia elétrica. Para isso, foi estudada uma floresta *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*, em idade de corte (79 meses), sendo determinado o estoque de biomassa acima do solo; as propriedades físicas, químicas e o potencial energético do material; ajuste de modelos alométricos para gerar equações para estimar o estoque de energia na árvore; e avaliou-se o desempenho de uma planta de cogeração de energia a partir dos gases da carbonização utilizando uma turbina à gás de combustão externa. Verificou-se que o estoque de biomassa florestal foi $145,99 \text{ t.ha}^{-1}$, sendo que deste montante $17,03 \text{ t.ha}^{-1}$ (11,67%) está em forma de resíduos gerados por ocasião da colheita e, a biomassa residual do processo de produção de carvão vegetal foi de aproximadamente $19,82 \text{ t.ha}^{-1}$. Os resíduos da colheita florestal e da carbonização apresentaram potencial para serem utilizados para a geração de energia. As equações selecionadas foram adequadas para a estimativa de estoque de energia nas árvores de *Eucalyptus*. Observou-se que foi possível gerar energia a partir da queima dos gases da carbonização em fornos de alvenaria utilizando turbina a gás. Entretanto, a turbina

selecionada não foi capaz de gerar energia suficiente para suprir a demanda da planta de cogeração, sendo necessário a utilização de uma turbina com maior potência e acoplar um maior número de fornos para que a geração de energia seja viável.

ABSTRACT

CASTRO, Ana Flávia Neves Mendes, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, December, 2014. **Potential of forest residues and the wood carbonization gas to generate electricity.** Advisor: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro. Co-advisors: Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho and Benedito Rocha Vital.

The high energy demand in Brazil and the world has stimulated the development of research for energy generation from renewable fuels. In this context, forest biomass has highlighted, emphasizing the importance of forest residues and carbonization gases, since they are not used and can cause environmental problems. However, it is necessary to improve the knowledge of those fuels to find a more effective way to use. Therefore, this study aimed to quantify and qualify the total biomass stock of the Eucalyptus forest aerial part in cutting age and verify the feasibility of using this material for the heat and electricity generation, and to evaluate the performance of a cogeneration system from the carbonization gases burning through a external flue gas turbine to produce electricity. For this, a forest Eucalyptus urophylla x Eucalyptus grandis was studied, at cutting age (79 months), being determined the above-ground biomass stock; the physical, chemical and energy potential of the material; adjustment of allometric models to generate equations to estimate the energy supply in the tree; and was evaluated the performance in a cogeneration plant from the carbonization gases using a turbine to the external flue gas. It was found that the stock of forest biomass was 145.99 t.ha^{-1} , and of this amount 17.03 t ha^{-1} (11.67%) is in the form of waste generated at harvest and the residual biomass charcoal production process was approximately 19.82 t.ha^{-1} . Forest harvesting and carbonization waste presented potential to be used for power generation. The selected equations were accurate for inventory estimation of energy in the Eucalyptus trees. It was observed that it was possible to generate energy from combustion of the carbonization gases brick kilns using the gas turbine. However, the selected turbine could not generate enough power to meet the demand cogeneration plant, necessitating the use of a turbine coupling with greater power and a greater number of furnaces for power generation feasible.

INTRODUÇÃO GERAL

É notável o aumento na demanda por energia no âmbito mundial, bem como a necessidade de aumentar produção de energia de forma sustentável, de modo a minimizar a emissão de gases de efeito estufa. Sendo assim, os combustíveis renováveis, em destaque a biomassa, vem apresentando grande relevância em pesquisas (MULLER et al., 2005; VALE e GENTIL, 2008; RAMOS e PAULA et al., 2011; PROTÁSIO et al., 2011).

No Brasil, a biomassa florestal apresenta grande importância devido à vasta área de florestas plantadas. Essa biomassa pode ser diferenciada em três principais grupos: o material advindo da colheita florestal (ou resíduo da colheita), os resíduos gerados devido ao processamento da madeira e a madeira oriunda de florestas energéticas (SOUZA et al., 2012). O resíduo da colheita florestal é formado, portanto, por galhos, folhas, uma porção das cascas e parte da madeira que não é aproveitada, como as ponteiros (madeira com diâmetro inferior ao comercial). No caso da produção de carvão vegetal, os resíduos sólidos gerados durante a transformação da madeira são os atiços, os finos e as cascas soltas.

Do ponto de vista de sustentabilidade, os resíduos florestais podem se tornar uma importante fonte de energia renovável, pois de maneira geral, esse material não é aproveitado, apesar de apresentar potencial de utilização, uma vez que possui energia estocada. Entretanto, existem barreiras que dificultam a sua utilização como poucos estudos a respeito da quantidade e qualidade desse resíduo, e quanto à melhor forma de transportá-lo.

No Brasil, a produção de carvão vegetal é uma atividade muito relevante, em especial para o estado de Minas Gerais, que possui o maior parque siderúrgico a carvão vegetal do mundo e tem se destacado como o maior produtor e consumidor dessa matéria prima. Durante a carbonização ocorre a formação do carvão vegetal e

de gases condensáveis e não condensáveis. Parte desses gases são combustíveis ricos em carbono e hidrogênio que, sob condições adequadas de temperatura e pressão, são capazes de, na presença de oxigênio, sofrer reações químicas, ocorrendo a liberação de energia sob a forma de luz e calor (CARDOSO et al., 2010).

O aproveitamento dos gases da carbonização é uma possibilidade de geração de energia inteligente, pois consegue-se associar a mitigação de um problema ambiental com um aproveitamento energético. A utilização de caldeiras para geração de energia já é um processo conhecido e utilizado largamente, entretanto demanda de grande volume de água. A possibilidade de utilização de uma tecnologia que não dependa da água é uma melhora considerável no processo, visto que o Brasil vem passando por um momento de grave restrição no uso de água. Dessa forma, as turbinas à gás de combustão externa são uma alternativa que vem sendo aprimorada e estudada que, em princípio, aplicam como fluido de trabalho o ar em altas temperaturas.

Sendo assim, a cogeração, que pode ser definida como a produção de duas ou mais formas de energia a partir de um único combustível, se apresenta como uma opção para o aproveitamento dos gases da carbonização e dos resíduos florestais para geração de energia limpa de forma sustentável.

A tese foi dividida em capítulos, sendo o objetivo principal quantificar e qualificar o estoque de biomassa total da parte aérea de uma floresta de Eucalyptus em idade de corte e verificar a viabilidade do uso desse material para a geração de energia térmica e elétrica, bem como avaliar o desempenho de um sistema de cogeração de energia a partir da queima dos gases da carbonização, por meio de uma turbina a gás de combustão externa, para produção de energia elétrica.

Os objetivos específicos foram a determinação da biomassa das árvores divididas em suas principais partes (madeira, casca, galhos e folhas); quantificar a perda de biomassa durante as etapas de corte, extração, secagem, transporte e transformação da madeira em carvão vegetal; determinar as propriedades químicas e físicas dos resíduos da colheita florestal e do processo de carbonização da madeira; ajustar modelos alométricos e gerar equações para estimar o estoque de energia na árvore; quantificar o consumo de biomassa florestal para iniciar o processo de queima dos gases da carbonização.

Para atingir os objetivos propostos a tese foi estruturada em quatro capítulos, sendo que cada capítulo encontra-se na forma de artigo científico, conforme apresentado a seguir:

- Capítulo 1: “Quantificação de resíduos da colheita florestal e resíduos da carbonização”;
- Capítulo 2: “Potencial dos resíduos da colheita florestal e resíduos da carbonização para geração de energia”;
- Capítulo 3: “Equações alométricas para estimar estoque de energia em árvores de eucalipto”;
- Capítulo 4: “Cogeração de energia a partir dos gases da carbonização e biomassa florestal usando microturbina”.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CARDOSO, M. T.; DAMÁSIO, R. A. P.; CARNEIRO, A. C. O.; JACOVINE, L. A. G; VITAL, B. R.; BARCELLOS, D. C. Construção de um sistema de queima de gases da carbonização para redução da emissão de poluentes. **Cerne**, Lavras, v. 16, Suplemento, p. 115-124, 2010.

MULLER, M. D.; COUTO, L.; NEVES, J. C. L. Produção de biomassa e balanço nutricional de plantações de eucalipto clonal em diferentes densidades de plantio no município de Itamarandiba – MG. **Biomassa & Energia**, v. 2, n. 2, p. 91-101, 2005.

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**, v. 31, n. 66, p. 113-122, 2011.

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.

SOUZA, M. M., SILVA, D. A., ROCHADELLI, R., SANTOS, R. C. Estimativa de poder calorífico e caracterização para uso energético de resíduo da colheita e do processamento de *Pinus taeda*. **Floresta**, v. 42, n. 2, p. 325 - 334, 2012.

VALE, A. T.; GENTIL, L.V. Produção e uso energético de biomassa e resíduos a agroflorestais. In: OLIVEIRA, J. T. S.; FIEDLER, N. C.; NOGUEIRA, M. (Ed.). **Tecnologias aplicadas ao setor madeireiro III**. Jerônimo Monteiro – ES: 2008. p. 196-246.

CAPÍTULO I

QUANTIFICAÇÃO DE RESÍDUOS DA COLHEITA FLORESTAL E RESÍDUOS DA CARBONIZAÇÃO

RESUMO – A atividade florestal é grande geradora de resíduos, em todas as etapas do processo, e por isso é importante avaliar o potencial de aproveitamento desses resíduos para destiná-los à melhor utilização. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho foi a quantificação do estoque de biomassa total da parte aérea de uma floresta de Eucalyptus em idade de corte, divididas em suas principais partes (madeira, casca, galhos e folhas) e quantificar a perda de biomassa (casca) durante as etapas de corte, extração, secagem, transporte e transformação da madeira em carvão vegetal. Para isso, foi avaliado um povoamento de Eucalyptus urophylla x Eucalyptus grandis aos 79 meses de idade. Foram selecionadas 60 árvores amostra para cubagem rigorosa, das quais foram recolhidas amostras de folhas e galhos; das 60 árvores, 15 foram selecionadas para obtenção da densidade básica da madeira e da casca. Para determinar a perda de casca foram selecionadas 100 toras de 3 metros de comprimento em três etapas distintas da movimentação das toras: na beirada do talhão, no pátio da UPE e dentro do forno. Foi determinada a densidade a granel do carvão vegetal, dos atíços e finos, bem como a densidade relativa aparente do carvão e dos atíços. Verificou-se que o estoque de biomassa de uma floresta de Eucalyptus foi de 145,99 t.ha⁻¹, sendo que, deste montante 11,67% está em forma de resíduos gerados por ocasião da colheita, e apresentam potencial para utilizações principalmente para a geração de energia térmica e elétrica. A perda total de casca foi de 25,7%, sendo que a etapa que gera maior perda de casca é após a primeira, quando a madeira ainda se encontra na beirada do talhão. Com relação aos resíduos gerados na unidade de produção de carvão os finos lideram com aproximadamente 20%.

Palavras-Chave: Potencial energético; geração de energia; inventário de resíduos.

CHAPTER I

QUANTIFICATION OF FORESTRY AND CARBONIZATION WASTE

ABSTRACT - The forestry is a great waste generator in all process stages, and therefore it is important to evaluate the use potential of this waste to consign them to the best use. In this sense, the objective of this work was the quantification of total biomass of the Eucalyptus forest aerial part at cutting age, divided into its main parts (wood, bark, branches and leaves) and to quantify the biomass (bark) loss during the steps of cutting, extraction, drying, transport and transformation of wood into charcoal. For this, a Eucalyptus urophylla x Eucalyptus grandis stand at the age of 79 months was evaluated. Were selected 60 sample trees to be cubed, of which were collected samples of leaves and branches; of 60 trees, 15 were selected for achievement the wood and bark basic density. To determine the bark loss were selected 100 logs of 3 meters long in three different stages of the logs movement: the edge of the field, in the courtyard of UPE and in the oven. We determined the bulk density of charcoal, and thin, and the apparent relative density of the coal and wood half carbonized. It was found that the biomass stock of a Eucalyptus forest was 145.99 t ha^{-1} , and that this amount 11.67% is in the form of waste generated at harvest, and have potential for use mainly for heat and electricity generation. The total bark loss was 25.7%, and the step that generates greater loss of bark is after the first, when the wood is still on the edge of the field. Regarding the waste generated in coal production unit thin lead with about 20%.

Keywords: Potential energy; power generation; waste inventory.

1. INTRODUÇÃO

Quando se trata de florestas plantadas, principalmente de florestas de Eucalyptus, pode-se dizer que a madeira é a principal matéria prima que se deseja obter, sendo que as outras partes da árvore (casca, galhos, folhas, raízes) são muitas vezes tratadas como resíduos. Sendo assim, a atividade florestal, de forma geral, é caracterizada por apresentar grande produção de resíduos no processo produtivo (BRAND et al.,2002; WIECHETECK, 2009), sendo que esses são gerados em todas as etapas do processo, desde a colheita florestal até a destinação do produto final.

Os resíduos florestais são constituídos por todo material que é deixado no campo durante a colheita de madeira, tanto em florestas naturais como em reflorestamentos, que são as folhas, os galhos, uma porção da casca e parte da madeira que não é aproveitada, como as ponteiras (madeira com diâmetro inferior ao comercial). Outros resíduos são gerados nas etapas seguintes, após a colheita das árvores, devido ao processamento da madeira (mecânico, físico e/ou químico), que não são incorporadas ao produto final (BELLOTE et al., 1998).

Nas florestas de Eucalyptus destinadas à produção de carvão vegetal não é comum realizar o descascamento da madeira, seja no campo ou no pátio, sendo a casca também utilizada como matéria prima do processo de carbonização. Entretanto, sabe-se que essa fração da biomassa de Eucalyptus se desprende da madeira com muita facilidade, e acaba se tornando um resíduo durante a movimentação das toras. Não se sabe corretamente qual a quantidade de casca que se transforma em resíduo, nem em qual etapa do processo esse resíduo é gerado, pois ainda não existem estudos que realizaram essa quantificação. Além disso, são vários os fatores que influenciam a perda de casca, como por exemplo: a secagem da madeira, o processo de colheita utilizado, a movimentação que a madeira sofre até o

enfornamento, dentre outros, podendo influenciar na quantidade de casca que é perdida.

Uma característica fundamental do resíduo florestal é a sua grande heterogeneidade, o que dificulta grandemente a utilização adequada desta biomassa (PINCELLI, 2011), bem como a sua quantificação.

É importante ressaltar que o resíduo florestal apresenta um grande potencial para a geração de energia térmica, elétrica ou ambas (co-geração), através de sua combustão direta ou incineração, além da produção de briquetes ou pellets para posterior combustão (WIECHETECK, 2009), deixando de ser tratado apenas como um resíduo e pode se tornar uma matéria prima no processo de geração de energia, com ganhos econômicos.

Sendo assim, o conhecimento da quantidade e qualidade dos resíduos florestais é importante, uma vez que permite avaliar o seu potencial de aproveitamento (BAGGIO e CARPANEZZI, 1995), bem como realizar o dimensionamento do seu processo de aproveitamento e dos equipamentos.

Portanto, este trabalho teve como objetivo quantificar o estoque de biomassa total da parte aérea de uma floresta de Eucalyptus em idade de corte, divididas em suas principais partes (madeira, casca, galhos e folhas) e quantificar a perda de biomassa durante as etapas de corte, extração, secagem, transporte e transformação da madeira em carvão vegetal.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Local do experimento

O presente estudo foi desenvolvido na empresa ArcelorMittal BioFlorestas na cidade de Martinho Campos – MG. O clima da região é do tipo Cwa, segundo a classificação de Köppen, caracterizado por verões úmidos e invernos secos, com temperatura média anual entre 19,8 e 25,3°C, e precipitação média anual de 1.400 mm (SILVA et al., 2012).

Inicialmente definiu-se uma área de produção de 50 hectares, correspondente ao material genético mais representativo da empresa (*Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*), com espaçamento inicial de 3,0 m x 2,5 m, que se encontrava em idade de corte (79 meses) no período de execução do projeto. Outras informações referentes à área de estudo estão descritas na Tabela 1.

Tabela 1 - Informações cadastrais e de produtividade referentes à área de estudo

Data de Plantio (dd/mm/aaaa)	20/09/2005
Data de Corte (dd/mm/aaaa)	15/06/2012
Idade (meses)	79 (inventário)
Declividade máxima da área	3% (plano)
Volume total com casca (m ³ ha ⁻¹)	283,18
Número de árvores (ha)	1235
Mortalidade	7%
IMA _{6,6} (m ³ ha ⁻¹ ano ⁻¹)	42,9

em que IMA é o incremento médio anual em volume com casca na idade de corte (Campos e Leite, 2013).

2.2. Inventário florestal e amostragem de biomassa

Foi realizado o inventário da área antes do corte da floresta, pela metodologia da amostragem casual simples (SOARES et al., 2011), de acordo com a metodologia da empresa para inventários pré-corte. A partir dos dados deste inventário foi determinado um erro máximo admissível de $\pm 10\%$, a 95% de probabilidade e a produtividade estimada foi de $283,18 \pm 3,1\%$ m³ de madeira com casca por ha.

Para a estimativa do estoque de biomassa total da floresta antes da colheita, bem como da biomassa estocada em cada parte das árvores (madeira, casca, galho, folha), foram realizadas cubagens rigorosas de 60 árvores-amostra, sendo que foram obtidas árvores com dimensões que contemplassem todas as classes diamétricas observadas, conforme sugerido por Campos e Leite (2013). Dessas árvores, foram retiradas as folhas, galhos e casca, e depositadas separadamente em lonas para pesagem logo após a colheita das árvores, de modo a evitar a perda de umidade (Figura 1).

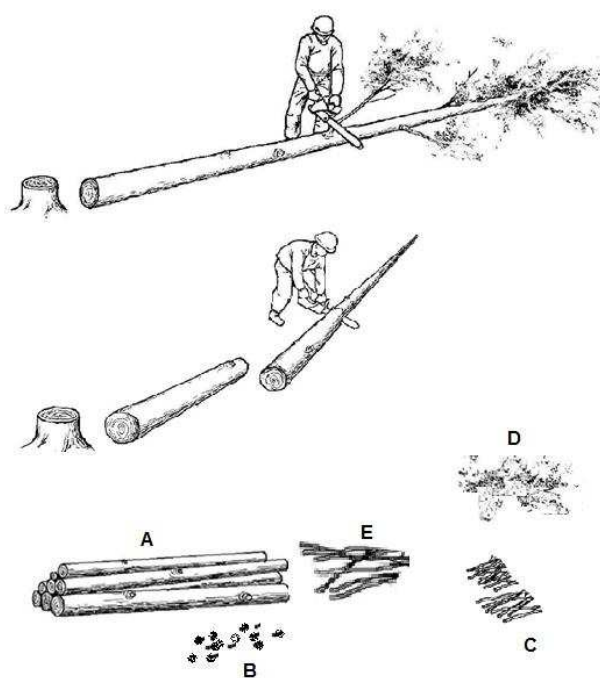


Figura 1- Separação das partes da árvore: madeira (A), casca (B), galhos (C), folhas (D) e ponteiros (E).

Fonte: Adaptado de Centre for Standardization and Environment (2011).

Após a pesagem do material de cada árvore, foram retiradas amostras de cada uma das partes, com aproximadamente 300 gramas cada, para determinação do teor

de umidade e estimativa da biomassa. A amostra de folhas continha folhas verdes de diferentes tamanhos, a amostra de galhos, apenas os galhos que estavam vivos (com folhas), com diferentes diâmetros, e a amostra de cascas foi coletada ao longo de cada árvore.

Do tronco foram obtidos cinco discos equidistantes, em diferentes posições no tronco, ou seja, a 0, 25, 50, 75 e 100% da altura comercial de cada árvore amostra, além do disco na altura do dap (diâmetro à altura do peito), totalizando seis discos por árvore. Os discos também foram pesados logo após o corte das árvores, para evitar a perda de umidade.

O volume de ponteiros foi determinado com base no diâmetro mínimo comercial adotado pela empresa, ou seja, toras com diâmetro < 3,0 cm.

As amostras de cascas, galhos, folhas e os discos de madeira de cada uma das 60 árvores foram separadas em sacos plásticos, para posterior envio ao laboratório para obtenção da massa seca e também densidade básica da madeira e da casca.

2.3. Sistema de colheita

O sistema de colheita foi totalmente mecanizado. A sequência das atividades da colheita foi a seguinte: (1) derrubada e (2) extração (arraste). Em seguida as árvores foram traçadas em comprimentos de 3 metros (3), seguindo o sistema de colheita adotado pela empresa (Cut-to-length). Foi utilizado o seguinte conjunto de máquinas e/ou equipamentos: Feller-Buncher (1) + Skidder (2) + Garra Traçadora (3).

Portanto, o feller-buncher realiza o corte e derrubada das árvores que ficam no talhão por um período. Posteriormente, as árvores são arrastadas até a beirada do talhão pelo skidder. A última etapa é realizada pela garra traçadora que secciona as árvores deixadas na beirada do talhão em toras de 3 m de comprimento.

Todos os galhos, folhas e ponteiros foram deixados no campo e classificadas como resíduos da colheita florestal. A madeira com casca foi depositada na margem da área de produção, onde permaneceu por 90 dias para a secagem.

2.4. Determinação da biomassa

A biomassa dos galhos e das folhas das 60 árvores amostradas foi determinada a partir da equação 1 (SOARES et al., 2011):

$$PS(c) = \frac{PU(c) \times PS(a)}{PU(a)} \quad (\text{eq.1})$$

em que:

PS(c) = biomassa, em kg;

PU(c) = massa de matéria úmida total de folhas ou galhos, em campo, em kg;

PU(a) = massa de matéria úmida da amostra levada ao laboratório, em kg; e

PS(a) = massa de matéria seca de amostra, em kg.

Das 60 árvores cubadas, foram selecionadas 15 árvores amostra, sendo três em cada uma das cinco classes de diâmetro identificadas, para a determinação da densidade básica da madeira e da casca. De cada um dos seis discos foram retiradas duas cunhas opostas passando pela medula, as quais foram identificadas e destinadas à determinação da densidade básica da madeira. Para a casca, utilizou-se uma amostra composta, retirando-se três amostras de casca ao longo do fuste. Os procedimentos utilizados para determinação da densidade básica da madeira e da casca estão de acordo com o método de imersão em água, descrito por Vital (1984). Os valores de densidade foram calculados a partir da média ponderada pelo diâmetro dos discos das respectivas cunhas para a madeira, e das três amostras para a casca.

Para a determinação da biomassa de madeira e de casca dos fustes das árvores amostras, utilizou-se a equação 2 (SOARES et al., 2011):

$$PS(c) = V \times (DBM) \text{ ou } (DBC) \quad (\text{eq.2})$$

em que:

PS(c) = biomassa da madeira ou da casca, em kg;

V = volume de madeira ou da casca, em m³;

DBM = densidade básica da madeira, em kg.m⁻³;

DBC = densidade básica da casca, em kg.m⁻³.

Os valores médios de biomassa em cada parte das árvores, em cada classe de diâmetro, foram utilizados para a extrapolação (ha). A frequência de árvores por classe de diâmetro, identificada no inventário florestal, foi utilizada para a ponderação.

2.5. Quantificação da perda de casca no processo

Durante a colheita, extração, secagem em campo e transporte da madeira da área de produção até a unidade de processamento (Unidade de Produção de Carvão – UPC) ocorrem perdas de casca devido aos processos mecânicos e naturais que, também, foram quantificadas como resíduos.

Para a quantificação da perda de cascas durante a extração, secagem e transporte da madeira, foram realizadas amostragens em toras dispostas nas pilhas de madeira em três etapas: a primeira à beira do talhão, para quantificar a perda durante o corte, a extração e a secagem no campo (aproximadamente 90 dias); a segunda em toras dispostas nas pilhas de madeira no pátio da UPC, para determinar a perda durante o transporte até o empilhamento; e a terceira dentro forno, para determinar a perda de casca na última etapa de carregamento da madeira.

Para isso, foram selecionadas 100 toras, com 3 m de comprimento, em cada uma dessas etapas, seguindo a distribuição diamétrica observada nas toras das árvores cubadas, simulando a reconstituição de algumas árvores (respeitando o afilamento natural do fuste). Esse material foi proveniente do talhão rastreado com o material genético selecionado. Cada tora foi então descascada, e em seguida procedeu-se a cubagem e a pesagem das toras sem casca, bem como a pesagem das cascas de cada tora separadamente. Foram retiradas amostras de casca de cada tora para determinação do teor de umidade e da massa seca. Para a determinação da massa seca e teor de umidade de madeira, foram amostrados dois discos de cada tora, sendo um na extremidade de maior diâmetro e outro na metade da tora.

A perda de casca em cada uma das etapas foi determinada utilizando como referência a relação entre a massa seca de madeira e massa seca de casca das árvores cubadas antes da exploração da área. Pela diferença da relação entre a massa seca da madeira e da casca das toras amostradas, em cada etapa, foram determinados os percentuais de perdas de casca durante o processo.

Para a determinação do teor de umidade da madeira, da casca, dos galhos e das folhas, inicialmente obteve-se a massa úmida das amostras, que foram então levadas em estufa de circulação de ar, à $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, até atingir massa constante. Utilizou-se a expressão 3 para determinar o teor de umidade:

$$U(\%) = \frac{PU - PS}{PS} \times 100 \quad (\text{eq.3})$$

em que:

U(%) = Umidade em percentual;

PU = massa úmida;

PS = massa seca;

2.6. Quantificação de atíços e finos de carvão vegetal

A madeira e parte da casca de todo o povoamento monitorado foram carbonizadas conforme os procedimentos da empresa, em fornos retangulares de aproximadamente 150 m³ (240 st), sendo realizadas carbonizações completas com o material rastreado, em três repetições.

Após o término da carbonização foram determinados os rendimentos gravimétricos em carvão vegetal e a massa de atíços e finos (0-2 mm e 2-9 mm) gerados no processo de conversão de madeira e casca em carvão vegetal.

Para determinar a densidade a granel do carvão, do atíço e dos finos foram utilizadas caixas de volume conhecido. As caixas foram preenchidas com as amostras e em seguida procedeu-se a pesagem. A massa total obtida foi subtraída da massa da caixa e dessa forma obteve-se a massa das amostras, por m³ (eq. 4).

$$DG = \frac{M}{v} \quad (\text{eq.4})$$

em que:

DG = densidade à granel (kg.m⁻³)

M = massa de carvão vegetal, atíço ou finos (kg);

v = volume conhecido do recipiente (m³).

Para a determinação da biomassa de carvão vegetal, dos atíços e dos finos, foi empregada a equação 5, adaptada de Soares et al., 2011:

$$PS(c) = V \times (DGCV) \text{ ou } (DGA) \text{ ou } (DGF) \quad (\text{eq.5})$$

em que:

PS(c) = biomassa de carvão vegetal, atíço ou finos, em kg;

V = volume de carvão vegetal, atíço ou finos, em m³;

DGCV = densidade à granel do carvão vegetal, em kg.m⁻³;

DGA = densidade à granel dos atíços, em kg.m⁻³;

DGF = densidade à granel dos finos, em kg.m⁻³.

2.7. Estimativa de biomassa por hectare

Para estimar a biomassa por hectare de folhas, galhos, cascas e madeira foram utilizadas as equações 6 a 9:

$$\text{Biomassa de folhas e galhos (t.ha}^{-1}\text{)} = \frac{\text{MS}_{f/g} \times N}{1000} \quad (\text{eq.6})$$

$$\text{Biomassa de madeira e casca (t.ha}^{-1}\text{)} = \frac{V \times \text{DBM(ouDBC)} \times N}{1000} \quad (\text{eq.7})$$

$$\text{Biomassa de ponteira (t.ha}^{-1}\text{)} = \text{Biomassa de madeira total} \times 0,40\% \quad (\text{eq.8})$$

$$\text{Biomassa de madeira comercial (t.ha}^{-1}\text{)} = \text{Biomassa de madeira total} \times 99,60\% \quad (\text{eq.9})$$

em que:

$\text{MS}_{f/g}$ = média ponderada por classes de diâmetros da massa seca de folhas, e massa seca de galhos ($\text{kg.}^{\text{árvore}^{-1}}$);

N = o número de árvores por hectare na idade de corte ($1337 \text{ árvores.ha}^{-1}$);

V = volume de madeira ou casca (m^3);

DBC = média ponderada por classes de diâmetros da densidade básica da casca (kg.m^{-3});

DBM = média ponderada por classes de diâmetros da densidade básica da madeira (kg.m^{-3}).

Para estimar a biomassa por hectare de carvão vegetal, de atiços e de finos foram utilizadas as equações 10 a 12:

$$\text{Biomassa de carvão vegetal (t.ha}^{-1}\text{)} = \text{VC} \times \text{DGCV} \quad (\text{eq.10})$$

$$\text{Biomassa de atiço (t.ha}^{-1}\text{)} = \text{VA} \times \text{DGA} \quad (\text{eq.11})$$

$$\text{Biomassa de finos (0-2 mm; 2-9 mm) (t.ha}^{-1}\text{)} = \text{VF} \times \text{DGF} \quad (\text{eq.12})$$

em que:

VC é o volume (mdc) de carvão vegetal por hectare de floresta;

DGCV é a densidade à granel (kg.m^{-3}) do carvão vegetal;

VA é o volume (mda) de atiço por hectare de floresta;

DGA é a densidade à granel (kg.m^{-3}) do atiço;

VF é o volume (mdf) de finos por hectare de floresta;

DGF é a densidade à granel (kg.m^{-3}) do finos.

2.8. Análise estatística

Foi avaliado o efeito da classe de dap das árvores na umidade dos galhos e folhas. Inicialmente os dados foram submetidos aos testes de Lilliefors e Cochran para testar a normalidade e homogeneidade das variâncias, respectivamente. Em seguida, procedeu-se a análise de variância pelo teste F, sendo as médias comparadas pelo teste Tukey. Para as variáveis que não atenderam as pressuposições de normalidade e/ou homogeneidade de variância foi utilizado o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis. Considerou-se sempre o nível de significância de 5%.

3. RESULTADOS

Na Figura 2 está apresentada a distribuição diamétrica das árvores do povoamento avaliado.

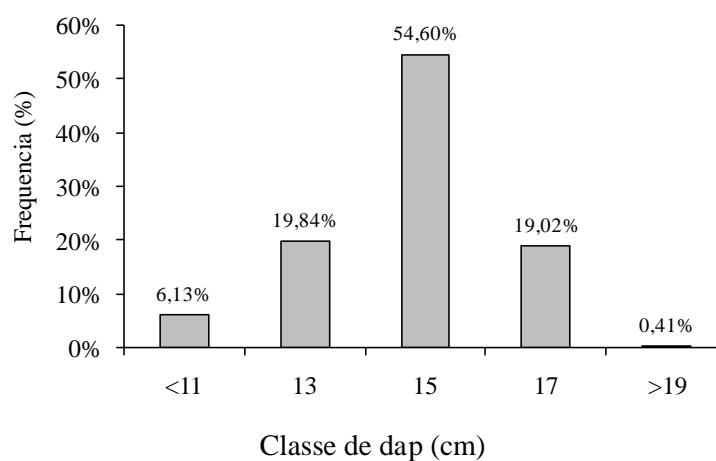


Figura 2 - Distribuição diamétrica (dap) das árvores do talhão (desvio padrão $\sigma = 3,87\text{cm}$).

Analisando a Figura 2 observa-se uma maior concentração de árvores na classe de 15 cm de dap, com distribuição normal, como é de se esperar para uma floresta equiânea. Observa-se que apenas 6,13% dos indivíduos apresentaram dap inferior a 12,0 cm, enquanto que somente 0,41% dos indivíduos apresentaram dap superior a 18,0 cm.

Na Figura 3 está apresentada a frequência de árvores amostradas, em cada classe diamétrica, para a quantificação de biomassa.

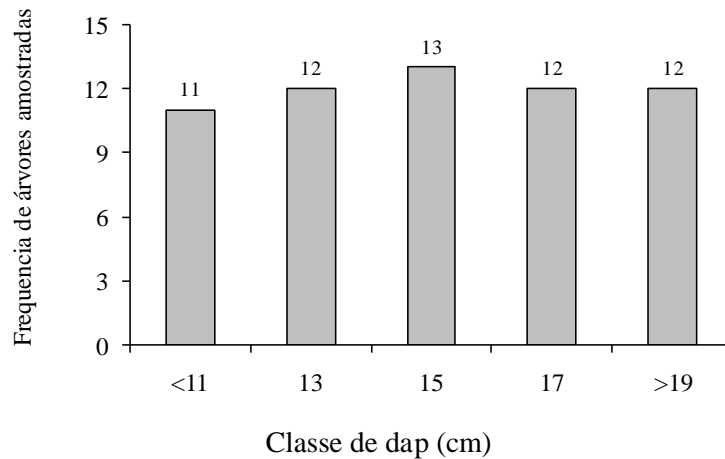


Figura 3 - Frequência de árvores amostradas para quantificação de biomassa.

Para obter uma quantificação mais precisa é importante que se faça uma amostragem de forma homogênea, contemplando todas as classes de diâmetro, independente da distribuição, ou seja, o mesmo número de árvores por classe diamétrica (CAMPOS e LEITE, 2013). Observa-se que foi amostrado um número muito semelhante de árvores em cada classe de diâmetro, sendo que na classe de 15 cm de dap foram amostradas 13 árvores, na classe com diâmetro menor que 12 cm, foram 11 árvores, e as demais classes ficaram com 12 árvores cada uma.

Na Figura 4 estão apresentados os dados de distribuição dos diâmetros das toras de 3 metros de comprimento que foram produzidas na floresta em estudo.

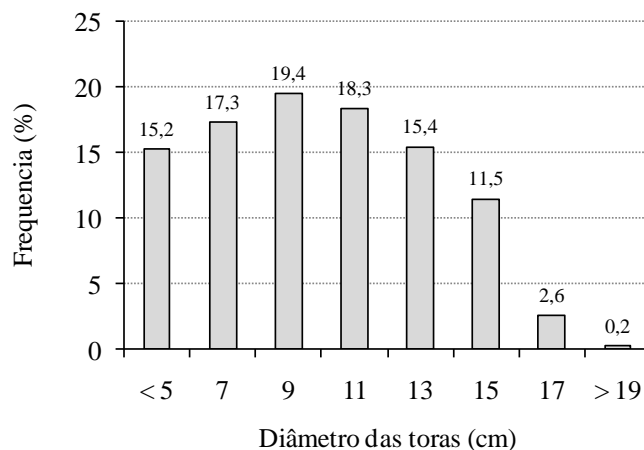
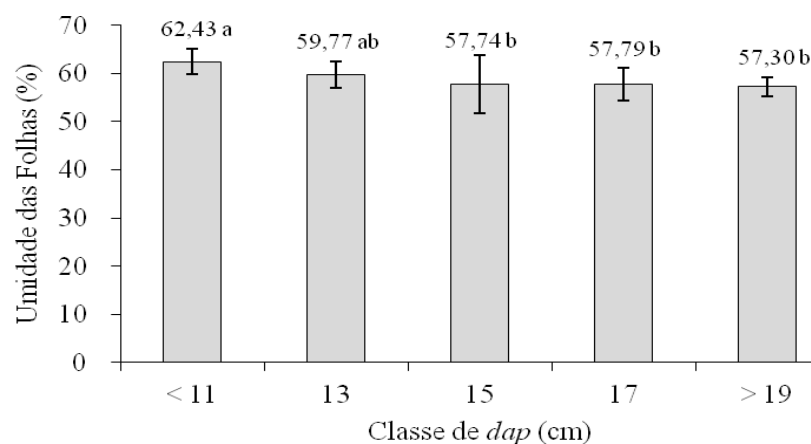


Figura 4 - Distribuição de diâmetros das toras de 3 m de comprimento produzidas pela floresta em estudo.

Observa-se que a classe de 9 cm de diâmetro, foi a que apresentou maior frequência, com 19,4% das toras amostradas e a classe de toras maiores que 18 cm, foi a que apresentou a menor frequência, somente 0,2% das toras amostradas.

Na Figura 5 estão apresentados os valores de teor de umidade das folhas em função da classe de diâmetros das árvores.

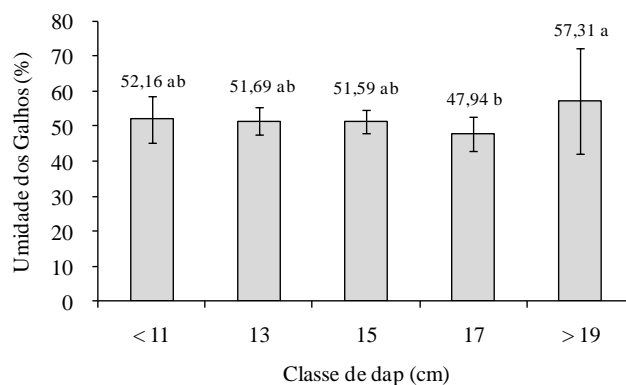


Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si a 5% de significância, pelo teste Kruskal-Wallis. As barras indicam o desvio padrão.

Figura 5 - Teor de umidade das folhas em função da classe de diâmetros das árvores.

Observa-se na Figura 5 que houve diferença significativa entre as classes de diâmetro para o teor de umidade das folhas, e verifica-se que o teor de umidade das folhas foi maior para as árvores com diâmetro menor que 12 cm.

Na Figura 6 estão apresentados os valores para o teor de umidade dos galhos em função da classe de diâmetros das árvores.



Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si a 5% de significância, pelo teste Kruskal-Wallis. As barras indicam o desvio padrão.

Figura 6 - Teor de umidade dos galhos em função da classe de diâmetros das árvores.

Na Figura 6 observa-se que houve diferença significativa entres as classes de diâmetro para o teor de umidade dos galhos, e verifica-se que o teor de umidade dos galhos foi maior para as árvores com diâmetro maior que 19 cm.

Na Tabela 2 está apresentada a estimativa de biomassa por árvore e por hectare, em cada parte da árvore.

Tabela 2 - Estimativa de estoque de biomassa média por árvores e por hectare total e nas partes das árvores (madeira, casca, galhos, folhas, ponteira)

Estimativa	Madeira*	Casca	Galhos	Folhas	Ponteira**	Total
Biomassa (kg.árvore ⁻¹)	96,45	8,00	2,43	1,92	0,39	109,19
Biomassa (t.ha ⁻¹)	128,95	10,69	3,25	2,57	0,52	145,99
Biomassa (%)	88,33%	7,32%	2,23%	1,76%	0,35%	100,00%

*Madeira total excluindo a ponteira

**Ponteira: madeira com diâmetro inferior à 3 cm

Analisando a Tabela 2, observa-se que o estoque de biomassa total acima do solo para esse povoamento foi de 145,99 t.ha⁻¹, com maior contribuição do componente madeira, seguido da casca, dos galhos, das folhas e das ponteiras, respectivamente.

Na Tabela 3 estão apresentados os valores para o teor de umidade e perda de casca em cada uma das etapas avaliadas nesse estudo.

Tabela 3 - Perda de casca durante a secagem, transporte e enformamento da madeira

Fase de avaliação	Umidade da Madeira (%)	Umidade da Casca (%)	Perda de casca (%)
1° avaliação	29	18	10,59
2° avaliação	30	18	5,41
3° avaliação	31	19	9,7
Perda total de casca até o enformamento da madeira			25,7%

1° avaliação: após a secagem da madeira em campo (≈ 90 dias após o corte); 2° avaliação: após o transporte e descarregamento da madeira na Unidade Produtora de Carvão (≈ sete dias após a 1° avaliação); 3° avaliação: após o carregamento do forno (≈ dois dias após a 2° avaliação).

Com base na Tabela 3 observa-se que a variação de umidade da madeira e da casca nas três etapas é pequena, sendo que a umidade média da madeira foi de 30%, sendo esse valor recomendado para a carbonização, enquanto que a umidade média

da casca foi de 18%. De maneira geral, a umidade da madeira representa perdas de rendimento durante a produção de carvão vegetal uma vez que é necessária a secagem da madeira antes de iniciar o processo de carbonização. Entretanto, teores de umidade acima de 30% não são indicados pois elevam o tempo de carbonização, devido ao aumento da fase endotérmica do processo de carbonização, além de ocasionar o consumo de parte da madeira enfiada para fornecimento da energia necessária para evaporação da água (OLIVEIRA, 2012).

Observa-se ainda na Tabela 3, que a perda de casca total foi de 25,7% (2,74 t.ha⁻¹) e a maior perda de casca foi observada até a etapa de secagem da madeira em campo, correspondente a maior movimentação da madeira, devido a várias operações de corte, derrubada da árvore, extração, traçamento, empilhamento e secagem natural às margens da estrada (lado do talhão).

Na Tabela 4 é apresentada a estimativa de biomassa convertida em carvão, atíços, finos (0-2 mm) e finos (2-9 mm) a partir de um hectare de floresta de Eucalyptus.

Tabela 4 - Estimativa de biomassa por hectare para carvão, atíços, finos (0-2 mm) e finos (2-9 mm) após a carbonização da madeira com casca

Material	Carvão Vegetal	Atíços	Finos (0-2 mm)	Finos (2-9 mm)
Densidade à granel (kg.m ⁻³)	205	356	412	211
Biomassa (t.ha ⁻¹)	42,19	7,21	7,31	5,3
Biomassa (%)	68,04%	11,63%	11,79%	8,54%

Volume de madeira por forno (150,04 m³ = 240,1 st); fator de conversão para hectare = 1,83 (um hectare de matéria prima é carbonizado em 1,83 fornos); massa seca enfiada (por forno) = 74,6 t por forno; massa seca enfiada (por hectare) = 136,1 t hectare⁻¹.

Rendimento gravimétrico em carvão vegetal: RGCV = 31%

Observa-se na Tabela 4, que o total de biomassa residual do processo de produção de carvão vegetal foi de aproximadamente 19,82 t.ha⁻¹.

4. DISCUSSÕES

Conforme observado na Figura 1, a distribuição de diâmetros apresentou uma distribuição diamétrica, com tendência a normalidade, sendo que a classe com maior frequência foi a de 15 cm.

Esses valores estão de acordo com o que é comumente encontrado para povoamentos de *Eucalyptus* no Brasil nessa idade avaliada (aproximadamente 80 meses de idade), conforme pode ser observado no trabalho desenvolvido por Leite et al. (2011), que avaliaram um povoamento de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*, em idades entre 30 e 118 meses, e aos 80 meses obtiveram uma maior frequência de árvores com o diâmetro entre 15 e 16 cm. Resultado semelhante também foi observado no trabalho realizado por Martins et al. (2011), que avaliaram um povoamento de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, dos 24 a 84 meses, e observaram que aos 72 meses, o dap médio foi de 16,34 cm e aos 84 meses foi 17,19 cm.

Com relação à frequência das toras de 3 metros por classe de diâmetro, conforme apresentado na Figura 3, pode-se dizer que está adequado para a produção de carvão vegetal, uma vez que o diâmetro ideal para a carbonização é em torno de 10 cm, e a classe que apresentou a maior frequência foi a de centro de classe de 9 cm.

Na Tabela 2, observa-se que a estimativa da biomassa total acima do solo foi de 145,99 t.ha⁻¹, sendo que 6,34 t.ha⁻¹ (4,34%) é composta de folhas, galhos e ponteira, que são considerados resíduo de colheita, e em geral deixados no campo. Já a estimativa da biomassa potencial para ser enfiada para a carbonização foi de 136,89 t.ha⁻¹, considerando-se que toda a madeira e toda a casca podem ser utilizadas.

Os valores de biomassa acima do solo encontrados no presente estudo estão de acordo com a literatura, no entanto, deve-se observar a idade e as condições em que o povoamento se desenvolve. Em um estudo realizado por Freitas et al. (2004) a biomassa total acima do solo em um povoamento de *Eucalyptus grandis*, aos 9 anos de idade, foi de 142,31 t.ha⁻¹, e identificaram que a maior contribuição para a biomassa total acima do solo foi da madeira, seguida da casca, dos galhos vivos, das folhas e dos galhos mortos.

No trabalho desenvolvido por Schumacher e Caldeira (2001), que avaliou um povoamento de *Eucalyptus globulus*, aos 4 anos de idade, verifica-se que o valor de biomassa total acima do solo foi de 83,2 t.ha⁻¹, e o componente madeira apresentou a maior quantidade de biomassa (57,5 t.ha⁻¹) ou seja, 69% do total da parte aérea, seguido das folhas, dos galhos e da casca.

Na Tabela 3, observamos que a umidade média da madeira, nas três etapas de avaliação, foi de 30% sendo esse valor semelhante ao observado por Brand et al. (2004), que obtiveram para toras de madeira de *Eucalyptus*, com comprimento de 2,4 metros e diâmetros variados, depois de 4 meses de secagem, 32,54% de umidade. No trabalho desenvolvido por Rezende et al. (2010) que estudaram toras de madeira de *Eucalyptus grandis* com 25 anos de idade após 90 dias de secagem ao ar, uma umidade média de aproximadamente 25%, sendo este resultado inferior ao observado no presente estudo.

É importante ressaltar que o teor de umidade da madeira após a secagem em campo pode apresentar alterações em função de fatores ambientais, como temperatura, umidade relativa do ar, circulação do ar, bem como a estação em que ocorreu a secagem, e também de alguns fatores intrínsecos à madeira como a espécie, a relação cerne/alburno e o diâmetro da tora (MARTINS, 1988).

Devido às condições climáticas favoráveis do Brasil, esse tipo de secagem é bastante utilizado como pré-secagem ou secagem definitiva, dependendo do uso final da madeira (REZENDE et al., 2010), e de modo geral as empresas produtoras de carvão vegetal utilizam somente esse método para a secagem de suas madeiras.

Com relação à umidade da casca, foi observado um valor médio de 18% de umidade, nas três etapas de avaliação. Esse resultado está de acordo com o observado no trabalho desenvolvido por Brand et al. (2004) que avaliaram a umidade de

diferentes resíduos, dentre eles a casca de *Eucalyptus*, que após 4 meses de secagem apresentou 15,20% de umidade.

Ainda analisando a Tabela 3, observa-se que a perda total de casca nas três etapas avaliadas foi de 25,7%, portanto, estima-se que aproximadamente 74% da casca é enfiada, e o restante é considerado resíduo ($2,75 \text{ t.ha}^{-1}$). A etapa em que ocorreu a maior perda de casca foi a primeira, que corresponde à etapa de maior movimentação das toras. É importante resaltar que a casca é um resíduo difícil ser aproveitado, uma vez que se desprende ao longo do trajeto, e dificulta a coleta desse material. Portanto esses 25,7% são realmente considerados resíduos.

De acordo com a Tabela 4, observa-se que o rendimento gravimétrico em carvão vegetal foi de 31%, sendo esse valor próximo aos valores médios observados na literatura, que variam entre 28% e 30% (CARDOSO et al., 2010; OLIVEIRA et al., 2010; OLIVEIRA, 2012; CASTRO, 2011; ROCHA, 2011). É importante ressaltar que esses valores podem ser influenciados pelas condições de carbonização, pelo tipo de forno utilizado e principalmente pelo teor de umidade.

A densidade a granel dos finos de menor granulometria (0-2 mm) foi mais elevada do que a dos finos de maior granulometria (2-9 mm), uma vez que as partículas são menores e ocupam mais espaço, e, portanto aumenta o valor da densidade.

A quantidade de carvão vegetal foi de $42,19 \text{ t.ha}^{-1}$ correspondente a 68,04%, enquanto que para atíços esse valor foi de 11,63% ($7,21 \text{ t.ha}^{-1}$), para os finos (0-2 mm) foi de 11,79% ($7,31 \text{ t.ha}^{-1}$) e para os finos (2-9 mm) foi de 8,54% ($5,3 \text{ t.ha}^{-1}$). Portanto, observa-se que há produção de grande quantidade de resíduos durante o processo de carbonização da madeira.

No trabalho desenvolvido por Oliveira (2012), que avaliou a madeira de *Eucalyptus* spp. com 7 anos de idade, obteve-se um rendimento em atíços de 8,85% e para os finos esse valor foi de 3,23%. Já Cardoso et al. (2010), que estudaram a madeira de *Eucalyptus* sp. com idade de 8 anos, verificaram um rendimento em atíços de 12,5% e para os finos de 3,25%.

Durante o manuseio do carvão, desde a produção até a sua entrada no alto-forno, podem ser gerados cerca 25% de finos abaixo de 10 mm de diâmetro (OLIVEIRA, 1988), o que é uma quantidade considerável diante da grande massa de

carvão vegetal manuseada por uma indústria siderúrgica (ANDRADE e MACHADO, 2004).

A geração dessa grande quantidade de finos pode ser um problema, uma vez que são tratados como resíduos, além de ser uma considerável perda de material energético, pois, apesar de estarem abaixo da granulometria especificada para utilização no alto-forno, são ricos em carbono. Uma alternativa para o aproveitamento desse resíduo é a técnica de injeção de finos, que permite uma economia na fabricação do ferro-gusa devido, principalmente, à redução do consumo de carvão bruto, ou seja, da quantidade de carvão que entra na usina (ANDRADE e MACHADO, 2004). Entretanto, é importante que se estudem alternativas para aproveitamento desses resíduos para que se obtenha uma tecnologia ao alcance dos pequenos e médios produtores.

De acordo com os resultados obtidos, verificou-se que há geração de grande quantidade de resíduos no processo de produção de madeira e na sua conversão em carvão vegetal. Estima-se que a área ocupada por plantios florestais de Eucalyptus destinados à produção de carvão vegetal seja de aproximadamente 900 mil ha (ABRAF, 2012), podendo-se estimar a geração de resíduos da colheita florestal da ordem de 8,1 milhões de toneladas, que são deixados no campo, na maior parte dos povoamentos.

5. CONCLUSÕES

O estoque de biomassa de uma floresta de Eucalyptus, aos 79 meses de idade foi de 145,99 t.ha⁻¹, sendo que, deste montante 17,03 t.ha⁻¹ (11,67%) está em forma de resíduos gerados por ocasião da colheita, e podem ser aproveitados para a geração de energia térmica e elétrica.

Dentre os resíduos da colheita, a casca apresenta maior contribuição (7,32%), e após o período de secagem da madeira em campo essa porcentagem aumenta, chegando a 10,59%. A perda de casca total foi de 2,74 t.ha⁻¹, ou seja, 25,7%.

Com relação aos resíduos gerados na unidade de produção de carvão os finos lideram com aproximadamente 20%.

6. AGRADECIMENTOS

Ao Programa de P&D regulado pela ANEEL, a ArcelorMittal Bioflorestas e Cemig pelo financiamento e parceria no projeto. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), ao CNPq pela bolsa produtividade e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pelo apoio financeiro e pela concessão de bolsa.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, A. M.; MACHADO, F. S. Comparação entre as propriedades físicas e mecânicas dos finos de carvão vegetal e de carvão mineral, para injeção nas ventaneiras de altos-fornos siderúrgicos. **Biomassa & Energia**, v. 1, n. 3, p. 273-279, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS – **ABRAF**. Anuário Estatístico 2012: ano base 2011. Brasília, 2012.

BAGGIO, A. J.; CARPANEZZI, A. A. Quantificação dos resíduos florestais em bracingais na região metropolitana de Curitiba, PR. **Boletim de Pesquisa Florestal**, n. 30/31, p.51-66, 1995.

BELLOTE, A. F. J.; SILVA, H. D.; FERREIRA, C. A.; ANDRADE, G. C. Resíduos da indústria de celulose em plantios florestais. **Boletim de Pesquisa Florestal**, n. 37, p. 99-106, 1998.

BRAND, M. A.; MUÑIZ, G. I. B.; COSTA, V. J.; AMORIN, M. BITTENCOURT, E. Influência do tempo de armazenamento sobre a perda de umidade de resíduos madeiráveis. In: III Encontro de Ciência e Tecnologia, 2004, Lages. **Anais do III ECTec – Encontro de Ciências e Tecnologia**. Lages: Universidade do Planalto Catarinense, 2004.

BRAND, M. A.; MUÑIZ, G. I. B.; SILVA, D. A.; KLOCK, U. Caracterização do rendimento e quantificação dos resíduos gerados em serraria através do balanço de materiais. **Revista Floresta**, v. 32, n. 2, p. 247-259, 2002.

CAMPOS, J.C.C.; LEITE, H.G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas**. 4.ed. Viçosa-MG: UFV, 605 p, 2013.

CARDOSO, M. T.; DAMÁSIO, R. A. P.; CARNEIRO, A. C. O.; JACOVINE, L. A. G.; VITAL, B. R.; BARCELOS, D.C. Construção de um sistema de queima de gases da carbonização para redução da emissão de poluentes. **Cerne**, v. 16, Suplemento, p. 115-124, 2010.

CASTRO, A. F. N. M. **Efeito da idade e de materiais genéticos de Eucalyptus sp. na madeira e carvão vegetal**. 2011, 98 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2011.

CENTER FOR STANDARDIZATION AND ENVIROMENT. **Development of allometric equations for estimating forest carbon stocks based on field**

measurement (ground based forest carbon accounting). PT 65-01 Forest Management Technical Committee, 2011.

FREITAS, R., SCHUMACHER, M.V., CALDEIRA, M.V.W, SPATHELF, P. Biomassa e conteúdo de nutrientes em povoamento de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden plantado em solo sujeito à arenização, no município de Alegrete-RS. **Biomassa & Energia**, v.1, n, p.93-104, 2004.

LEITE, H. G.; CASTRO, R. V. O.; SILVA, A.; ARAÚJO JUNIOR, C. A.; BINOTI, D. CASTRO, A. F. N. M.; BINOTI, M. Classificação da capacidade produtiva de povoamentos de eucalipto utilizando diâmetro dominante. **Silva Lusitana**, v.19, n. 2, p. 181-195, 2011.

MARTINS, F. B.; SOARES, C. P. B.; LEITE, H. G.; SOUZA, A. L.; CASTRO, R. V. O. Índices de competição em árvores individuais de eucalipto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.46, n.9, p.1089-1098, 2011.

MARTINS, V. A. **Secagem de madeira serrada**. Brasília: IBDF, 1988. 52 p.

OLIVEIRA, A. C. **Sistema forno-fornalha para produção de carvão vegetal**. 2012, 74 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2012.

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

OLIVEIRA, E. **Correlação entre parâmetros de qualidade da madeira e do carvão de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden**. 1988. 47 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1988.

PINCELLI, A. L. P. S. M. **Características dos resíduos da colheita de madeira de eucalipto e pinus, submetidos ao tratamento térmico, com foco na aplicação energética**. 2011, 125 f. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 2011.

REZENDE, R. N.; LIMA, J. T.; RAMOS E PAULA, L. E.; FARIA, A. L. R. Secagem ao ar livre de toras de *Eucalyptus grandis* em Lavras, MG. **Cerne**, v. 16, p. 41-47, 2010.

ROCHA, M. F. V. **Influência do espaçamento e da idade na produtividade da madeira de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus camaldulensis* para energia**. 2011, 84 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2011.

SCHUMACHER, M. V.; CALDEIRA, M. V. W. Estimativa da biomassa e do conteúdo de nutrientes de um povoamento de *Eucalyptus globulus* (Labillardière) sub-espécie maidenii. **Ciência Florestal**, v. 11, n. 1, p. 45-53, 2001.

SILVA, J. V.; NOGUEIRA, G. S.; SANTANA, R. C.; LEITE, H. G.; OLIVEIRA, M. L. R.; ALMADO, R. P. Produção e acúmulo de nutrientes em povoamento de eucalipto em consequência da intensidade do desbaste e da fertilização. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.47, n.11, p.1555-1562, 2012.

SOARES, C.P.B.; NETO, F.P.; SOUZA, A.L. **Dendrometria e Inventário Florestal**. 2 ed. Viçosa: Editora UFV. 2011. 272 p.

VITAL, B. R. **Métodos de determinação de densidade da madeira.** Viçosa, MG: SIF, 21p. (Boletim Técnico, 1), 1984.

WIECHETECK, M. **Aproveitamento de resíduos e subprodutos florestais, alternativas tecnológicas e propostas de políticas ao uso de resíduos florestais para fins energéticos.** Boletim técnico, Curitiba, 40 p. 2009.

CAPÍTULO II

POTENCIAL DOS RESÍDUOS DA COLHEITA FLORESTAL E RESÍDUOS DA CARBONIZAÇÃO PARA GERAÇÃO DE ENERGIA

RESUMO – A utilização de biomassa para geração de energia tem ganhado grande destaque, e no Brasil a biomassa floresta tem particular importância devido às grandes áreas florestadas que existem no país. Para aproveitar adequadamente resíduos como combustível é muito importante conhecer a sua composição, por isso é essencial qualificar esse material. Portanto, este trabalho teve como objetivo determinar as propriedades químicas e físicas dos resíduos da colheita florestal e do processo de carbonização da madeira, bem como avaliar o efeito da classe de diâmetro das árvores nas propriedades da madeira, casca, galhos e folhas, de modo a verificar a viabilidade do uso desse material para a geração de energia térmica e elétrica. Foi avaliado um povoamento de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* aos 79 meses de idade. Foram selecionadas 15 árvores amostras para obtenção de material para determinação das propriedades físicas e químicas dos resíduos da colheita e da carbonização. Observou-se que a madeira avaliada apresenta qualidade para a produção de carvão vegetal. Os resíduos da colheita florestal e da carbonização apresentaram potencial para serem utilizados para a geração de energia, uma vez que estocam uma grande quantidade de energia que não é utilizada. A quantidade de nutrientes exportada caso o resíduo da colheita seja retirado do campo para utilização na geração de energia é significativa, o que pode acarretar em custos com fertilização, e precisa ser devidamente avaliado, a fim de determinar o limite de utilização desses resíduos.

Palavras-Chave: Aproveitamento de resíduos; geração de energia; qualidade dos resíduos florestais.

CHAPTER II

POTENTIAL OF FOREST HARVEST AND CARBONIZATION WASTES FOR POWER GENERATION

ABSTRACT - The use of biomass for power generation has gained great prominence, and in Brazil the forest biomass is particularly important due to the large forested areas that exist in the country. To properly take advantage of waste as a fuel is very important to know its composition, so it is essential to qualify this material. Therefore, this study aimed to determine the chemical and physical properties of the waste from forest harvesting and wood carbonization process and evaluate the effect of the trees diameter class in the wood, bark, branches and leaves properties, in order to verify the feasibility of using this material for heat and electricity generation. Stand of *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* at 79 months age was evaluated. Were selected 15 trees sampled for obtaining material to determine the physical and chemical properties of forest harvesting and carbonization residues. It was observed that the evaluated wood has quality for charcoal production. Waste from forest harvesting and carbonization presented potential to be used for energy generation, since stock a large amount of energy that is not used. The nutrients exported amount if the forest harvesting residue is removed from the field for use in power generation is significant, which can incur costs with fertilization, and needs to be properly evaluated in order to determine the limit of use of this waste.

Keywords: Residues use; power generation; quality of forest residues.

1. INTRODUÇÃO

A utilização da biomassa para a geração de energia é um tema que tem apresentado muita relevância (MULLER et al., 2005; VALE e GENTIL, 2008; RAMOS e PAULA et al., 2011; PROTÁSIO et al., 2011) principalmente por se tratar de um combustível renovável, perante às perspectivas de esgotamento das reservas mundiais de combustíveis fósseis e das pressões da sociedade por soluções ambientais para o problema das emissões de gases poluentes e das mudanças climáticas, como por suas características de produção descentralizada e próxima aos locais de demanda de carga, geradora de oportunidade de trabalho e renda no campo, dentre outros (MULLER et al., 2005).

Dentre as fontes de biomassa utilizadas, a biomassa florestal apresenta grande destaque e pode ser diferenciada em três principais grupos: o material advindo da colheita florestal (ou resíduo da colheita), os resíduos gerados devido ao processamento da madeira e a madeira oriunda de florestas energéticas (SOUZA et al, 2012). O resíduo da colheita florestal é formado por galhos, folhas, uma porção das cascas e parte da madeira que não é aproveitada, como as ponteiros (madeira com diâmetro inferior ao comercial). No caso da produção de carvão vegetal, os resíduos sólidos gerados durante a transformação da madeira são os atijos, os finos e as cascas soltas.

Atualmente, no Brasil, os resíduos da colheita florestal, nas empresas produtoras de carvão vegetal, são deixados no campo onde ocorre a ciclagem dos nutrientes. Essa prática vem sendo realizada principalmente porque ainda são incipientes os estudos a respeito do aproveitamento desse resíduo, que abordem a sua quantificação, qualificação e a metodologia mais adequada para sua coleta. Além disso, a utilização de toda a biomassa produzida para a geração de energia pode

acarretar em problemas de sustentabilidade de produção dos sítios, pois no caso da retirada dos resíduos da colheita, se a remoção de nutrientes for superior às entradas de nutrientes no talhão, o balanço nutricional do sistema solo-planta será negativo, reduzindo o potencial produtivo da área (PAES et al., 2013). Dessa forma, os nutrientes exportados deverão ser repostos pela adição de adubos químicos ou orgânicos (DEDECEK e BELLOTE, 2008).

Entretanto, o aproveitamento dos resíduos florestais pode gerar benefícios à floresta e ao meio ambiente uma vez que favorece o crescimento da floresta devido à ciclagem de nutrientes; reduz os riscos de incêndios florestais e reduz os impactos ao meio ambiente na produção de energia (LEINONEN, 2004); além de redução nos custos de preparo de área para a próxima rotação (LIMA, 2011).

De modo geral, os resíduos lignocelulósicos são combustíveis e podem ser utilizados diretamente na condição em que se encontram ou podem ser transformados por processos mecânicos em partículas menores como cavacos ou serragem, ou ainda adensados na forma de briquetes e pellets (VALE e GENTIL, 2008).

Para o aproveitamento adequado dos resíduos florestais, quando utilizado sem processo de conversão previa para obtenção de combustível (sólido ou gasoso) com características mais homogêneas, é necessário o estudo de suas propriedades energéticas, analisando as variáveis como umidade, densidade, granulometria, poder calorífico e a densidade energética, devido à influência direta no custo do kWh produzido (PINHEIRO et al., 2005; PROTÁSIO et al., 2011).

Diante do que foi exposto verifica-se a necessidade de qualificação dos resíduos florestais para determinar a viabilidade de sua utilização como combustível para geração de energia, principalmente nos projetos de cogeração nas unidades produtoras de carvão vegetal. Portanto, esse estudo teve como objetivo determinar as propriedades químicas e físicas dos resíduos da colheita florestal e do processo de carbonização da madeira, bem como verificar a viabilidade do uso desse material para a geração de energia térmica e elétrica.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Local do experimento

O presente estudo foi desenvolvido na empresa ArcelorMittal BioFlorestas na cidade de Martinho Campos – MG. O clima da região é do tipo Cwa, segundo a classificação de Köppen, caracterizado por verões úmidos e invernos secos, com temperatura média anual entre 19,8 e 25,3°C, e precipitação média anual de 1.400 mm (SILVA et al., 2012).

Inicialmente definiu-se uma área de produção de 50 hectares, correspondente ao material genético mais representativo da empresa (*Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*), com espaçamento inicial de 3,0 m x 2,5 m, que se encontrava em idade de corte (79 meses) no período de execução do projeto. Demais informações referentes à área de estudo estão descritas na Tabela 1.

Tabela 1 - Informações cadastrais e de produtividade referentes à área de estudo

Data de Plantio (dd/mm/aaaa)	20/09/2005
Data de Corte (dd/mm/aaaa)	15/06/2012
Idade (meses)	79 (inventário)
Declividade máxima da área	3% (plano)
Volume total com casca (m ³ ha ⁻¹)	283,18
Número de árvores (ha)	1235
Mortalidade	7%
IMA _{6,6} (m ³ ha ⁻¹ ano ⁻¹)	42,9

em que IMA é o incremento médio anual em volume com casca na idade de corte (Campos e Leite, 2013).

2.2. Obtenção do material de estudo

Para determinação das propriedades físicas e químicas da madeira, casca, galhos e folhas, foram utilizadas 15 árvores amostra, sendo três árvores em cada uma das cinco classes de diâmetro identificadas no povoamento. De cada árvore retirou-se as folhas, os galhos e a casca, que em seguida foram colocadas em lonas para pesagem logo após a colheita, de modo a evitar a perda de umidade.

Após pesar todo o material, foram coletadas amostras de folhas e de galhos, com aproximadamente 300 gramas. A amostra de folhas continha folhas verdes de diferentes tamanhos, a amostra de galhos, apenas os galhos com folhas com diferentes diâmetros, e a amostra de cascas coletada ao longo de cada árvore.

Da madeira foram obtidos cinco discos equidistantes, em diferentes posições no tronco, ou seja, 0, 25, 50, 75 e 100% da altura comercial das árvores, além do disco na altura do dap (diâmetro à altura do peito), totalizando seis discos. Todos os discos também foram pesados logo após o processamento das árvores, para evitar a perda de umidade.

As amostras de cascas, galhos, folhas e os discos de madeira de cada uma das 15 árvores foram separadas em sacos plásticos, para serem enviadas para análises em laboratório.

Os valores para o estoque de biomassa média por árvores e por hectare total, e nas partes das árvores (folhas, galhos, casca, ponteira, madeira), bem como a densidade básica da madeira e da casca estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Estimativa de estoque de biomassa média por árvores e por hectare total e nas partes das árvores (madeira, casca, galhos, folhas, ponteira)

Estimativa	Madeira *	Casca	Galhos	Folhas	Ponteira	Total
Biomassa (kg.árvore ⁻¹)	96,45	8,00	2,43	1,92	0,39	109,19
Biomassa (t.ha ⁻¹)	128,95	10,69	3,25	2,57	0,52	145,99
Biomassa (%)	88,33	7,32	2,23	1,76	0,35	100,00
Densidade Básica (kg.m ⁻³)	517,80	330,60				

*Tronco até o diâmetro mínimo comercial (3 cm)

2.3. Quantificação de carvão vegetal, atíços e finos

A madeira foi carbonizada em fornos retangulares de aproximadamente 150 m³ ou 240 st, sendo realizadas três repetições (três carbonizações completas com o material rastreado).

Após o término da carbonização foram determinados os rendimentos gravimétricos em carvão vegetal, atíços e finos. Foi realizada uma amostragem de cada um destes materiais, em cada um dos três fornos para posterior realização das análises físicas e químicas.

Os valores para a estimativa de biomassa por hectare para o carvão vegetal, atíços, finos (0-2 mm) e finos (2-9 mm), estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Estimativa de biomassa por hectare para os componentes: Carvão, atíços, finos (0-2 mm) e finos (2-9 mm) após a carbonização da madeira com casca

Material	Carvão Vegetal	Atíços	Finos (0-2 mm)	Finos (2-9 mm)
Densidade à granel (kg.m ⁻³)	205	356	412	211
Biomassa (t.ha ⁻¹)	42,19	7,21	7,31	5,3
Biomassa (%)	68,04%	11,63%	11,79%	8,54%

2.4. Qualificação da biomassa

Foram determinadas as propriedades físicas e químicas da madeira, casca, galhos, folhas, carvão vegetal, atíços e finos: poder calorífico superior (PCS); análise química imediata (cinzas, voláteis, carbono fixo); análise elementar e análise de minerais. Foram determinadas as densidades básicas da madeira e da casca, e a densidade relativa aparente do carvão e dos atíços. Além disso, foram determinadas as densidades à granel do carvão vegetal, atíços, finos, folhas e galhos.

2.4.1. Densidade básica da madeira e da casca

De cada disco foram retiradas duas cunhas opostas passando pela medula, as quais foram identificadas e destinadas a determinação da densidade básica da madeira. Para a casca, utilizou-se uma amostra composta, retirando-se três amostras de casca ao longo de cada árvore amostra. Os procedimentos utilizados para determinação da densidade básica da madeira e da casca estão de acordo com o método de imersão em água, descrito por Vital (1984). Os valores de densidade

foram calculados a partir da média ponderada pelo diâmetro dos discos das respectivas cunhas para a madeira, e das três amostras para a casca.

2.4.2. Densidade relativa aparente do carvão e atijo

A densidade relativa aparente do carvão e do atijo foi determinada de acordo com o método proposto por Vital (1984), utilizando-se uma balança hidrostática para a determinação do volume deslocado em mercúrio.

2.4.3. Densidade a granel das folhas e dos galhos

Para determinar a densidade a granel das folhas e dos galhos foi utilizada uma caixa de volume conhecido. Os recipientes foram preenchidos com as amostras analisadas e tampados, e em seguida procedeu-se a pesagem. A massa total obtida foi subtraída da massa da caixa e dessa forma obteve-se a massa das amostras, por m³ (eq. 1).

$$DG = \frac{M}{v} \quad (\text{eq.1})$$

em que:

DG = densidade à granel (kg.m⁻³)

M = massa de folhas, galhos, ponteira, carvão vegetal, atijo ou finos (kg);

v = volume conhecido do recipiente (m³).

2.4.4. Poder calorífico superior

O poder calorífico superior da madeira, da casca, dos galhos, das folhas, do carvão vegetal, do atijo e dos finos foi determinados de acordo com a metodologia descrita pela norma da ABNT NBR 8633 (ABNT, 1984), utilizando-se uma bomba calorimétrica adiabática.

2.4.5. Potencial energético

O potencial energético da madeira, da casca, dos galhos, das folhas, do carvão vegetal, do atijo e dos finos foi determinado multiplicando a biomassa pelo poder calorífico superior, conforme equação 2.

$$PE = \text{Biomassa} \times \text{PCS} \times 4,19002 \text{ (kJ)} \quad (\text{eq. 2})$$

$$PE = \text{Biomassa} \times \text{PCS} \div 860 \text{ (kWh)} \quad (\text{eq. 3})$$

em que:

PE = potencial energético;

Biomassa = biomassa de madeira, casca, galhos ou folhas (kg);

PCS = poder calorífico superior da madeira, casca, galhos ou folhas (kcal/kg).

2.4.6. Análise química imediata

Para a análise química imediata (determinação do teor de cinzas, voláteis e carbono fixo) da madeira, galho, casca, folha, carvão vegetal, atíço e finos foi utilizado um equipamento TGA 1000, da Navas Instrument. Para o teor de cinzas a taxa de aquecimento utilizada foi de $35^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$, em atmosfera de ar, e o procedimento foi encerrado quando as amostras atingiram massa constante, com variação abaixo de 0,04 g. Para o teor de voláteis a taxa de aquecimento utilizada também foi de $35^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$, em atmosfera de ar, e o procedimento foi finalizado quando a temperatura atingiu 950°C . O teor de carbono fixo foi obtido por diferença, ou seja, somando-se os valores de teor de voláteis e cinzas, e subtrair de 100.

2.4.7. Determinação da composição elementar

Amostras compostas de cada material por árvore foram trituradas e peneiradas, sendo utilizada a fração que passou pela peneira de 60 mesh e ficou retida na peneira de 270 mesh. A quantificação dos teores de carbono, hidrogênio, nitrogênio e enxofre em relação à massa seca da madeira foi realizada em um analisador universal da marca Elementar (modelo Vario Micro Cube), conforme realizado nos trabalhos de Neves et al. (2011), Ramos e Paula et al. (2011), Reis et al., (2012). O analisador utiliza como gases de arraste e ignição o hélio e o oxigênio, respectivamente. As amostras de 2 mg foram acondicionadas em cápsulas de estanho e completamente incineradas a 1.200°C . O teor de oxigênio foi obtido por diferença em relação aos demais componentes elementares.

2.4.8. Determinação do teor de minerais

A determinação do teor de minerais da madeira, cascas, galhos e folhas, foi realizada no Laboratório de Solos Florestais, da UFV. Para determinar as concentrações de macronutrientes (P, K, Ca, Mg, S) e micronutrientes (Zn, Cu, Mn e Fe), utilizou-se a digestão nítrico-perclórica, com a adição de ácido nítrico e ácido perclórico na proporção 4:1. Posteriormente, para a determinação do fósforo e do enxofre foi utilizado um espectrofotômetro a 725 nm. O potássio foi determinado

pela emissão de luz no fotômetro de chama. Para o cálcio, magnésio e micronutrientes realizou-se a leitura da emissão de luz no espectrômetro de absorção atômica. Para a análise de nitrogênio (N) utilizou-se a digestão sulfúrica, e determinou a sua concentração pelo método Kejdhal. A concentração de boro (B) foi determinada pela calcinação e posteriormente leitura em espectrofotômetro a 420 nm.

2.5. Análise estatística

Foi avaliado o efeito da classe de dap das árvores nas propriedades da madeira, casca, galhos e folhas. Inicialmente os dados foram submetidos aos testes de Lilliefors e Cochran para testar a normalidade e homogeneidade das variâncias, respectivamente. Em seguida, procedeu-se a análise de variância pelo teste F, sendo as médias comparadas pelo teste Tukey. Para as variáveis que não atenderam as pressuposições de normalidade e/ou homogeneidade de variância foi utilizado o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis. Considerou-se sempre o nível de significância de 5%.

3. RESULTADOS

Na Figura 1 está apresentada a distribuição diamétrica das árvores do povoamento avaliado.

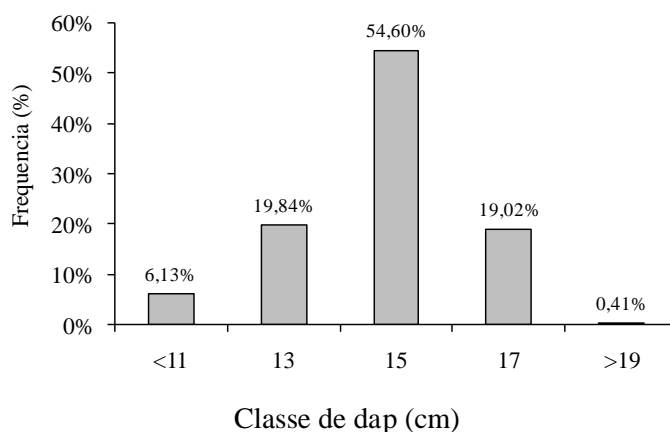


Figura 1 - Distribuição diamétrica (dap) das árvores do talhão ($\sigma = 3,87\text{cm}$).

Analisando a Figura 1 observa-se uma maior concentração de árvores na classe de 15 cm de dap, sendo que os dados foram caracterizados por uma distribuição normal, como é de se esperar para uma floresta equiânea. Observa-se que apenas 6,13% dos indivíduos apresentaram dap inferior a 12,0 cm, enquanto que somente 0,41% dos indivíduos apresentaram dap superior a 18,0 cm.

Observou-se que não houve diferença significativa entre as classes de diâmetro para a maior parte das análises realizadas, portanto, foram discutidos apenas os valores médios de cada propriedade avaliada. Isso sugere que é indicada uma amostragem de árvores no povoamento com diâmetro médio para a determinação das propriedades da madeira, como é normalmente realizado em pesquisas relacionadas à tecnologia da madeira.

Na Tabela 4 estão apresentados os valores médios, ponderados por classe de diâmetro, obtidos para densidade, poder calorífico superior e análise química imediata da madeira, da casca, das folhas e dos galhos.

Tabela 4 - Valores médios, ponderados por classe de dap, observados para densidade, poder calorífico superior e análise química imediata da madeira, da casca, dos galhos e das folhas

Componentes das árvores	Densidade (kg.m ⁻³)	PCS (kcal.kg ⁻¹)	Análise Química Imediata		
			Voláteis	Cinzas	Carbono fixo (%)
Madeira	517,8 (Básica)	4588	84,95	0,18	14,90
Casca	330,6 (Básica)	4400	81,23	2,65	16,12
Galho	-	4688	81,11	2,25	16,64
Folha	10,8 (Granel)	5082	76,86	4,31	18,83

De maneira geral, as madeira de *Eucalyptus* sp., usadas para produção de carvão vegetal, apresentam densidade básica, classificada como densidade média, em torno de 540 kg.m⁻³ (BRITO et al., 1983). Observa-se na Tabela 4 que a densidade básica da madeira foi igual a 517,8 kg.m⁻³, sendo esse valor inferior ao que normalmente se observa para produção de carvão vegetal. Verifica-se ainda que o maior valor para o poder calorífico superior foi obtido para as folhas (5082 kcal.kg⁻¹), uma vez que apresentou o maior teor de carbono fixo (18,83%) e menor teor de voláteis (76,86%), apesar de ter apresentado o maior teor de cinzas (4,31%).

Na Tabela 5 estão apresentados os valores médios, ponderados pela classe de dap, da composição química elementar da madeira, casca, galhos e folhas.

Tabela 5 - Valores médios, ponderados pela classe de dap, da composição química elementar para madeira, casca, galhos e folhas

Partes da árvores	Composição química elementar (%)					
	Nitrogênio	Carbono	Hidrogênio	Enxofre	Oxigênio	Cinzas
	N	C	H	S	O	
Madeira	0,18	48,66	6,06	0,000	44,92	0,18
Casca	0,33	45,71	5,67	0,001	45,639	2,65
Galho	0,38	47,84	5,82	0,004	43,706	2,25
Folhas	1,73	51,56	6,05	0,077	36,273	4,31

Analisando a Tabela 5 observa-se que a composição química elementar é bastante semelhante para as diferentes partes da árvore, com exceção das folhas que apresentaram maior valor de nitrogênio (N%), de enxofre (S%) e menor valor de oxigênio (O%).

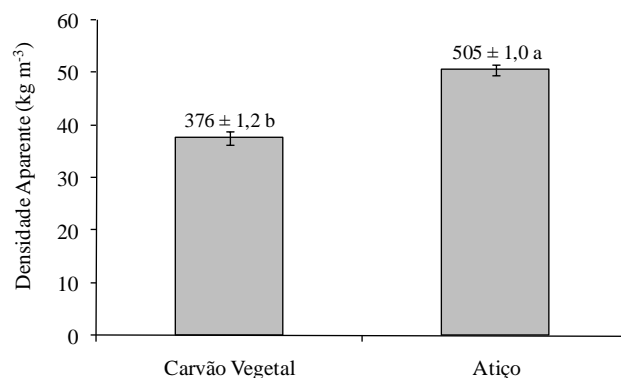
Na Tabela 6 estão apresentados os valores médios, ponderados pela classe de diâmetro, bem como os valores estimados por quilo (kg) de material, por árvore e por hectare, do teor de minerais para a madeira, a casca, os galhos e as folhas.

Tabela 6 - Valores médios dos teores de minerais da madeira, casca, galhos e folhas, estimados por kg de material, por árvore e por hectare

Material	N	P	K	Ca	Mg	S	Zn	Fe	Mn	Cu	B
	Massa de nutriente por kg de material										
	----- (dag.kg ⁻¹) -----						----- (mg.kg ⁻¹) -----				
Madeira	0,082	0,007	0,156	0,020	0,005	0,037	1,243	9,312	7,606	1,594	7,091
Casca	0,148	0,026	0,574	0,346	0,114	0,034	1,470	106,44	293,53	3,115	11,446
Galho	0,257	0,035	0,461	0,354	0,135	0,037	3,160	65,41	187,39	5,055	13,452
Folha	1,579	0,116	0,940	0,553	0,303	0,137	9,552	116,84	240,82	6,004	41,591
	Massa de nutriente por árvore										
	----- (dag.árvore ⁻¹) -----						----- (mg.árvore ⁻¹) -----				
Madeira	7,918	0,638	15,080	1,933	0,519	3,585	120,4	901,7	736,6	154,4	686,7
Casca	1,182	0,204	4,590	2,768	0,910	0,273	11,8	851,5	2348,2	24,9	91,6
Galho	0,626	0,087	1,121	0,860	0,329	0,090	7,7	158,9	455,4	12,3	32,7
Folha	3,032	0,222	1,804	1,061	0,581	0,263	18,3	224,3	462,4	11,5	79,9
	Massa de nutriente por hectare										
	----- (kg.hectare ⁻¹) -----										
Madeira	105,86	8,53	201,61	25,84	6,94	47,93	0,16	1,21	0,98	0,21	0,92
Casca	15,79	2,72	61,33	36,99	12,15	3,64	0,19	13,78	38,00	0,40	1,48
Galho	8,37	1,16	14,99	11,50	4,40	1,21	0,41	8,47	24,26	0,65	1,74
Folha	40,59	2,97	24,15	14,20	7,78	3,52	1,24	15,13	31,18	0,78	5,38

Observa-se na Tabela 6 que, de modo geral, as folhas apresentaram uma maior concentração de minerais por quilo (kg) de material, entretanto, quando se avalia a massa de nutrientes por hectare verifica-se que a madeira é a parte da árvore que estoca maior quantidade de nutrientes devido a sua maior fração de biomassa.

Na Figura 2 estão apresentados os valores médios obtidos para a densidade relativa aparente do carvão vegetal e dos atíços.

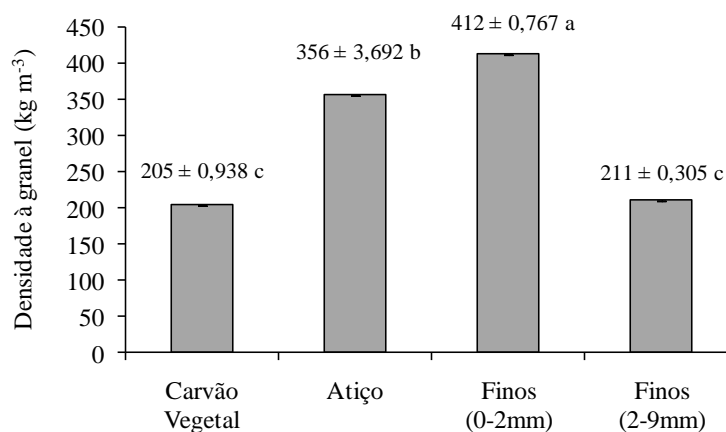


Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si a 5% de significância, pelo teste Tukey. As barras indicam o desvio padrão.

Figura 2 - Densidade relativa aparente do carvão vegetal e do atiço, em kg.m⁻³.

Verifica-se na Figura 2 que a densidade aparente do atiço (505 kg.m⁻³) foi maior do que a do carvão vegetal, sendo mais próxima ao valor obtido para densidade básica da madeira (517,8 kg.m⁻³), devido ao fato de o atiço ser composto por madeira que não foi completamente carbonizada.

Na Figura 3 estão apresentados os valores médios obtidos para a densidade a granel do carvão vegetal, dos atiços e dos finos.

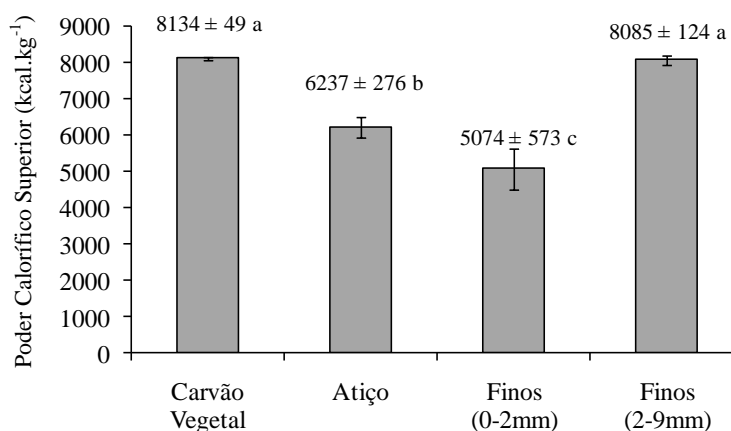


Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si a 5% de significância, pelo teste Kruskal-Wallis. As barras indicam o desvio padrão.

Figura 3 - Densidade a granel do carvão vegetal, atiço e finos (0-2 mm e 2-9 mm) em kg.m⁻³.

A densidade a granel dos finos de menor granulometria (0-2 mm) foi maior devido ao fato de apresentar menos espaços vazios entre as partículas, portanto obteve-se mais massa por unidade de volume.

Na Figura 4 estão apresentados os valores médios do poder calorífico superior do carvão vegetal, dos atijos e dos finos.



Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si a 5% de significância, pelo teste Tukey. As barras indicam o desvio padrão.

Figura 4 - Poder calorífico superior do carvão vegetal, atiço e finos de carvão.

O maior valor do poder calorífico superior foi observado para o carvão vegetal, seguido pelos finos (2-9 mm), visto que estes apresentam a mesma composição do carvão, apenas com diferente granulometria. O menor valor do poder calorífico dos finos (0-2 mm) se deve a grande contaminação com solo devido ao contato com o piso do forno.

Na Figura 5 estão apresentados os valores médios obtidos para a composição química do carvão vegetal, dos atijos e dos finos.

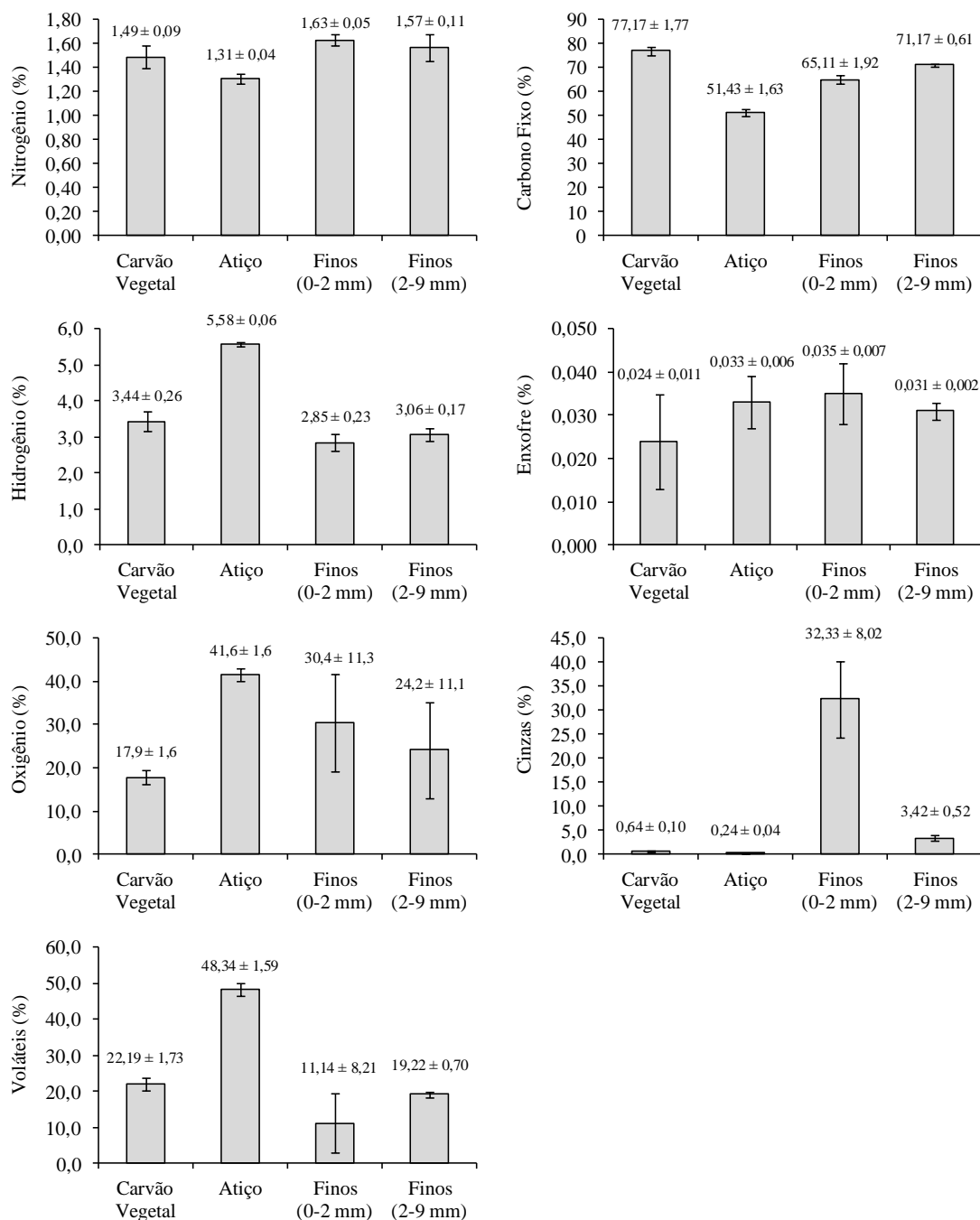


Figura 5 - Composição química do carvão vegetal, dos atiços e finos de carvão.

Observa-se que o teor de voláteis foi maior para os atiços, semelhante ao valor observado para a madeira, uma vez que os atiços são parte da madeira que não completaram o processo de carbonização. Com relação ao teor de cinzas, observa-se que os finos (0-2 mm) apresentaram um valor elevado para essa variável (34,48%), justificando o baixo poder calorífico superior. A presença desses inorgânicos nos

finos de menor granulometria se deve à contaminação por solo, devido ao contato com o piso do forno.

O atíço apresentou os menores valores para nitrogênio (1,31%) e carbono (51,43%), e maiores teores de hidrogênio (5,58%) e oxigênio (17,9%), enquanto que o carvão vegetal apresentou os maiores valores para carbono (77,17%) e baixos valores de hidrogênio (3,44%), sendo esse resultado coerente uma vez que o processo de carbonização promove a degradação da madeira e ocorre a perda de hidrogênio através dos gases e concentração de carbono no carvão vegetal.

Na Figura 6 estão apresentados os valores para o potencial energético para a madeira, casca, galhos e folhas (a) e carvão vegetal, dos atíços e finos de carvão (b).

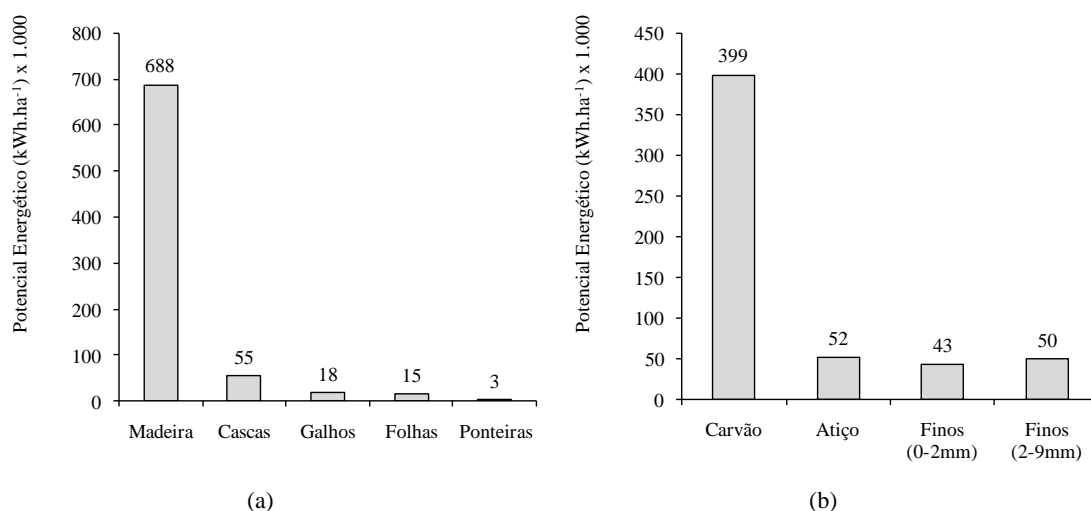


Figura 6 - Potencial energético para a madeira, casca, galhos e folhas (a) e carvão vegetal, dos atíços e finos de carvão (b).

A Tabela 7 apresenta o potencial de geração elétrica por hectare para a madeira, carvão e resíduos da colheita e da carbonização.

Tabela 7 - Resumo do potencial de geração de energia elétrica por hectare em função das diferentes biomassas

Parâmetros	Madeira	Casca	Galho	Folha	Carvão	Atiços	Finos (0-2 mm)	Finos (2-9 mm)
PCS (kcal/kg)	4.588	4.406	4.688	5.082	8.134	6.237	5.074	8.085
Umidade (%)	30,0	18,0	50,0	60,0	4,0	8,0	5,0	5,0
PC líquido (kcal/kg)	2.805	3.239	1.882	1.543	7.474	5.392	4.483	7.343
Massa de resíduo (t/ha)	129,0	10,7	3,3	2,6	42,2	7,2	7,3	5,3
Energia térmica (kcal/ha) (x 1000)	361.678,96	34.627	6.117	3.966	315.311	38.876	32.767	38.918
Energia elétrica (kWh/ha)	420.556,93	40.265	7.112	4.612	463.102	45.205	38.101	45.253
Energia Elétrica - eficiência de 11% - (kWh/ha)	46.261	4.429	782	507	50.941	4.973	4.191	4.978
Potencia elétrica a ser gerada (MWh)	46,3	4,4	0,8	0,5	50,9	5,0	4,2	5,0

4. DISCUSSÕES

Conforme observado na Figura 1, a distribuição de diâmetros (dap) apresentou o comportamento esperado de distribuição diamétrica, com tendência a normalidade, sendo que a classe com maior frequência foi a de 15 cm.

Esses valores estão de acordo com o que é comumente encontrado para povoamentos de *Eucalyptus* no Brasil, nessa idade avaliada (aproximadamente 80 meses de idade), conforme pode ser observado no trabalho desenvolvido por Leite et al. (2011), que avaliaram um povoamento de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*, em idades entre 30 e 118 meses, e aos 80 meses obtiveram uma maior frequência de árvores com o diâmetro entre 15 e 16 cm. Resultado semelhante também foi observado no trabalho realizado por Martins et al. (2011), que avaliaram um povoamento de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, dos 24 a 84 meses, e observaram que aos 72 meses, o dap médio foi de 16,34 cm e aos 84 meses foi 17,19 cm.

O clone avaliado no presente estudo (*Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*) apresentou um valor de densidade básica de 510 kg.m^{-3} (Tabela 4). Esse resultado está de acordo com o que se observa na literatura para os materiais genéticos utilizados para a produção de carvão vegetal, que variam em torno de 520 kg.m^{-3} a 560 kg.m^{-3} (OLIVEIRA e SILVA, 2003; OLIVEIRA et al., 2010; SANTOS, 2010; CASTRO, 2011; ROCHA, 2011). Da mesma forma, o valor obtido para a densidade básica da casca (330 kg.m^{-3}) foi semelhante ao obtido na literatura (PEREIRA et al., 2000; QUILHÓ e PEREIRA, 2001) que variaram de 217 kg.m^{-3} a 450 kg.m^{-3} para espécies de *Eucalyptus*.

O valor médio do poder calorífico superior da madeira foi de $4588 \text{ kcal.kg}^{-1}$ (Tabela 4), sendo que esse valor se encontra próximo ao observado por Quirino et al.

(2005) que listaram o poder calorífico superior de diversas espécies de madeira e obtiveram um valor médio de $4732 \text{ kcal.kg}^{-1}$, sendo que os valores variaram de $3350 \text{ kcal.kg}^{-1}$ a $5260 \text{ kcal.kg}^{-1}$. No trabalho desenvolvido por Couto et al. (1984), que avaliaram um povoamento de *Eucalyptus saligna* aos 102 meses obtiveram valores de poder calorífico superior para a madeira de $4288 \text{ kcal.kg}^{-1}$, para a casca de $3892 \text{ kcal.kg}^{-1}$ e para o resíduo de $4138 \text{ kcal.kg}^{-1}$. Verifica-se ainda que o maior valor para o poder calorífico superior foi obtido para as folhas ($5082 \text{ kcal.kg}^{-1}$), uma vez que apresentou o maior teor de carbono fixo (18,83%) e menor teor de voláteis (76,86%), apesar de ter apresentado o maior teor de cinzas (4,31%).

Com relação à composição química imediata da madeira, da casca e dos resíduos da colheita, apresentada na Tabela 4, verifica-se que, de modo geral, os valores obtidos nesse trabalho estão de acordo com o que se observa na literatura.

Quando se utiliza biomassa para energia, a composição elementar é uma propriedade do combustível muito importante e constitui a base para análise do processo de combustão. A determinação da composição elementar é importante, pois a concentração dos elementos pode influenciar o poder calorífico superior do combustível, sendo que o carbono e o hidrogênio contribuem positivamente para essa variável, enquanto que maiores teores de oxigênio fazem diminuí-la (VALE e GENTIL, 2008).

De maneira geral a composição elementar da madeira não varia muito, e os valores médios são: 50% de carbono; 6% de hidrogênio; 43% oxigênio, 0,15% de nitrogênio e 1% de cinzas (RAAD, 2004). Analisando a Tabela 5 verifica-se que os valores obtidos para a composição química elementar da madeira são semelhantes aos apresentados por esse autor.

As folhas apresentaram maior quantidade de nutrientes por quilo (kg) de material, entretanto quando se avalia a massa de nutrientes por hectare, verifica-se que a madeira aloca a maior quantidade dos nutrientes, uma vez que é responsável por 88,33% da biomassa total (Tabela 6).

No trabalho desenvolvido por Müller et al. (2005) no qual avaliaram a madeira de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus camaldulensis* até os dois anos de idade, constataram que a copa representa 20 a 22% da biomassa total e retém 20 a 23% dos nutrientes; a casca representa 10 a 11% da biomassa total e retém 62 a 67% dos nutrientes; e o fuste representa 67 a 70% da biomassa total e retém 11 a 16% dos

nutrientes. É importante ressaltar que aos dois anos de idade a árvore ainda não possui grande quantidade de madeira. Na fase inicial do crescimento da árvore, a biomassa é alocada principalmente na parte radicular e nas folhas.

Com relação à alocação de cada nutriente nos diversos compartimentos das árvores, verificou-se no presente trabalho que a madeira apresentou maior quantidade de nitrogênio, fósforo, enxofre e potássio (62,05%, 55,46%, 66,74%, 85,13%, respectivamente), a casca apresentou maior quantidade de cálcio (41,78%) e a copa apresentou maior teor de magnésio (38,95%). Resultado semelhante foi observado por Vital et al. (1999) que verificaram para madeira de *Eucalyptus saligna* aos 7 anos de idade, que as folhas apresentaram a maior concentração de nitrogênio, fósforo, potássio, e enxofre e na casca, por outro lado, foram encontradas as maiores concentrações de cálcio e magnésio.

Müller et al. (2005) verificaram que cerca de 50% do nitrogênio estava alocado na copa, 35% na casca e 17% na madeira; o fósforo, o cálcio e o magnésio apresentaram maiores concentrações na casca (94, 91 e 97%, respectivamente) e o potássio apresentou distribuição maior entre a casca e a madeira (18% na copa, 42,5% na casca e 40% na madeira).

A determinação da composição mineral da madeira e dos resíduos é muito importante quando se pretende utilizar toda a biomassa produzida, pois dessa maneira é possível determinar a exportação de nutrientes e os níveis sustentáveis da utilização dos resíduos.

De maneira geral, o eucalipto produz serapilheira relativamente pobre em nutrientes, em razão de sua eficiente ciclagem bioquímica, contribuindo, assim, pouco para a reposição de nutrientes ao solo (CUNHA et al., 2005). A questão da manutenção da produtividade de plantações de eucalipto em regime de curtas rotações está relacionada com a espécie e com as práticas de manejo aplicadas e com a densidade de plantio (CUNHA et al., 2005), portanto é necessária avaliação para cada caso.

Além disso, a composição mineral da biomassa pode influenciar na sua utilização como matéria prima, ou seja, alguns minerais podem afetar negativamente a produção de alguns materiais, gerando defeitos no produto. Na produção do ferro gusa, altos teores de cinzas, bem como os sais que estão presentes na sua composição, podem prejudicar a produção de ferro-gusa, ferro-ligas e metais não

ferrosos, podendo provocar defeitos. Os diversos tipos de aço produzidos apresentam uma grande variedade de elementos deletérios em sua composição, sendo que o fósforo é uma das principais impurezas contidas influenciando o fortemente sua qualidade, alterando as características específicas desejadas para esses produtos (PEDRINI E CATEN, 2010).

Outro problema que pode ser provocado devido à presença de minerais é o encrustamento de cinzas e a corrosão em equipamentos e tubulações, que pode diminuir muito a vida útil do equipamento em questão.

Para uso siderúrgico é importante que o carvão apresente as propriedades dentro de um determinado padrão para melhorar a produtividade no alto-forno, e para a densidade relativa aparente o ideal é que o carvão apresente valores superiores a 250 kg.m^{-3} (SANTOS, 2008). Analisando a Figura 3 observa-se que o resultado encontrado para de densidade relativa aparente (376 kg.m^{-3}) do carvão estão de acordo com a literatura.

O poder calorífico superior do carvão vegetal foi o que apresentou maior valor ($8134 \text{ kcal.kg}^{-1}$), enquanto que os finos (0-2 mm) apresentaram o menor valor para essa propriedade, devido possivelmente a uma contaminação com impurezas presentes no chão do forno (Figura 4).

De acordo com Santos (2008) o carvão vegetal para uso siderúrgico deve apresentar teor de carbono fixo entre 70% e 80% e teor de materiais voláteis variando de 25% a 35%. Avaliando a Figura 5 verifica-se que o carvão vegetal apresentou valores próximos aos apresentados na literatura, atendendo aos parâmetros para utilização em siderurgia.

A reação de carbonização da madeira consiste, basicamente, em concentrar carbono e expulsar oxigênio, com conseqüente aumento do conteúdo energético do produto (VALE e GENTIL, 2008; SANTOS, 2010). Na madeira, os teores de carbono e oxigênio são, em média, respectivamente, de 49% e 44%, e depois da carbonização, esses teores passam, em média, no carvão vegetal para 82% e 13,7%, sendo assim, o carvão retém aproximadamente 57% do carbono da madeira, enquanto 89% do oxigênio são volatilizados (SANTOS, 2010).

Analisando a Figura 6 observa-se que a madeira apresentou o maior potencial energético, que se deve a maior quantidade de biomassa produzida por esse componente da árvore. Porém, quando comparamos com o carvão vegetal,

observamos que este apresenta elevado potencial para geração de energia, devido ao poder calorífico mais elevado. Ou seja, durante a carbonização ocorre a concentração de carbono e conseqüentemente, de energia. Dessa maneira, verifica-se que os resíduos da carbonização também apresentam expressivo potencial energético, maior do que os resíduos da colheita florestal. Do ponto de vista do setor elétrico, verifica-se na Tabela 7 que o potencial total da biomassa para geração de energia elétrica, utilizando uma conversão elétrica média de 11%, está em torno de 117 MWh.ha⁻¹.

É possível observar que os resíduos florestais (casca, galho e folha) e da carbonização (atiço e finos) apresentam potencial de geração de energia elétrica de ordem de 19,86 MWh.ha⁻¹, o que é uma quantidade de energia considerável.

A principal barreira para o aproveitamento dos resíduos da colheita florestal é a questão logística, para o transporte da biomassa até a planta de cogeração devido ao seu volume. Por isso já estão sendo avaliadas alternativas para o processamento e transporte dessa biomassa para tentar viabilizar a sua utilização, visto que existe um grande potencial de geração de energia que não é aproveitado. Dentre essas alternativas tem-se a picagem ou produção de cavacos próximo ao talhão (área de produção de madeira) e enfardamento da biomassa. Dessa forma, consegue-se diminuir o volume do material para ser transportados.

5. CONCLUSÕES

A madeira de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* aos 79 meses, avaliada no presente trabalho, apresenta qualidade para a produção de carvão vegetal.

Os resíduos da colheita florestal e da carbonização apresentaram potencial para serem utilizados para a geração de energia, uma vez que estocam uma grande quantidade de energia que não é utilizada. Entretanto, os finos de menor granulometria (0-2mm) apresentam-se contaminados, o que dificulta o seu aproveitamento.

A quantidade de nutrientes exportada caso o resíduo da colheita seja retirado do campo para utilização na geração de energia é significativa, o que pode acarretar em custos com fertilização, e precisa ser devidamente avaliado, a fim de determinar o limite de utilização desses resíduos.

6. AGRADECIMENTOS

Ao Programa de P&D regulado pela ANEEL, a ArcelorMittal Bioflorestas e CEMIG pelo financiamento e parceria no projeto. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao CNPq pela bolsa produtividade e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pelo apoio financeiro e pela concessão de bolsa.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8633**: carvão vegetal: determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro, 1984, 13 p.
- BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G.; SEIXAS, F.; MIGLIORINI, A. J.; MURAMOTO, M. C. Análise da produção energética e de carvão vegetal de espécies de eucalipto. **IPEF**, n. 23, p. 53-56, 1983.
- CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração florestal**: perguntas e respostas. 4. Ed. Viçosa – MG: UFV, 2013. 605 p.
- CASTRO, A. F. N. M. **Efeito da idade e de materiais genéticos de Eucalyptus sp. na madeira e carvão vegetal**. 2011. 98f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2011.
- COUTO, H. T. Z.; BRITO, J. O.; TOMAZELLO FILHO, M.; CORRADINI, L.; FAZZIO, E. C. M. Quantificação de resíduos florestais para produção de energia em povoamento de Eucalyptus saligna. **IPEF**, n.26, p. 19-23, 1984.
- CUNHA, G. M.; GAMA-RODRIGUES, A. C.; COSTA, G. S. Ciclagem de nutrientes em Eucalyptus grandis W. Hill ex Maiden no norte fluminense. **Revista Árvore**, Viçosa, v.29, n.3, p.353-363, 2005.
- DEDECEK, R. A.; BELLOTE, A. F. J. Uso de Resíduos de Colheita e Industriais em Plantações de Eucaliptos. **Embrapa Florestas**. Comunicado Técnico 221, Colombo, 2008.
- LEINONEN, A. **Harvesting technology of forest residues for fuel in the USA and Finland**. Espoo, 132 p. (VTT Tiedotteita. Research Notes, 2229), 2004.
- LEITE, H. G.; CASTRO, R. V. O.; SILVA, A.; ARAÚJO JUNIOR, C. A.; BINOTI, D. CASTRO, A. F. N. M.; BINOTI, M. Classificação da capacidade produtiva de povoamentos de eucalipto utilizando diâmetro dominante. **Silva Lusitana**, v.19, n. 2, p. 181-195, 2011.
- LIMA, A. P. B. **Caracterização de três sistemas de colheita de resíduos de exploração florestal para fins de carbonização em áreas manejadas da Amazônia brasileira**. 2011, 80 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA, Belém, 2011.

- MARTINS, F. B.; SOARES, C. P. B.; LEITE, H. G.; SOUZA, A. L.; CASTRO, R. V. O. Índices de competição em árvores individuais de eucalipto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.46, n.9, p.1089-1098, 2011.
- MULLER, M. D.; COUTO, L.; NEVES, J. C. L. Produção de biomassa e balanço nutricional de plantações de eucalipto clonal em diferentes densidades de plantio no município de Itamarandiba – MG. **Biomassa & Energia**, v. 2, n. 2, p. 91-101, 2005.
- NEVES, T. A.; PROTÁSIO, T. P.; COUTO, A. M.; TRUGILHO, P. F.; SILVA, V. O.; VIEIRA, C. M. M. Avaliação de clones de Eucalyptus em diferentes locais visando à produção de carvão vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 31, n. 68, p. 319-330, 2011.
- OLIVEIRA, A. C.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; PEREIRA, B. L. C.; CARDOSO, M. T. Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de Eucalyptus pellita F. Muell. **Scientia Forestalis**, v. 38, n. 87, p. 431-439, 2010.
- OLIVEIRA, J. T. S.; SILVA, J. C. Variação radial da retratibilidade e densidade básica da madeira de Eucalyptus saligna Sm. **Revista Árvore**, v.27, n.3, p.381-385, 2003.
- PAES, F. A. S. V.; LIMA, A. M. N.; HAKAMADA, R. E.; BARROS, N. F. Impacto do manejo dos resíduos da colheita, do preparo do solo e da adubação na produtividade de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 37, p. 1081-1090, 2013.
- PEDRINI, D. C.; TEN CATEN, C. S. Modelagem estatística para a previsão do teor de fósforo em ligas de Ferromanganês. **INGEPRO – Inovação, Gestão e Produção** Fevereiro de, v. 2, n. 2, p. 14-25, 2010.
- 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), 2000.
- PINHEIRO, G. F.; RENDEIRO, G.; PINHO, J. T. Densidade energética de resíduos vegetais. **Biomassa e Energia**, v. 2, n. 2, p. 113-123, 2005.
- 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**, v. 31, n. 66, p. 113-122, 2011.
- QUILHÓ, T.; PEREIRA, H. Within and between-tree variation of bark content and wood density of eucalyptus globulus in commercial plantations. **IAWA Journal**, v. 22, n. 3, p. 255-265, 2001.
- 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, 2005.
- RAAD, T. J. **Simulação do processo de secagem e carbonização de Eucalyptus spp.** 2004. 110 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2004.

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.

REIS, A. A.; PROTÁSIO, T. P.; MELO, I. C. N. A.; TRUGILHO, P. F.; CARNEIRO, A. C. O. Composição da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus urophylla* em diferentes locais de plantio. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 32, n. 71, p. 277-290, 2012.

ROCHA, M. F. V. **Influência do espaçamento e da idade na produtividade da madeira de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus camaldulensis* para energia**. 2011, 84 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2011.

SANTOS, M. A. S. Parâmetros da qualidade do carvão vegetal para uso em alto-forno. In: **Fórum nacional de carvão vegetal**. 2008, Belo Horizonte. Disponível em: <painelflorestal.com.br/exibeNews.php?id=1784>. Acesso em: 31 Maio, 2009. 2008.

SANTOS, R. C. **Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto**. 2010, 159 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2010.

SILVA, J. V.; NOGUEIRA, G. S.; SANTANA, R. C.,; LEITE, H. G.; OLIVEIRA, M. L. R.; ALMADO, R. P. Produção e acúmulo de nutrientes em povoamento de eucalipto em consequência da intensidade do desbaste e da fertilização. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.47, n.11, p.1555-1562, 2012.

SOUZA, M. M., SILVA, D. A., ROCHADELLI, R., SANTOS, R. C. Estimativa de poder calorífico e caracterização para uso energético de resíduo da colheita e do processamento de *Pinus taeda*. **Floresta**, v. 42, n. 2, p. 325 - 334, 2012.

VALE, A. T.; GENTIL, L.V. Produção e uso energético de biomassa e resíduos a agroflorestais. In: OLIVEIRA, J. T. S.; FIEDLER, N. C.; NOGUEIRA, M. (Ed.). **Tecnologias aplicadas ao setor madeireiro III**. Jerônimo Monteiro – ES: 2008. p. 196-246, 2008.

VITAL, A. R. T.; LIMA, W. P.; POGGIANI, F.; CAMARGO, F. R. A. Biogeoquímica de uma microbacia após o corte raso de uma plantação de eucalipto de 7 anos de idade. **Scientia Forestalis**, n. 55, p. 17-28, 1999.

VITAL, B. R. **Métodos de determinação de densidade da madeira**. Viçosa, MG: SIF, 21 p. (Boletim Técnico, 1), 1984.

CAPÍTULO III

EQUAÇÕES ALOMÉTRICAS PARA ESTIMAR ESTOQUE DE ENERGIA EM ÁRVORES DE EUCALIPTO

RESUMO – O uso de biomassa para produção de energia vem apresentando destaque por se tratar de um combustível renovável, e no Brasil, a biomassa florestal tem particular importância devido às grandes áreas florestadas que existem no país. É importante poder determinar qual a quantidade de energia estocada em um povoamento para dimensionar adequadamente a sua utilização. Sendo assim, este trabalho teve como objetivo ajustar modelos alométricos e gerar equações para estimar o estoque de energia na árvore, ou seja, a energia total, bem como a energia estocada nas diferentes partes das árvores. Foi avaliado um povoamento de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* aos 79 meses de idade. Utilizou-se o modelo de Schumacher e Hall, com as variáveis independentes diâmetro a altura do peito, altura, altura da copa e largura da copa, foram selecionados 5 modelos, que utilizavam essas variáveis. Para madeira, casca e energia total o modelo que utilizou as variáveis diâmetro a altura do peito e altura foi o selecionado, enquanto que para galhos e folhas foi selecionado o modelo que utilizou as variáveis diâmetro a altura do peito e largura de copa. As equações selecionadas foram adequadas para a estimativa de estoque de energia nas árvores de *Eucalyptus*. Os modelos que estimam o estoque de energia total, na madeira e na casca foram adequados utilizando como variáveis independentes o diâmetro a altura do peito e altura das árvores e para a estimativa da energia estocada nas folhas e galhos, a equação que utiliza apenas as variáveis diâmetro a altura do peito e largura de copa.

Palavras-Chave: Estoque de energia; resíduos florestais; biomassa florestal.

CHAPTER III

ALLOMETRIC EQUATIONS TO ESTIMATE POWER STOCK IN EUCALYPTUS TREE

ABSTRACT - The use of biomass for energy production has shown highlighted because it is a renewable fuel, and at Brazil, forest biomass is particularly important due to the large forested areas that exist in the country. It is important to determine how much energy stored in a settlement to properly size its use. Thus, this study aimed to adjust allometric models and generate equations to estimate the energy supply in the tree, the total energy and the energy stored in different parts of the trees. Stand of *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* at 79 months age was evaluated. Were used the Schumacher and Hall model, with the independent variables diameter at breast height, height, height of the crown and crown width, and were selected 5 models, which used these variables. For wood, bark and total energy the model that used the variables diameter at breast height and height was selected, while for branches and leaves was selected the model that used the variables diameter at breast height and crown width. The selected equations were suitable for energy stock estimation in *Eucalyptus* trees. The models that estimate the total energy stock, in wood and bark were adequate using as independent variables diameter at breast height and tree height and to estimate the energy stored in the leaves and branches, the equation that uses only the variables diameter at breast height and crown width.

Keywords: Energy stock; forest residues; forest biomass.

1. INTRODUÇÃO

A obtenção de energia a partir de biomassa está ganhando cada vez mais destaque nas pesquisas (MULLER et al., 2005; VALE e GENTIL, 2008; RAMOS e PAULA et al., 2011; PROTÁSIO et al., 2011), por se tratar de uma fonte renovável de energia, além dos elevados preços dos combustíveis fósseis e da necessidade de diminuir a emissão de poluentes na atmosfera.

Dentre as fontes de biomassa utilizadas, a biomassa florestal apresenta grande destaque e pode ser diferenciada em três principais grupos: o material advindo da colheita florestal (ou resíduo da colheita), os resíduos gerados devido ao processamento da madeira e a madeira oriunda de florestas energéticas (SOUZA et al., 2012). O resíduo da colheita florestal é formado por galhos, folhas, uma porção das cascas e parte da madeira que não é aproveitada, como as ponteiros (madeira com diâmetro inferior ao comercial). A biomassa florestal e os resíduos tem apresentado potencial de utilização para geração de energia e com isso surge a necessidade de desenvolver novos estudos para avaliar as propriedades desse material, de modo a determinar o seu potencial para aproveitamento. Além da caracterização da biomassa é importante também determinar a quantidade de energia que existe na árvore como um todo e nas partes separadamente.

A utilização de modelos para representar ou explicar uma realidade é uma estratégia muito utilizada em vários campos da ciência (SOARES et al., 2005). Uma maneira de estimar a quantidade de energia em árvores é através da utilização de equações alométricas, para cada parte da árvore de modo a obter a quantidade de energia total e em cada parte separadamente. Uma relação é dita alométrica quando uma característica física ou fisiológica sofre variação com o tamanho do organismo (AMARO, 2010).

Um modelo alométrico é uma relação empírica entre a variável de interesse e as variáveis facilmente mensuráveis, a exemplo da altura da árvore e diâmetro da árvore à altura do peito (dap), que podem ser estabelecidas por meio de uma análise de regressão (KETTERINGS et al., 2001; BRIANEZI et al., 2013).

Atualmente, as equações alométricas são utilizadas com bastante precisão para determinação de volume, biomassa e carbono (KETTERINGS et al., 2001; SOARES et al., 2005; BASUKI et al., 2009; MUTURI et al., 2011; BRIANEZI et al., 2013) entretanto o uso de equações alométricas para estimar a energia estocada na árvore, ainda é incipiente.

Sendo assim, o objetivo do presente estudo foi ajustar modelos alométricos e gerar equações para estimar o estoque de energia na árvore, ou seja, a energia total, bem como a energia estocada nas diferentes partes das árvores.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Local do experimento

O presente estudo foi desenvolvido na empresa ArcelorMittal BioFlorestas na cidade de Martinho Campos – MG. O clima da região é do tipo Cwa, segundo a classificação de Köppen, caracterizado por verões úmidos e invernos secos, com temperatura média anual entre 19,8 e 25,3°C, e precipitação média anual de 1.400 mm (SILVA et al., 2012).

Inicialmente definiu-se uma área de produção de 50 hectares, correspondente ao material genético mais representativo da empresa (*Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*), com espaçamento inicial de 3,0 m x 2,5 m, que se encontrava em idade de corte, aos 79 meses no período de execução do projeto. Outras informações referentes à área de estudo estão descritas na Tabela 1.

Tabela 1 - Informações cadastrais e de produtividade referentes à área de estudo

Data de Plantio (dd/mm/aaaa)	20/09/2005
Data de Corte (dd/mm/aaaa)	15/06/2012
Idade (meses)	79 (inventário)
Declividade máxima da área	3% (plano)
Volume total com casca (m ³ ha ⁻¹)	283,18
Número de árvores (ha)	1235
Mortalidade	7%
IMA _{6,6} (m ³ ha ⁻¹ ano ⁻¹)	42,9

em que IMA é o incremento médio anual em volume com casca na idade de corte (Campos e Leite, 2013).

2.2. Inventário florestal e amostragem de biomassa

Foi realizado o inventário da área antes do corte da floresta, pela metodologia da amostragem casual simples (SOARES et al., 2011), de acordo com a metodologia

da empresa para inventários pré-corte. Foi determinado um erro máximo admissível de $\pm 10\%$, a 95% de probabilidade. A produtividade estimada foi de $283,18 \pm 3,1\%$ m^3 de madeira com casca por ha.

Para a estimativa do estoque de biomassa total da floresta antes da colheita, bem como da biomassa estocada em cada parte das árvores (madeira, casca, galho, folha), foram realizadas cubagens rigorosas de 60 árvores-amostra, sendo que foram obtidas árvores com dimensões que contemplassem todas as classes diamétricas observadas, conforme sugerido por Campos e Leite (2013).

Foram medidos os dap, Ht, Lc e Hc das árvores amostradas e esses valores estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Sumário dos dados amostrados nas 60 árvores de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*, cubadas rigorosamente aos 79 meses

Variável	Mínimo	Médio	Máximo	DP
dap (cm)	10,03	15,03	19,51	$\pm 2,71$
Ht (m)	18,50	25,67	30,30	$\pm 2,61$
Hc (m)	1,50	3,88	9,60	$\pm 1,78$
Lc (m)	1,45	2,37	3,55	$\pm 0,49$

Em que: dap é Diâmetro a altura do peito; Ht é altura total; Hc é altura de copa e Lc é largura de copa e DP é o desvio-padrão.

Na Figura 1 a está apresentada a distribuição diamétrica das árvores do povoamento avaliado e na Figura 1 b está apresentada a frequência de árvores amostradas, em cada classe diamétrica, para a quantificação de biomassa.

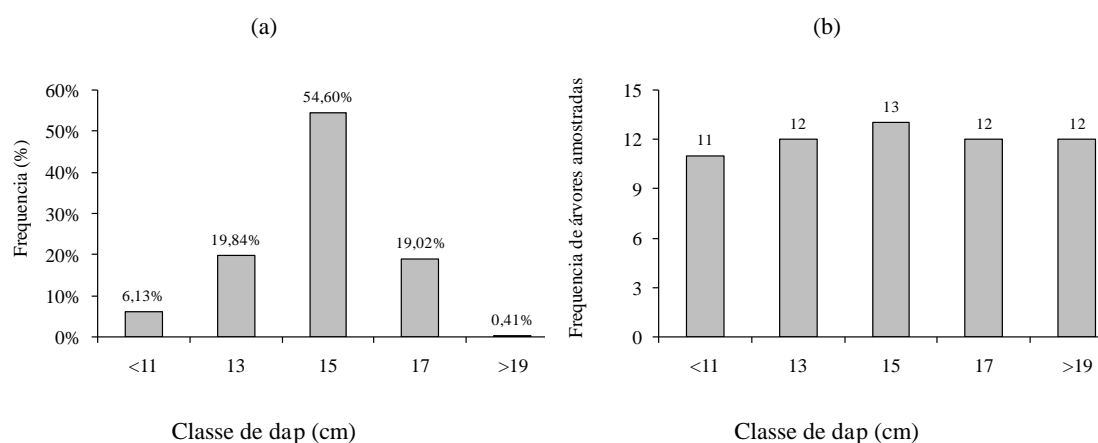


Figura 1 - (a) Distribuição diamétrica (dap) das árvores do talhão ($\sigma = 3,87\text{cm}$); (b) frequência de árvores amostradas para quantificação de biomassa.

Dessas árvores, foram retiradas as folhas, galhos e casca, e depositadas separadamente em lonas para pesagem logo após a colheita das árvores, de modo a evitar a perda de umidade.

Após a pesagem do material de cada árvore separadamente, foram retiradas amostras de cada uma das partes, com aproximadamente 300 gramas cada, para determinação do teor de umidade e estimativa da biomassa. A amostra de folhas continha folhas verdes de diferentes tamanhos, a amostra de galhos, apenas os galhos que estavam vivos (com folhas), com diferentes diâmetros, e a amostra de cascas foi coletada ao longo de cada árvore.

Do tronco foram obtidos cinco discos equidistantes, em diferentes posições no tronco, ou seja, a 0, 25, 50, 75 e 100% da altura comercial de cada árvore amostra, além do disco na altura do dap (diâmetro à altura do peito), totalizando seis discos por árvore. Os discos também foram pesados logo após o processamento das árvores, para evitar a perda de umidade.

As amostras de cascas, galhos, folhas e os discos de madeira de cada uma das 60 árvores foram separadas em sacos plásticos, para posteriormente serem enviadas ao laboratório para obtenção da massa seca e também densidade básica da madeira e da casca.

2.3. Estimativa de energia em árvores de eucalipto

Para a estimativa da energia estocada nas árvores foram determinados os valores de biomassa e poder calorífico superior, em cada parte da árvore.

A biomassa dos galhos e das folhas das 60 árvores amostradas foi determinada a partir da equação 1 (SOARES et al., 2011):

$$PS(c) = \frac{PU(c).PS(a)}{PU(a)} \quad (\text{eq.1})$$

em que:

PS(c) = biomassa, em kg;

PU(c) = massa de matéria úmida total de folhas ou galhos, em campo, em kg;

PU(a) = massa de matéria úmida da amostra levada ao laboratório, em kg; e

PS(a) = massa de matéria seca de amostra, em kg.

Das 60 árvores cubadas, foram selecionadas 15 árvores amostra, sendo três em cada uma das cinco classes de diâmetro identificadas (Figura 2 b), para a determinação da densidade básica e do poder calorífico superior da madeira e da casca e seus valores médios por classe de diâmetro foram utilizados para estimativa das demais árvores. De cada um dos seis discos foram retiradas duas cunhas opostas passando pela medula, as quais foram identificadas e destinadas à determinação da densidade básica da madeira. Para a casca, utilizou-se uma amostra composta, retirando-se três amostras de casca ao longo do fuste. Os procedimentos utilizados para determinação da densidade básica da madeira e da casca estão de acordo com o método de imersão em água, descrito por Vital (1984). Os valores de densidade foram calculados a partir da média ponderada pelo diâmetro dos discos das respectivas cunhas para a madeira, e das três amostras para a casca.

Para a determinação da biomassa de madeira e de casca dos fustes das árvores amostras, utilizou-se a equação 2 (SOARES et al., 2011):

$$PS(c) = V.(DBMT)\text{ou}(DBC) \quad (\text{eq.2})$$

em que:

PS(c) = biomassa da madeira ou da casca, em kg;

V = volume de madeira ou da casca, em m³;

DBMT = densidade básica da madeira, em kg.m⁻³;

DBC = densidade básica da casca, em kg.m⁻³.

Na Tabela 3 estão apresentados os valores de densidade básica, por classe de diâmetro, para a madeira e a casca.

Tabela 3 - Densidade básica, por classe de diâmetro, para madeira e casca

Classe de diâmetro (cm)	Densidade Básica (kg.m ⁻³)	
	Madeira	Cascas
11	489 ± 17,0 (*)a	350 ± 9,0 a
13	492 ± 12,0 (*)a	336 ± 19,0 a
15	550 ± 60,0 (*)a	337 ± 31,0 a
17	524 ± 7,0 (*)a	309 ± 27,0 a
19	533 ± 8,0 (*)a	320 ± 28,0 a
\bar{X}	518 ± 34,0	331 ± 25,0
\bar{X}_p	530	350

Médias seguidas de mesmas letras, em uma mesma coluna, não diferem entre si pelo teste Tukey ($\alpha=0,05$). *Médias seguidas de mesmas letras, em uma mesma coluna, não diferem entre si pelo teste Kruskal-Wallis ($\alpha=0,05$).

O poder calorífico superior da madeira, da casca, dos galhos e das folhas foi determinados de acordo com a metodologia descrita pela norma da ABNT NBR 8633 (ABNT, 1984), utilizando-se uma bomba calorimétrica adiabática.

Na Tabela 4 estão apresentados os valores de poder calorífico superior, por classe de diâmetro, para a madeira, a casca, os galhos e as folhas.

Tabela 4 - Poder calorífico superior, por classe de diâmetro, para madeira, casca, galhos e folhas

Classe de diâmetro (cm)	PCS (kcal.kg ⁻¹)			
	Madeira	Cascas	Galhos	Folhas
11	4576 ± 24 a	4401 ± 9 a	4682 ± 43 a	5120 ± 13 (*)a
13	4604 ± 38 a	4361 ± 58 a	4665 ± 44 a	5005 ± 126 (*)a
15	4588 ± 21 a	4418 ± 22 a	4692 ± 47 a	5091 ± 25 (*)a
17	4577 ± 43 a	4388 ± 25 a	4702 ± 39 a	5126 ± 26 (*)a
19	4591 ± 11 a	4351 ± 60 a	4715 ± 44 a	5148 ± 47 (*)a
\bar{X}	4587 ± 27	4384 ± 43	4691 ± 41	5098 ± 74
\bar{X}_p	4588	4400	4688	5082

Médias seguidas de mesmas letras, em uma mesma coluna, não diferem entre si pelo teste Tukey ($\alpha=0,05$).

*Médias seguidas de mesmas letras, não diferem entre si pelo teste Kruskal-Wallis ($\alpha=0,05$).

Para determinar o estoque de energia em cada parte da árvore multiplicou-se a biomassa pelo poder calor superior, conforme equação 3:

$$EE = \text{Biomassa} \times \text{PCS} \times 4,19002 \quad (\text{eq. 3})$$

em que:

EE = estoque de energia, kJ;

Biomassa = biomassa de madeira, casca, galhos ou folhas (kg.árvore⁻¹);

PCS = poder calorífico superior da madeira, casca, galhos ou folhas (kcal.kg⁻¹).

2.4. Seleção dos modelos

A seleção dos modelos foi baseada nos gráficos de dispersão que apresentam a tendência das variáveis (Figura 2). Observa-se que todas as variáveis apresentaram relação com os estoques de energia, com comportamento exponencial.

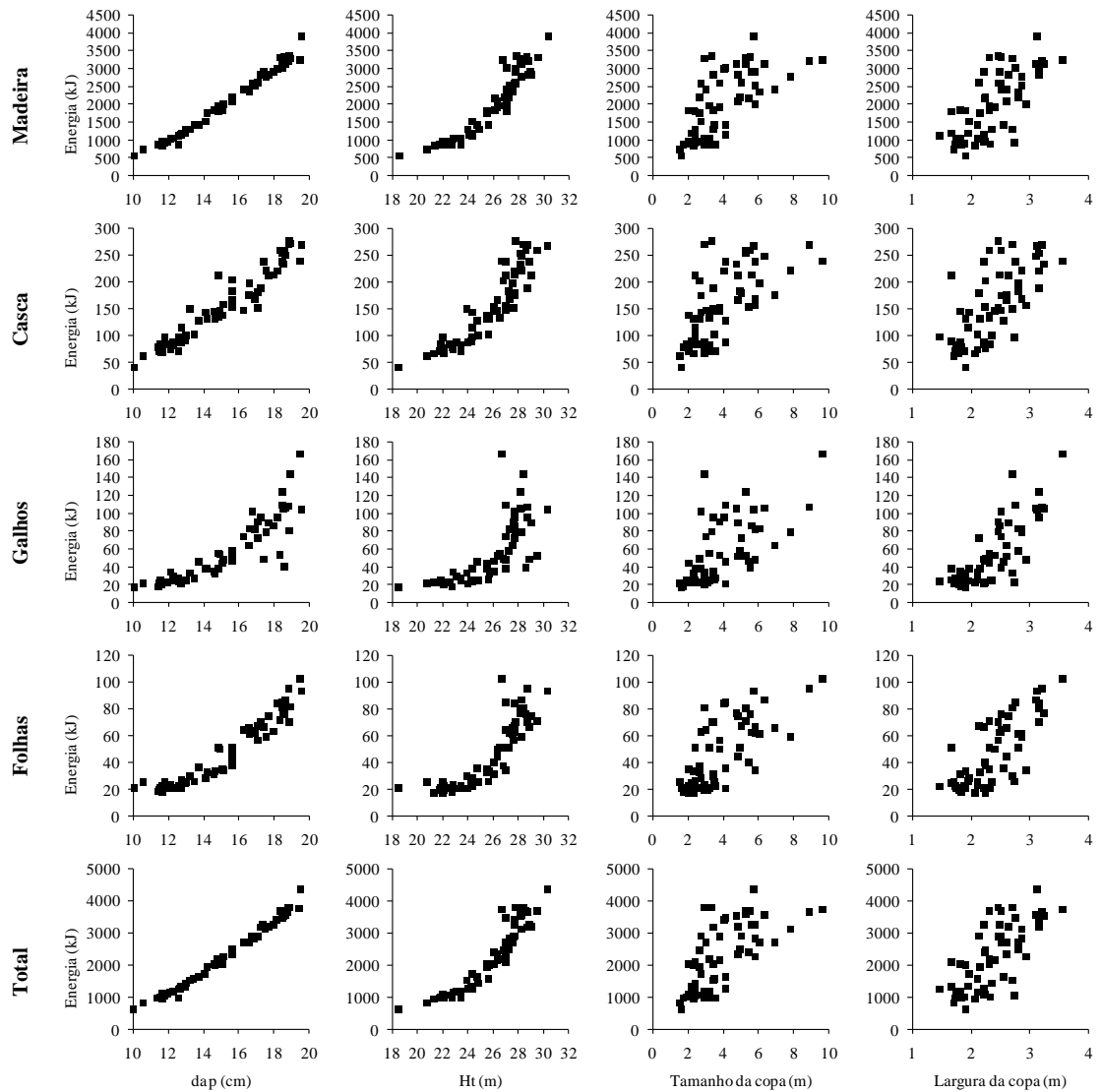


Figura 2 - Tendência do estoque de energia em cada parte da árvore em função das variáveis dap, Ht, Tc e Lc.

Em que: dap é diâmetro a altura do peito; Ht é altura total; Hc é altura de copa e Lc é largura de copa.

Dessa forma foram selecionados os modelos exponenciais a seguir, derivados do consagrado modelo alométrico de Schumacher e Hall (1933):

$$\text{Ln Energia} = \beta_0 + \beta_1 \cdot \text{Ln dap} + \text{Ln} \varepsilon \quad (\text{eq. 1})$$

$$\text{Ln Energia} = \beta_0 + \beta_1 \cdot \text{Ln dap} + \beta_2 \cdot \text{Ln Ht} + \text{Ln} \varepsilon \quad (\text{eq. 2})$$

$$\text{Ln Energia} = \beta_0 + \beta_1 \cdot \text{Ln dap} + \beta_2 \cdot \text{Ln Ht} + \beta_3 \cdot \text{Ln Tc} + \text{Ln} \varepsilon \quad (\text{eq. 3})$$

$$\text{Ln Energia} = \beta_0 + \beta_1 \cdot \text{Ln dap} + \beta_2 \cdot \text{Ln Ht} + \beta_3 \cdot \text{Ln.Tc} + \beta_4 \cdot \text{Ln.Lc} + \text{Ln}\varepsilon \quad (\text{eq. 4})$$

Em que: dap é diâmetro a altura do peito; Ht é altura total da árvore; Hc é altura de copa; Lc é largura de copa.

Para o ajuste dos modelos foram utilizadas, aleatoriamente, 40 árvores, das 60 árvores amostradas, e as 20 árvores restantes (4 por classe de diâmetro) foram utilizadas para validação das equações.

2.5. Avaliação das equações

A qualidade dos ajustamentos foi avaliada com base nas estatísticas: Coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}); Coeficiente de variação [CV(%)], Significância da equação pelo teste F ($p < 0,05$); Significância dos parâmetros das equações ($p < 0,05$); Coeficiente de correlação entre valores observados e valores estimados da variável dependente ($r_{\hat{y}y}$), raiz quadrada do erro médio (RMSE – Root Mean Square Error) (SIIPILEHTO, 2000; BINOTI, 2012), além de análises gráficas de resíduos (CAMPOS e LEITE, 2013), sendo:

$$R^2_{aj} = \left[1 - \left(\frac{n-1}{n-p-1} \right) \cdot (1 - R^2) \right] \quad (\text{eq. 5})$$

$$R^2 = \left[1 - \frac{\sum (y - \hat{y})^2}{\sum (y - \bar{y})^2} \right] \quad (\text{eq. 6})$$

$$CV(\%) = \frac{\sqrt{\frac{\sum (y - \hat{y})^2}{n-p-1}}}{\bar{y}} \cdot 100 \quad (\text{eq. 7})$$

$$r_{\hat{y}y} = \frac{\text{Cov}(\hat{y}, y)}{\sqrt{V(\hat{y})V(y)}}$$

$$RMSE(\%) = \frac{\sqrt{\frac{\sum (y - \hat{y})^2}{n}}}{\bar{y}} \cdot 100 \quad (\text{eq. 8})$$

$$\text{Erro} = \frac{y - \hat{y}}{y} \cdot 100 \quad (\text{eq. 9})$$

em que: n é o número de observações; p é o número de variáveis independentes; y são os valores observados da variável dependente; \hat{y} são os valores estimados da variável dependente; \bar{y} é o valor médio da variável dependente; COV é a covariância e V é a variância.

O R^2_{aj} quantifica o quanto da variação de y pôde ser explicada pelo uso das variáveis x , ponderados pelo número de amostras (diretamente proporcional) e número de variáveis independentes (inversamente proporcional). Quanto mais próximo de 1, melhor.

O $CV(\%)$ quantifica a dispersão dos dados em torno da regressão ajustada, em relação à média. Quanto menor esse valor, melhor.

O $r_{\hat{y}y}$ é a relação entre os valores observados e estimados. Varia entre -1 e 1, sendo que valores próximos a 1 indicam que os valores estimados pela equação de regressão são próximos aos valores observados.

A $RMSE$ avalia a diferença quadrática média entre os valores observados e estimados. Quanto menor o $RMSE$, melhor a precisão da estimativa, sendo ótimo quando é igual a zero (MEHTÄTALO et al., 2006).

Além das estatísticas de precisão foi utilizado o princípio da parcimônia que determina que deve-se escolher o modelo mais simples possível, utilizando-se do menor número de variáveis independentes (GUJARATI e PORTER, 2011).

2.6. Validação das equações

A validação procedeu-se aplicando as equações ajustadas à base de dados com 20 árvores cubadas que não fizeram parte dos dados de ajuste da equação (dados independentes), selecionadas aleatoriamente da base de dados original. A qualidade da validação foi avaliada por meio do coeficiente de correlação entre valores observados e valores estimados da variável dependente ($r_{\hat{y}y}$) e raiz quadrada do erro médio ($RMSE$).

3. RESULTADOS

Na Figura 3 estão apresentados os valores de estoque de energia em cada parte da árvore: madeira, casca, galhos e folhas, por classe de diâmetro.

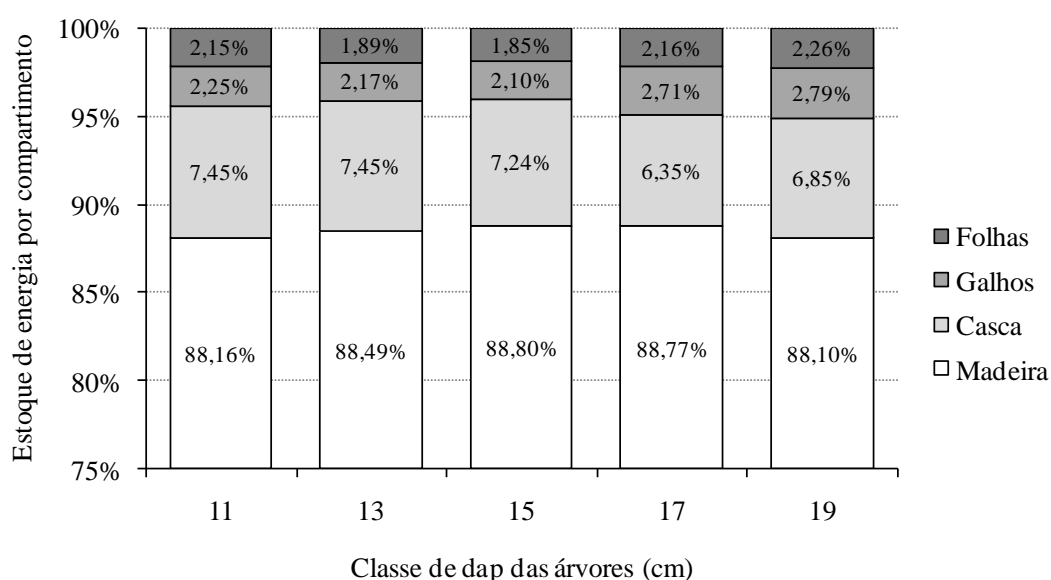


Figura 3 - Estoque de energia em cada parte da árvore por classe de dap.

Observa-se que a madeira contribuiu com a maior parte de estoque de energia na árvore, seguido pela casca, galhos e folhas, respectivamente.

Devido a não significância dos parâmetros β_2 e β_3 e significância do parâmetro β_4 da equação 4 para estimativa de energia nos galhos e nas folhas, optou-se por ajustar o modelo 5, onde utiliza como variáveis independentes para estimativa da energia nos galhos e nas folhas, o dap e a largura das copas (Lc).

$$\text{Ln Energia} = \beta_0 + \beta_1 \cdot \text{Ln dap} + \beta_2 \cdot \text{Ln Lc} + \varepsilon \quad (\text{eq. 10})$$

Na Tabela 5 estão apresentadas as equações obtidas para a estimativa de energia em cada parte da árvore, bem como as estatísticas para os ajuste e validação.

Tabela 5 – Parâmetros das equações ajustadas para cada parte de árvore, juntamente com as estatísticas do ajuste e da validação das equações.

Variável dependente	Modelo Utilizado	Variáveis independentes	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	Ajuste					Validação		
								R ² aj	CV (%)	F	p	r _{ŷy}	RMSE (%)	r _{ŷy}	RMSE (%)
Energia na madeira (kJ)	1	dap	0,1799 ^{n.s.}	2,7098	-	-	-	0,9818	0,8890	2106,4	< 0,05	0,9899	6,46	0,9961	4,26
	2	dap e Ht (*)	-1,8450	2,1350	1,1029	-	-	0,9866	0,7632	1436,2	< 0,05	0,9955	4,18	0,99f88	2,35
	3	dap, Ht e Tc	-2,0013	2,2794	1,0561	-0,0644	-	0,9878	0,7279	1054,2	< 0,05	0,9961	3,84	0,9975	3,44
	4	dap, Ht, Tc e Lc	-2,3969	2,0653	1,3285	-0,0822	0,1337 ^{n.s.}	0,9887	0,7020	851,1	< 0,05	0,9957	4,08	0,9969	3,99
Energia na casca (kJ)	1	dap	-1,7969	2,5019	-	-	-	0,9189	2,7091	442,6	< 0,05	0,9514	13,32	0,9756	9,72
	2	dap e Ht (*)	-4,2731	1,7990	1,3487	-	-	0,9253	2,5987	242,7	< 0,05	0,9598	12,20	0,9699	10,84
	3	dap, Ht e Tc	-4,4421	1,9552	1,2980 ^{n.s.}	-0,0696 ^{n.s.}	-	0,9253	2,5993	162,0	< 0,05	0,9593	12,27	0,9716	10,72
	4	dap, Ht, Tc e Lc	-4,8322	1,7441	1,5666 ^{n.s.}	-0,0872 ^{n.s.}	0,1318 ^{n.s.}	0,9244	2,6141	120,3	< 0,05	0,9570	12,60	0,9691	11,34
Energia nos galhos (kJ)	1	dap	-4,7076	3,1796	-	-	-	0,8710	5,7243	264,3	< 0,05	0,9050	27,12	0,8727	30,52
	2	dap e Ht (*)	1,1558 ^{n.s.}	4,8439	-3,1936	-	-	0,8961	5,1374	169,2	< 0,05	0,9325	22,41	0,8756	30,19
	3	dap, Ht e Tc	1,2242 ^{n.s.}	4,7807	-3,1731	0,0282 ^{n.s.}	-	0,8934	5,2035	109,9	< 0,05	0,9338	22,19	0,8714	30,66
	4	dap, Ht, Tc e Lc	-0,6458 ^{n.s.}	3,7687	-1,8856 ^{n.s.}	-0,0561 ^{n.s.}	0,6318	0,9077	4,8414	96,9	< 0,05	0,9529	18,88	0,9023	27,00
	5	dap e Lc (*)	-3,6927	2,5565	0,7905	-	-	0,9039	4,9411	184,4	< 0,05	0,9481	20,26	0,8866	29,09
Energia nas folhas (kJ)	1	dap	-4,2118	2,9434	-	-	-	0,9157	4,3317	424,8	< 0,05	0,9653	13,83	0,9780	11,07
	2	dap e Ht (*)	-3,1779	3,2368	-0,5631 ^{n.s.}	-	-	0,9145	4,3621	209,7	< 0,05	0,9656	13,62	0,9768	11,32
	3	dap, Ht e Tc	-3,2413	3,2954	-0,5822 ^{n.s.}	-0,0261 ^{n.s.}	-	0,9124	4,4171	136,4	< 0,05	0,9645	13,85	0,9764	11,46
	4	dap, Ht, Tc e Lc	-4,3966	2,6702	0,2133 ^{n.s.}	-0,0782 ^{n.s.}	0,3903	0,9180	4,2731	110,2	< 0,05	0,9712	12,54	0,9760	12,08
	5	dap e Lc (*)	-3,8016	2,6915	0,3195	-	-	0,9207	4,2012	227,5	< 0,05	0,9722	12,28	0,9776	11,36
Energia total (kJ)	1	dap	0,2934 ^{n.s.}	2,7133	-	-	-	0,9839	0,8222	2390,0	< 0,05	0,9922	5,69	0,9972	3,62
	2	dap e Ht (*)	-1,5070	2,2023	0,9806	-	-	0,9877	0,7204	1563,0	< 0,05	0,9965	3,69	0,9991	2,08
	3	dap, Ht e Tc	-1,6584	2,3421	0,9352	-0,0624	-	0,9888	0,6862	1150,1	< 0,05	0,9968	3,49	0,9984	2,91
	4	dap, Ht, Tc e Lc	-2,0994	2,1035	1,2389	-0,0823	0,1490	0,9900	0,6492	964,9	< 0,05	0,9965	3,68	0,9978	3,57

Em que: dap é Diâmetro a altura do peito; Ht é altura total; Hc é altura de copa e Lc é largura de copa.

Na Figura 4 estão apresentados os gráficos de resíduos para o ajuste e a validação das equações.

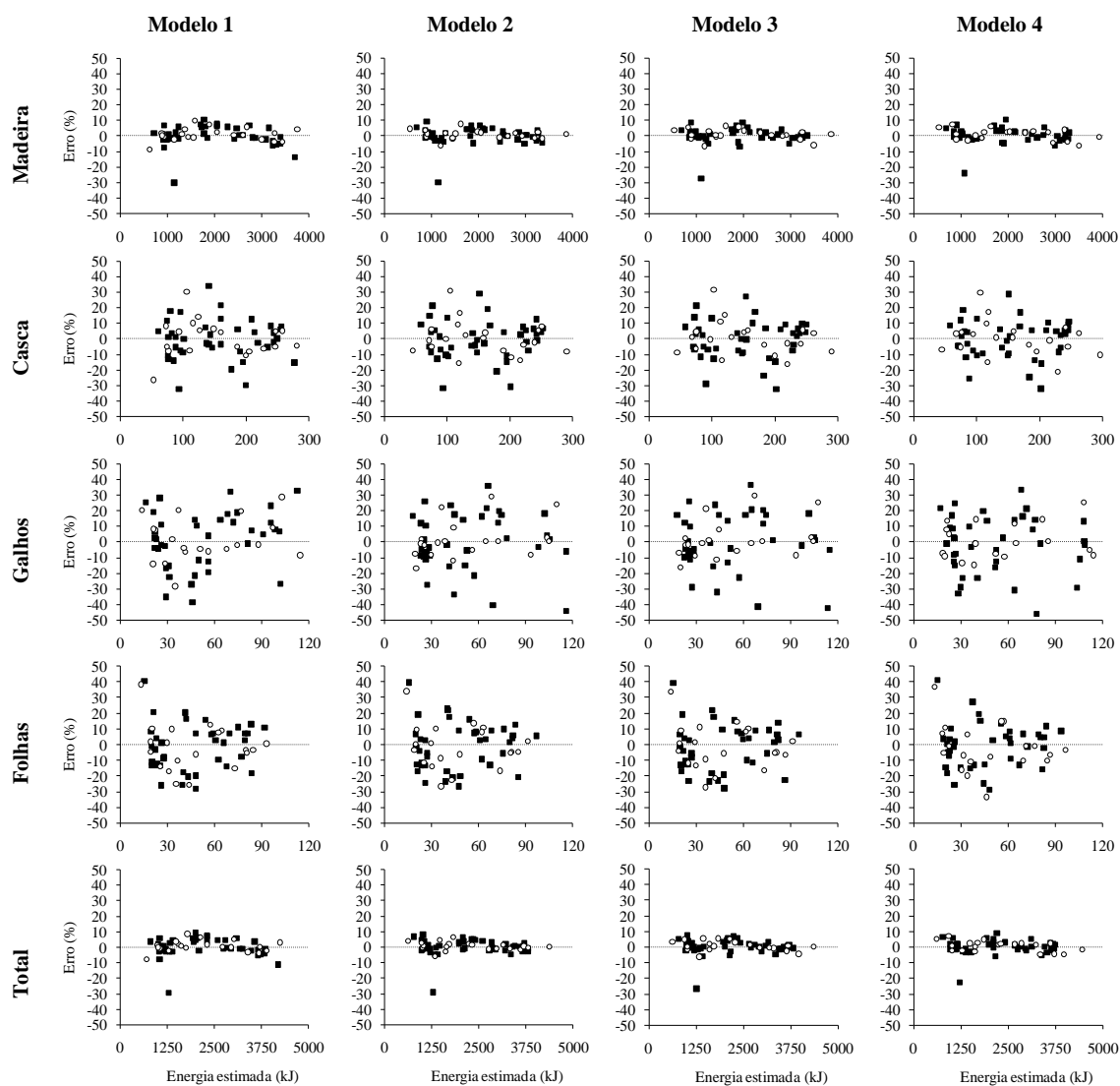


Figura 4 - Gráficos de resíduos percentuais obtidos no ajuste (quadrados preenchidos) e na validação (pontos não preenchidos).

Na Figura 5 estão apresentados os gráfico de resíduo para a equação 5.

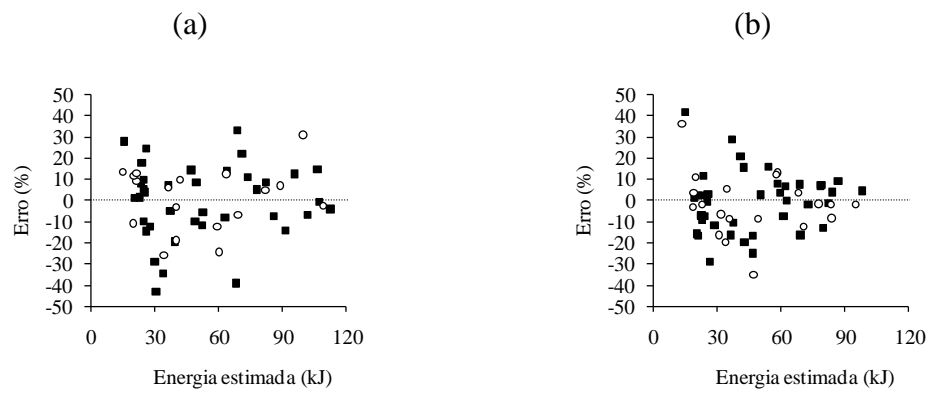


Figura 5 - Estimavas resultantes dos ajustes do modelo 5 para galhos (a) e folhas (b).

4. DISCUSSÕES

A madeira é responsável pela maior parte da energia estocada na árvore, sendo que esse fato já era esperado uma vez que a madeira representa a maior fração da árvore (Figura 3). Entretanto, cerca de 6,35 % da energia estocada pela árvore não é utilizada e é considerada resíduo, pois os galhos, folhas, parte da casca (25,7% da casca é perdida durante o processo) e as ponteira (0,35% da biomassa), conforme foi determinado no capítulo 1, são deixados no campo ou se perdem durante o transporte. Isso pode representar $134 \text{ MJ.árvore}^{-1}$, e quando se pensa para um povoamento esse valor se torna bastante expressivo, ou seja, $179.210 \text{ MJ.ha}^{-1}$. Dessa forma, percebe-se que o material considerado como resíduo apresenta potencial para produção de energia.

De maneira geral, observa-se que os cinco modelos utilizados apresentaram ajuste adequado, com estatísticas de precisão satisfatórias (Tabela 5) e distribuição de resíduos adequados.

Pesquisas com modelos alométricos vêm sendo desenvolvidas para estimativas de volume, biomassa e estoque de carbono em árvores, e as estimativas obtidas apresentam precisão semelhante às encontradas no presente estudo. Amaro (2010) utilizando o modelo de Schumacher e Hall (1933) com as variáveis d_{ap} e H_t obteve um R^2 ajustado de 0,95 para biomassa, R^2 ajustado de 0,97 para volume e R^2 ajustado de 0,95 para carbono, ao avaliar um fragmento florestal de Mata Atlântica. Brianezi et al. (2013), também utilizaram o modelo de Schumacher e Hall e obtiveram R^2 ajustado de 0,82 para estimativa de carbono total e carbono nos galhos de árvores em áreas urbanas. Basuki et al. (2009) obtiveram R^2 ajustado acima de 0,97 para uma floresta de Dipterocarp na Indonésia.

O erro apresentou comportamento homocedástico para todas as equações estimadas, e para a energia na madeira e energia total os resíduos estão mais uniformemente distribuídos e com menor amplitude (± 10) do que para a energia na casca, galhos e folhas (amplitude de ± 40) (Figuras 4 e 5).

Soares et al. (2005) verificaram que não houve tendência na estimação dos estoques de carbono dos plantios de eucalipto, verificando-se exatidão entre os valores observados e estimados, pela amplitude dos resíduos percentuais.

Destaca-se que nesse trabalho, a amostragem foi realizada com a frequência de árvores em cada classe de diâmetro distribuída de forma homogênea, o que confere maior poder de estimação da equação (CAMPOS e LEITE, 2013).

No trabalho desenvolvido por Brianezi et al. (2013), a frequência de amostragem não foi a mesma para todas as classes de diâmetro, foi amostrado um número maior de árvores nas classes de menor diâmetro, e os autores afirmam que isso pode ter contribuído para a menor precisão dos ajustes.

A validação é uma etapa fundamental na modelagem alométrica, onde se aplicam as equações a dados independentes daqueles utilizados nos ajustes das equações (CASTRO et al., 2013).

A validação procedeu-se aplicando as equações ajustadas à base de dados com 20 árvores que não fizeram parte dos dados de ajuste da equação (dados independentes), selecionadas aleatoriamente da base de dados original.

Os dados de validação apresentaram estatísticas de precisão bem semelhantes aos encontrados no ajuste (Tabela 5). Assumindo os desvios encontrados, todos os modelos foram capazes de estimar adequadamente o estoque de energia nas árvores.

Verifica-se que a inclusão das variáveis independentes largura de copa (L_c) e altura de copa (H_c) proporcionaram melhorias nas estatísticas das equações ajustadas (Tabela 5). Entretanto, essa melhoria foi pequena e não justifica a sua utilização para determinação da energia da madeira, na casca e energia total, uma vez que não são tão fáceis de serem obtidas, e podem ocasionar em erros na sua obtenção.

A variável largura de copa é uma informação muito importante para a determinação de galhos e folhas, pois está diretamente relacionada com a quantidade desses componentes. A importância dessa variável foi comprovada com a sua significância no modelo 4, sendo portanto ajustado o modelo 5, com as variáveis d_{ap} e L_c para galhos e folhas.

Dessa forma, para a energia na madeira, na casca e a energia total foram selecionadas as equações com as variáveis independentes dap e Ht, uma vez que apresentaram um bom ajuste e utilizam somente duas variáveis. Para a energia estocada nos galhos e nas folhas foram selecionadas as equações com as variáveis dap e altura e dap e largura da copa.

$$\text{Energia na Madeira (kJ)} = e^{(-1,8450+2,1350\text{Ln dap}+1,1029\text{Ln Ht})} \quad (\text{eq. 11})$$

$$\text{Energia na Casca (kJ)} = e^{(-4,2731+1,7990\text{Ln dap}+1,3487\text{Ln Ht})} \quad (\text{eq. 12})$$

$$\text{Energia nos Galhos (kJ)} = e^{(-3,6927+2,5565\text{Ln dap}+0,7905\text{Ln Lc})} \quad (\text{eq. 13})$$

$$\text{Energia nas Folhas (kJ)} = e^{(-3,8016+2,6915\text{Ln dap}+0,3195\text{Ln Lc})} \quad (\text{eq. 14})$$

$$\text{Energia Total (kJ)} = e^{(-1,5070+2,2023\text{Ln dap}+0,9806\text{Ln Ht})} \quad (\text{eq. 15})$$

Em que: dap é Diâmetro a altura do peito; Ht é altura total e Lc é largura de copa.

5. CONCLUSÕES

Pode-se concluir que as equações selecionadas são adequadas para a estimativa de estoque de energia nas árvores de Eucalyptus.

Os modelos derivados de Schumacher e Hall estimaram o estoque de energia total, na madeira e na casca de forma adequada utilizando como variáveis independentes o dap e Ht das árvores e para a estimativa da energia estocada nas folhas e galhos, a equação que utiliza apenas as variáveis dap e Lc.

6. AGRADECIMENTOS

Ao Programa de P&D regulado pela ANEEL, a ArcelorMittal Bioflorestas e CEMIG pelo financiamento e parceria no projeto. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao CNPq pela bolsa produtividade e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pelo apoio financeiro e pela concessão de bolsa.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMARO, M. A. **Quantificação do estoque volumétrico, de biomassa e de carbono em uma Floresta Estacional Semidecidual no município de Viçosa, MG.** 2010. 168f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8633:** carvão vegetal: determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro, 8 p, 1984.
- BASUKI, T. M.; VAN LAAKE, P. E.; SKIDMORE, A. K.; HUSSIN, Y. A. Allometric equations for estimating the above-ground biomass in tropical lowland Dipterocarp forests. **Forest Ecology and Management**, v. 257, n. 8, p. 1684–1694, 2009.
- BINOTI, M.L.M. da S. **Emprego de redes neurais artificiais em mensuração e manejo florestal.** 2012. 130 f. Dissertação (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2012.
- BRIANEZI, D.; JACOVINE, L. A. G.; SOARES, C. P. B.; CASTRO, R. V. O.; BASSO, V. M. Equações alométricas para estimativa de carbono em árvores de uma área urbana em Viçosa – MG. **Revista Árvore**, v.37, n.6, p.1073-1081, 2013.
- CAMPOS, J.C.C.; LEITE, H.G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas.** 4.ed., Viçosa: Editora UFV, 605 p, 2013.
- CASTRO, R. V. O.; SOARES, C. P. B.; MARTINS, F. B.; LEITE, H. G. Crescimento e produção de eucalipto estimado por duas categorias de modelos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.48, n.3, p.287-295, 2013.
- GUJARATI, D. N.; PORTER, D. C. **Econometria básica.** 5 ed., Nova York, AMGH Editora, 924 p, 2011.
- KETTERINGS, Q. M.; COE, R.; NOORDWIJK, M.; AMBAGAU, Y.; PALM, C. A. Reducing uncertainty in the use of allometric biomass equations for predicting above-ground tree biomass in mixed secondary forests. **Forest Ecology and Management**, v. 146, p. 199-209, 2001.
- MEHTÄTALO, L.; MALTAMO, M.; KANGAS, A. The use of quantile trees in the prediction of the diameter distribution of a stand. **Silva Fennica**. v.40, n.3, p.501-516, 2006.

- MULLER, M. D.; COUTO, L.; NEVES, J. C. L. Produção de biomassa e balanço nutricional de plantações de eucalipto clonal em diferentes densidades de plantio no município de Itamarandiba – MG. **Biomassa & Energia**, v. 2, n. 2, p. 91-101, 2005.
- MUTURI, M. M.; KARIUKI, J. G.; POORTER, L.; MOHREN, G. M. J. Allometric equations for estimating biomass in naturally established *Prosopis* stands in Kenya. **Journal of Horticulture and Forestry**, v. 4, n. 2, p. 69-77, 2011.
- 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**, v. 31, n. 66, p. 113-122, 2011.
- 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.
- SCHUMACHER, F. X.; HALL, F. D. S. Logarithmic expression of timber-tree volume. **Journal Agricultural Research**, v.47, n.9, p.719-734, 1933.
- SIIPILEHTO, J. A comparison of two parameter prediction methods for stand structure in Finland. **Silva Fennica**, v. 34, n. 4, p.331-349, 2000.
- SILVA, J. V.; NOGUEIRA, G. S.; SANTANA, R. C.; LEITE, H. G.; OLIVEIRA, M. L. R.; ALMADO, R. P. Produção e acúmulo de nutrientes em povoamento de eucalipto em consequência da intensidade do desbaste e da fertilização. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.47, n.11, p.1555-1562, 2012.
- SOARES, C. P. B.; LEITE, H. G.; GORGENS, E. B. Equações para estimar o estoque de carbono no fuste de árvores individuais e em plantios comerciais de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, v.29, n.5, p.711-718, 2005.
- SOARES, C.P.B.; NETO, F.P.; SOUZA, A.L. **Dendrometria e Inventário Florestal**. 2 ed. Viçosa: Editora UFV. 272 p, 2011.
- SOUZA, M. M., SILVA, D. A., ROCHADELLI, R., SANTOS, R. C. Estimativa de poder calorífico e caracterização para uso energético de resíduo da colheita e do processamento de *Pinus taeda*. **Floresta**, v. 42, n. 2, p. 325 - 334, 2012.
- VALE, A. T.; GENTIL, L.V. Produção e uso energético de biomassa e resíduos a agroflorestais. In: OLIVEIRA, J. T. S.; FIEDLER, N. C.; NOGUEIRA, M. (Ed.). **Tecnologias aplicadas ao setor madeireiro III**. Jerônimo Monteiro – ES: 2008. p. 196-246, 2008.
- VITAL, B. R. **Métodos de determinação de densidade da madeira**. Viçosa, MG: SIF, 21p, (Boletim Técnico, 1), 1984.

CAPÍTULO IV

COGERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DOS GASES DA CARBONIZAÇÃO E BIOMASSA FLORESTAL USANDO MICROTURBINA

RESUMO – Este trabalho teve como objetivo avaliar um sistema de cogeração de energia elétrica a partir da queima dos gases da carbonização utilizando um turbina à gás de combustão externa. Foi desenvolvida uma planta de cogeração de energia com 12 fornos de carbonização retangulares, acoplados a um sistema de dutos que transportam os gases até o queimador; o queimador dos gases, por sua vez está ligado a um trocador de calor e a turbina Turbec 100. Foi construído um sistema de injeção de biomassa como combustível auxiliar, para ser utilizado quando a temperatura do queimador não fosse alta suficiente para manter o funcionamento do sistema de cogeração. Verificou-se que a planta de cogeração foi capaz de gerar energia a partir da queima dos gases, entretanto para produzir energia suficiente para suprir a demanda da planta seria necessário utilizar uma turbina com maior potência e acoplar um maior número de fornos para que a geração de energia por esse sistema de cogeração seja maior do que o gasto, tornando o sistema viável.

Palavras-Chave: Turbina a gás de combustão externa; fornos retangulares, combustíveis renováveis.

CHAPTER IV

ENERGY COGENERATION FROM FOREST BIOMASS AND CARBONIZATION GAS USING MICROTURBINE

ABSTRACT - These findings emphasize the need to develop more efficient power generation and low emissions systems. Thus, the energy cogeneration is an alternative that has gained prominence. The use of gas turbines has been improved, since the working fluid is hot air and can be used with low quality biofuel. Thus, this study aimed to evaluate a power cogeneration system from the burning of the carbonization gases using a turbine external combustion gas. A power cogeneration plant with 12 rectangular carbonization furnaces, coupled to a system of ducts that carry the gas to the burner was developed; the burner gases is connected to a heat exchanger and the turbine Turbec100. A biomass injection system was constructed as auxiliary fuel to be used when the temperature of the burner was not high enough to maintain the operation of the cogeneration system. It was found that the cogeneration plant was able to generate energy from the burning of carbonization gas, however to produce sufficient power to supply the demand of the plant would be necessary to use a turbine coupled with more power and a larger number of furnaces for the generation by this cogeneration power system is greater than the expense, making the system viable.

Keywords: Turbine external combustion gas; rectangular furnaces, renewable fuels.

1. INTRODUÇÃO

O aumento na demanda de energia, somado à preocupação com o aquecimento global, devido à emissão de gases de efeito estufa, evidenciam a necessidade de desenvolver novos e eficientes sistemas de geração de energia com baixa ou nenhuma emissão de CO₂ (ANHEDEN, 2000).

A produção de carvão vegetal é uma atividade de grande importância para o Brasil, em especial para o estado de Minas Gerais, que detém o maior parque siderúrgico a carvão vegetal do mundo e tem se destacado como o maior produtor e consumidor desse insumo energético (CARDOSO et al., 2010). Os gases da carbonização são combustíveis ricos em carbono e hidrogênio que, sob condições adequadas de temperatura e pressão, são capazes de, na presença de oxigênio, sofrer reações químicas, liberando energia sob a forma de luz e calor (CARDOSO et al., 2010).

Uma alternativa para aumentar a produção de energia a partir de combustíveis renováveis é a cogeração que pode ser definida como a produção de duas ou mais formas de energia a partir de um único combustível, e se apresenta como uma opção para o aproveitamento dos gases da carbonização e dos resíduos florestais para geração de energia limpa de forma sustentável. A racionalidade da cogeração reside, essencialmente, na economia de recursos energéticos frente a uma configuração convencional que produza as mesmas quantidades de calor útil e trabalho (BARJA, 2006).

A utilização de turbinas a gás é uma alternativa que vem sendo aprimorada e estudada que, em princípio, aplicam como fluido de trabalho o ar a alta temperatura substituindo os gases de combustão. Estes sistemas são conhecidos como turbinas a gás de queima externa ou turbinas a ar quente (Externally Fired Gas Turbine –

EFGT ou Hot Air Gas Turbine – HAGT). O ar, enquanto fluido de trabalho, é aquecido mediante a troca de calor, à alta temperatura, com os gases de combustão produzidos, principalmente, a partir da queima de biomassa em uma fornalha, ou da queima dos gases da carbonização.

O ciclo EFGT apresenta as vantagens de turbinas a gás, custos operacionais baixos, elevada vida útil e confiabilidade, relativamente elevada eficiência energética, mesmo em tamanho pequeno e a capacidade de utilizar biocombustível de baixa qualidade (PANTALEO et al., 2013). Apesar de ser uma tecnologia relativamente nova, as microturbinas já são disponíveis para comercialização por diferentes indústrias como Capstone, Honeywell, Elliot, Turbec, etc. (COCCO et al., 2006).

Sendo assim, esse trabalho teve como objetivo principal avaliar o desempenho de um sistema de cogeração de energia a partir da queima dos gases da carbonização, por meio de uma turbina a gás de combustão externa, para produção de energia elétrica e como objetivo específico quantificar o consumo de biomassa florestal para iniciar o processo de queima dos gases da carbonização.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O presente estudo foi desenvolvido na Unidade de Produção de Energia (UPE) da empresa ArcelorMittal BioFlorestas, unidade Buritis, localizada no município de Martinho Campos – MG. O clima da região é do tipo Cwa, segundo a classificação de Köppen, caracterizado por verões úmidos e invernos secos, com temperatura média anual entre 19,8 e 25,3°C, e precipitação média anual de 1.400 mm (SILVA et al., 2012).

Foi desenvolvido um sistema de cogeração de energia na empresa ArcelorMittal BioFlorestas, em parceria com a Companhia Energética de Minas Gerais S.A. (CEMIG), com o objetivo de aproveitar os gases da carbonização em uma unidade de produção de carvão vegetal (UPE) para a geração de energia elétrica. Esse sistema é composto por uma UPE contendo 12 fornos retangulares com capacidade volumétrica de 240 st cada, com as chaminés conectadas a dutos que transportam os gases da carbonização até um queimador, que envia os gases combustos até um trocador de calor que por diferença de pressão move uma turbina a gás de combustão externa (Figura 1).

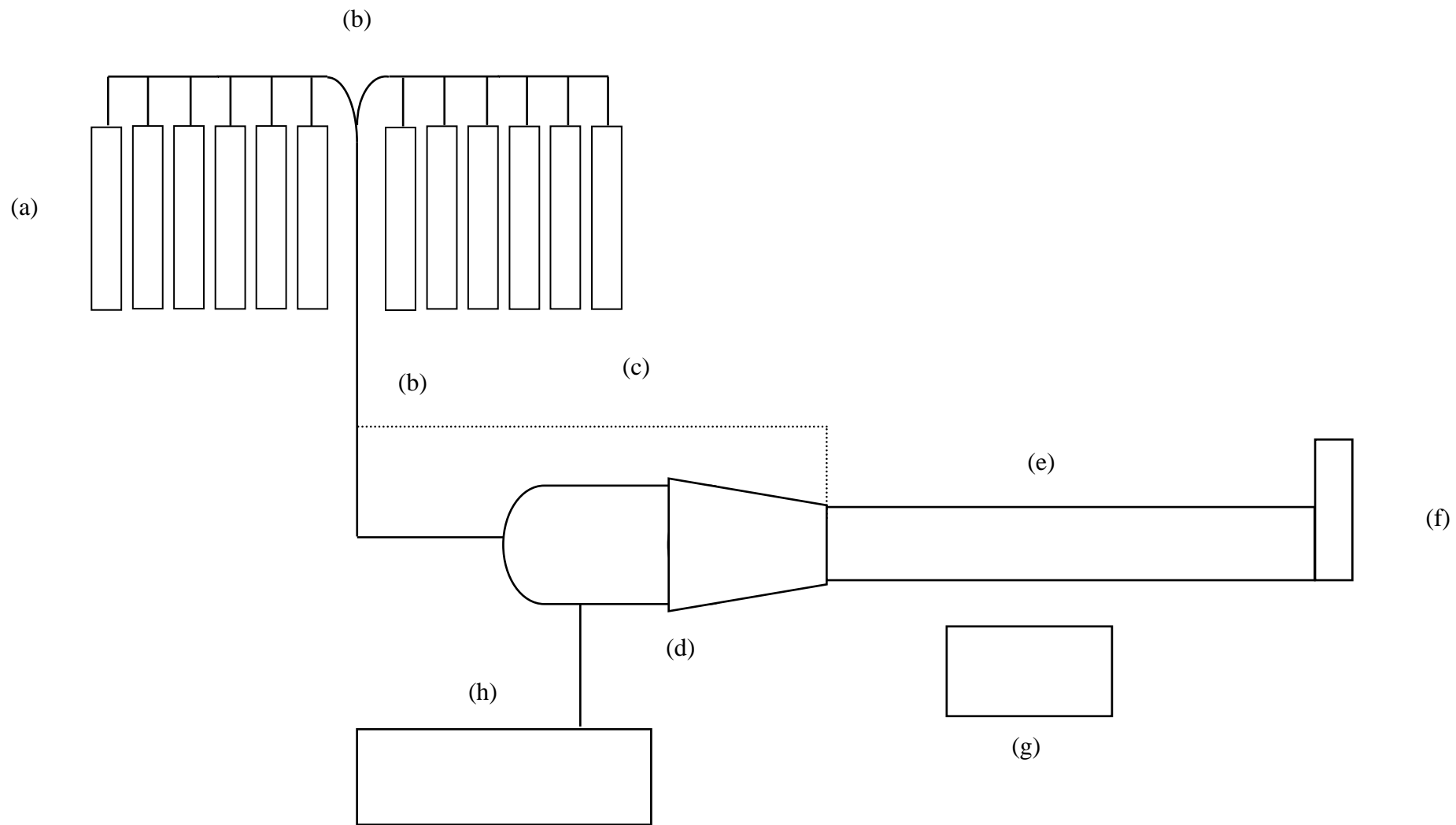


Figura 1 – Fornos de carbonização (a); sistema de transporte dos gases da carbonização (b); transporte do gás de traço (c); queimador dos gases da carbonização (d); trocador de calor (e); exaustor dos gases da carbonização (f); turbina a gás de combustão externa (g); queimador de biomassa (h).

2.1. Descrição do sistema de transporte de gases

O sistema de transporte de gases é composto por tubulações de aço carbono, com diâmetro de 530 mm que coletam os gases da carbonização dos doze fornos e os conduzem até o queimador. Para evitar a condensação de alcatrão nessas tubulações, construiu-se outra tubulação externa, com diâmetro de 880 mm, que circunda e aquece a tubulação interna, pela passagem de parte dos gases oriundos da combustão no queimador. Estes gases foram denominados “gás de traço” e são conduzidos no sentido inverso ao dos gases da carbonização, até atingir as extremidades do sistema de transporte de gases onde são expelidos. A condução desses gases é realizada por exautores.

A exaustão dos gases da carbonização é realizada na porção superior da chaminé de cada forno. Para efetuar o controle de vazão desses gases foi instalado um sistema de válvulas, tipo borboleta, que fecham parcialmente a tubulação com apenas $\frac{1}{4}$ de volta. No topo de cada chaminé existe uma válvula de controle manual que, quando fechada parcialmente, permite que os gases da carbonização sejam desviados da chaminé para a tubulação de coleta. Há também uma segunda válvula controlada por computador que permite a passagem dos gases da carbonização de cada chaminé até a tubulação principal.

A rede de dutos de transporte dos gases foi concebida de modo a formar uma bifurcação, tendo seis fornos acoplados a direita e seis a esquerda. A cada dois fornos as tubulações se juntam e direcionam os gases para o duto secundário, que depois são direcionados para um único duto central, que conduz os gases até o queimador. Essa configuração foi utilizada para reduzir o comprimento das linhas de transferência de gases e evitar condensações e perdas térmicas. Entretanto, as tubulações já são muito extensas, considerando que dos últimos fornos o gás percorre a distância de 166,2 m.

2.2. Descrição do sistema de injeção de biomassa como combustível auxiliar

Inicialmente, propôs-se a utilização dos resíduos da colheita para geração de energia em um sistema de cogeração, entretanto esse material ainda não está sendo utilizado pela empresa por questão de logística, pois ainda está sendo estudada a melhor maneira de transportar esse material até a planta de cogeração. Assim, a matéria prima utilizada para a geração de energia foi madeira com aproximadamente 30% de umidade e diâmetros variando de 10 a 15 cm, que foram processadas na

forma de cavacos, utilizando um picador elétrico. A utilização do sistema de injeção de biomassa é fundamental no processo de cogeração, no momento em que os gases da carbonização não possuem poder calorífico suficiente para manter a combustão, contribuindo com o aumento da temperatura no queimador dos gases. Além disso, eventualmente durante o funcionamento do sistema de cogeração de energia pode-se fazer necessário o uso desse sistema de combustível auxiliar caso ocorra alguma variação no poder calorífico dos gases da carbonização.

O sistema de injeção de biomassa é composto por uma esteira que transporta as toras de madeira até o picador, que transforma a madeira em cavacos sendo utilizados aqueles que passam por uma peneira com malha de 42 mm, e depois os cavacos com dimensões maiores são passados novamente pelo picador. Os cavacos são armazenados em um silo principal e depois são transportados por uma correia até um silo menor, acoplado ao queimador de biomassa que é composto, além do silo de armazenamento conjugado, por uma câmara de combustão. Os cavacos são transportados do silo até a câmara por meio de uma rosca-sem-fim. A câmara de combustão possui sistema de ventilação forçada e entradas de ar secundárias.

2.3. Descrição do queimador de gases - fornalha

De modo geral, para melhor entendimento do processo de carbonização e, conseqüentemente, da queima dos gases pode-se separar o processo nas seguintes fases (COSTA, 2012):

- Fase A: até 200°C, predomina o fenômeno de secagem da madeira, com liberação de vapor d'água, ácido acético, ácido fórmico, glioxial e traços de CO₂.

- Fase B: entre 200°C e 280°C, são liberados os mesmos gases da fase A, com moderação na quantidade de vapor d'água e aparecimento de CO. Até esta fase as reações são de natureza endotérmica.

- Fase C: entre 280°C e 500°C, as reações passam a ser exotérmicas. Há liberação de CO, CH₄, formaldeído, ácido fórmico, ácido acético, metanol, H₂ e alcatrões, também ocorrem reações de pirólise secundária entre os produtos da pirólise primária e o carvão formado.

-Fase D: a partir de 500°C, ocorrem reações secundárias catalisadas pelo leito do carvão, como a reação entre H₂O e o CO₂ formando CO, H₂ e formaldeído.

Portanto, a quantidade e qualidade dos gases da carbonização dependem da fase em que se encontra o processo. Por isso é importante que mais de um forno esteja operando ao mesmo tempo para que se consiga obter gases com maior poder calorífico o maior tempo possível para manter o queimador funcionando.

O queimador dos gases da carbonização utilizado neste trabalho possui uma câmara de combustão cilíndrica com 38 m³ de volume útil, sendo que o revestimento externo é metálico e internamente é composto por tijolo refratário no piso e Unifrax - Módulo de Fibra Cerâmica nas paredes.

Para iniciar a queima dos gases da carbonização, o queimador precisa estar pré-aquecido a uma temperatura próxima de 600°C. A partir daí inicia-se o de aquecimento da tubulação de transporte de gases, quando atinge temperaturas acima de 120°C inicia-se o transporte dos gases da carbonização. O processo de transporte dos gases da carbonização se dá início em um forno que já apresenta gases na chaminé com temperatura acima de 140°C, o que indica presença de gases combustíveis, que ao entrar no queimador (acima de 600°C), entra em combustão, e consegue manter a queima sem a ajuda do queimador de biomassa. Para manter a continuidade na queima dos gases da carbonização, sem o uso de biomassa, é necessário que os fornos estejam em diferentes etapas da carbonização.

Após a combustão dos gases da carbonização, obtém-se o gás combusto que é direcionado para o trocador de calor através de um exaustor, e parte desse gás é direcionado para a chaminé e para a tubulação do gás de traço que envolve os dutos que transportam os gases da carbonização até o queimador, de modo a evitar a condensação desses na tubulação.

2.4. Descrição da turbina

Os gases combustos do queimador são transportados até o trocador de calor por um exaustor principal. O gás combusto sai do queimador com temperatura acima de 900°C, entretanto antes de chegar ao trocador de calor a temperatura é reduzida para que chegue com temperatura próxima ao ideal no trocador de calor entre 850°C e 900°C. Três válvulas são responsáveis por regular a temperatura do gás combusto depois de passar pelo trocador de calor para que ele chegue até a turbina com a temperatura próxima ao ideal que é inferior a 400°C ao ser lançado na atmosfera.

No interior das serpentinas do trocador de calor, passa o ar ambiente que é injetado por meio de compressores, e por fora passa o gás combusto proveniente do queimador de gases. Dessa forma, o ar ambiente que foi aquecido dentro das serpentinas se expande e entra na turbina com a temperatura aproximada de 700°C a 850°C (ideal é 850°C), com elevada velocidade, e aciona a turbina. O ar quente que passa pela turbina é expelido com temperatura aproximada de 300°C a 400°C, por uma tubulação que passa por cima do trocador de calor.

Para resfriar e pressurizar a turbina para manter o seu funcionamento normal, um exaustor succiona o ar ambiente para dentro do compartimento onde fica a turbina, o ar passa por esse espaço para evitar que o equipamento superaqueça e depois é expelido para o ambiente por outra tubulação.

O fluido quente (gás combusto) proveniente do queimador passa pelo trocador de calor e é expelido pelo exaustor principal. Nessa etapa foi importante o monitoramento da temperatura para que a mesma fosse inferior a 400°C para não danificar o equipamento, por isso, na parte final do trocador de calor, era injetado ar ambiente, de modo a diminuir a temperatura do ar que chegava ao exaustor.

A turbina utilizada nessa planta foi a Turbec 100, desenvolvida pela Turbec Spa (Itália). Vale salientar que essa foi desenvolvida para o clima de regiões frias, proporcionando maior expansão do ar ao entrar em contato com o ar quente, tendo portanto, maior eficiência do sistema. Ao ser adaptada para o Brasil, que apresenta clima mais quente, a diferença de temperatura foi menor, por consequência a expansão do ar foi menor, proporcionando menor geração de energia.

A turbina Turbec 100 foi utilizada também em outros trabalhos: Cocco et al. (2006), Kautz e Hansen (2007), De Mello e Monteiro (2012), Panteleo et al. (2013).

Na Tabela 1 estão apresentadas as especificações da turbina Turbec 100.

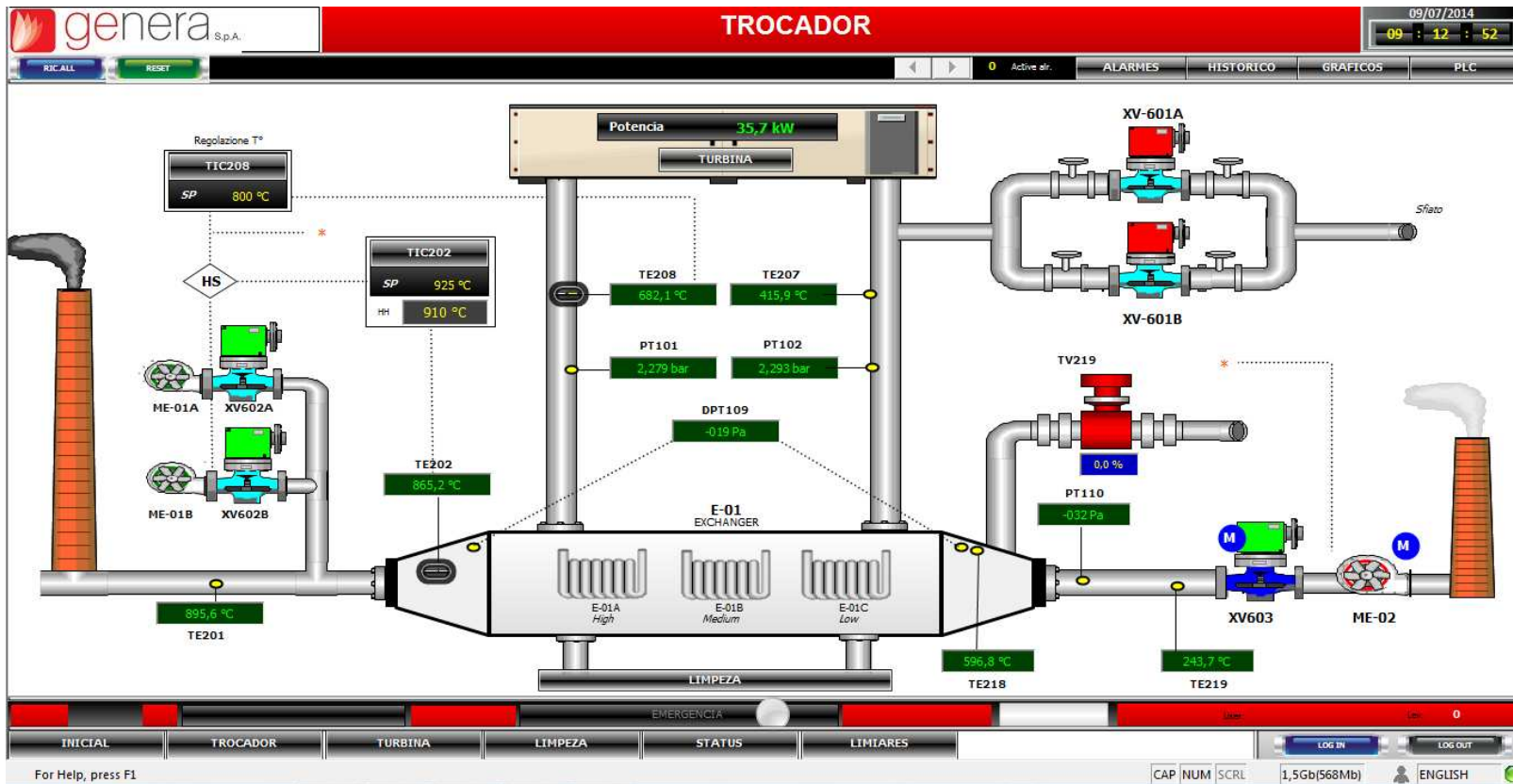
Tabela 1 – Informações técnicas da turbina Turbec 100

Característica	Parâmetro	Unidade
Marca	TURBEC	
Tensão nominal	400	VAC
Número de fases	3	
Frequência	50/60	Hz
Sincronização	Automática	
Variação de tensão de rede permitida	<+/-10%	
Distorção harmônica da rede permitida	<+/-5%	

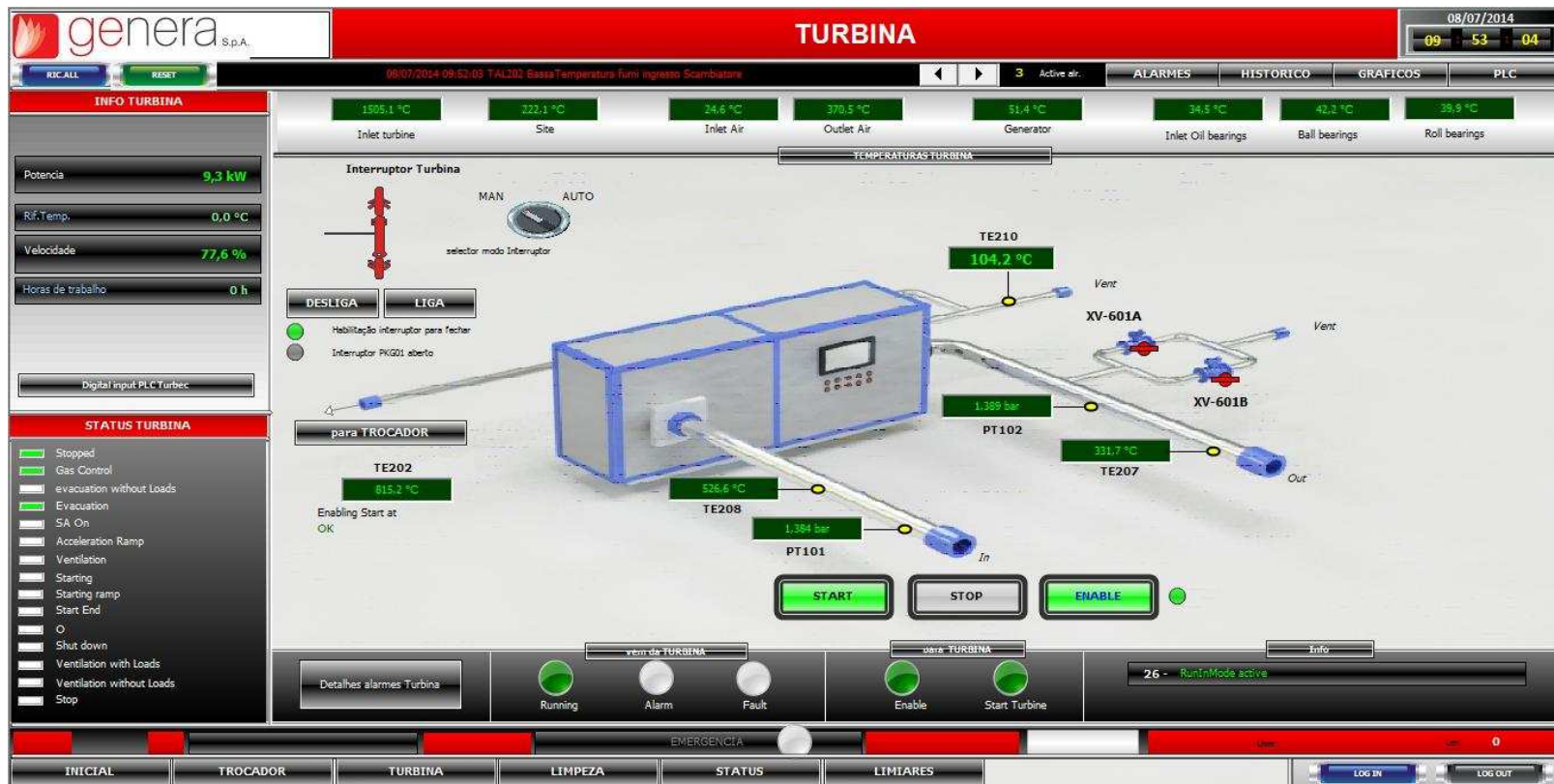
Potência nominal aparente	120	kVA
Potência nominal	0-100	kW
Velocidade de rotação	70000	g/1'
Fator de potência	+/- 0.8	
Corrente nominal	145	Arms
Potência de partida	15	kW pico

Fonte: Manual da turbina Turbec 100 fornecido pelo fabricante

A turbina e o trocador de calor possuem um sistema supervisorio para controle e verificacão dos parâmetros de funcionamento. Nas Figuras 2a e 2b estão apresentados os sistemas supervisorios GENERA do trocador de calor e da turbina, respectivamente.



(a)



(b)

Figura 2 – Sistema GENERA para supervisão do funcionamento do trocador de calor (a) e da turbina (b) em ambiente computacional

Na Tabela 2 estão apresentadas as legendas para identificação das siglas apresentadas na Figura 2a e 2b, para entendimento do sistema supervisório.

Tabela 2 – Descrição das informações contidas no sistema supervisório GENERA do trocador de calor e da turbina

Código	Parâmetro	Descrição
1	TE201	Temperatura de saída do ar na chaminé após a queima do gás - chaminé acoplada ao queimador de fumaça
2	TE202	Temperatura de entrada do gás combusto no trocador de calor
3	TIC208	Sistema de controle da temperatura de entrada do ar na turbina
4	TIC202	Sistema de controle da temperatura de entrada no trocador de calor - regula as válvulas de entrada de ar ambiente
5	DPT109	Diferença de pressão entre a entrada e a saída de ar no trocador de calor
6	PT101	Pressão de entrada de ar na turbina
7	TE208	Temperatura de entrada de ar na turbina
8	TE207	Temperatura de saída do ar comprimido da turbina
9	PT102	Pressão de saída do ar na turbina
10	TE218	Temperatura de saída do ar do trocador de calor
11	TE219	Temperatura do ar no exaustor que fica depois do trocador de calor
12	PT110	Pressão dentro do trocador de calor
13	TV219	Válvula que regula a entrada de ar para resfriar o ar depois do trocador de calor
14	XV-601 ^a	Válvula de segurança para alívio de pressão
15	XV-601B	Válvula de segurança para alívio de pressão
16	XV603	Válvula que regula a saída de ar no trocador de calor
17	ME-02	Exaustor de saída do trocador
18	ME-01 ^a	Ventilador de controle de temperatura do gás de entrada do trocador
19	ME-01B	Ventilador de controle de temperatura do gás de entrada do trocador
20	XV602A	Válvula pneumática para controle de temperatura de entrada no trocador
21	XV602B	Válvula pneumática para controle de temperatura de entrada no trocador
22	TE210	Temperatura do ar de saída da turbina (pressurizar e resfriar a turbina)

Fonte: Sistema Genera utilizado para controlar o funcionamento do trocador de calor e da turbina

2.5. Avaliação do sistema de cogeração

Para avaliação do sistema de cogeração, determinou-se alguns parâmetros sendo eles os seguintes:

- temperatura dos gases da carbonização; do gás de traço; no queimador dos gases da carbonização; do gás combusto no trocador de calor; temperatura de entrada e de saída do ar na turbina; de saída do ar no exaustor; pressão de entrada e saída do ar na turbina e dentro do trocador de calor.

Determinou-se, também, o consumo de energia pelo sistema de cogeração (no início da atividade) quando o sistema de injeção de biomassa estava em funcionamento e o consumo de energia quando o sistema estava gerando energia, utilizando um amperímetro. O consumo de biomassa pelo sistema de combustível auxiliar também foi determinado.

3. RESULTADOS

Na Tabela 3 estão apresentados os valores médios de temperatura obtidos nas diferentes partes do sistema de cogeração durante o funcionamento.

Tabela 3 – Temperaturas médias observadas em diferentes etapas do sistema de cogeração

Temperatura	Valores (°C)
Dos gases da carbonização na entrada do queimador	160 a 170
Do gás de traço	± 220
No queimador de gases da carbonização	900 a 1000
Do gás combusto no trocador de calor	850 a 900
Temperatura de entrada do ar na turbina	700 a 850
De saída do ar no exaustor	300 a 400
De saída do ar na turbina	300 a 400
Ar atmosférico	25 a 40

O controle das temperaturas no sistema é importante para que se possa manter o seu funcionamento adequado. Nesse sentido, existem em várias partes do sistema válvulas que controlam a entrada de ar, de modo a garantir a temperatura desejada em cada etapa. Por exemplo, a temperatura do gás combusto que sai no exaustor principal, após passar pelo trocador de calor e não deve ultrapassar os 400°C para não danificar o exaustor.

Na Figura 3 estão apresentadas as variações das temperaturas dos gases do queimador; trocador de calor e turbina em função do tempo.

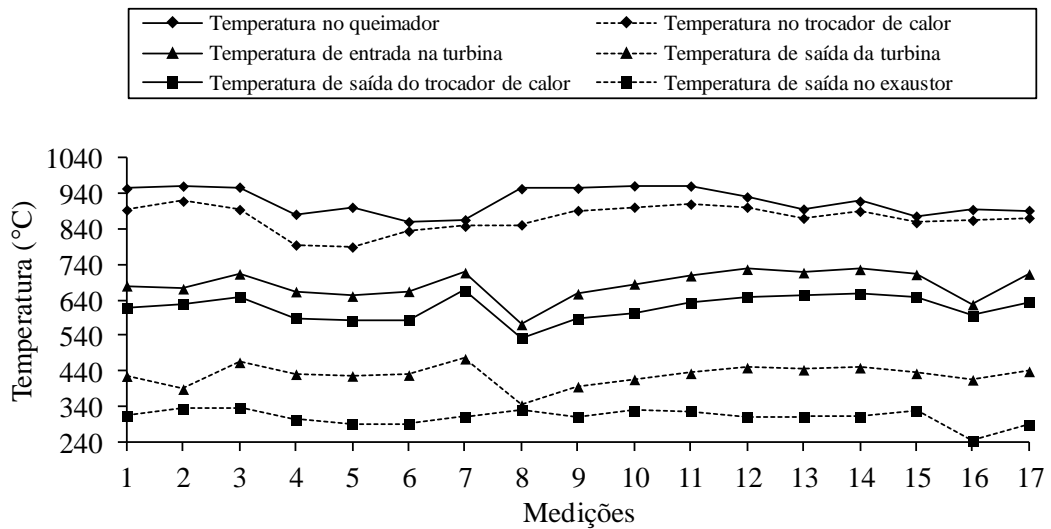


Figura 3 – Variação das temperaturas do sistema durante o funcionamento em diferentes dias de funcionamento.

Observa-se que existe considerável variação nas temperaturas, durante o funcionamento do sistema, o que possivelmente está relacionado com as variações nos gases da carbonização, uma vez que a produção de carvão vegetal não é um processo homogêneo.

Na Figura 4 é apresentada a variação da pressão nos diferentes pontos do sistema durante o seu funcionamento.

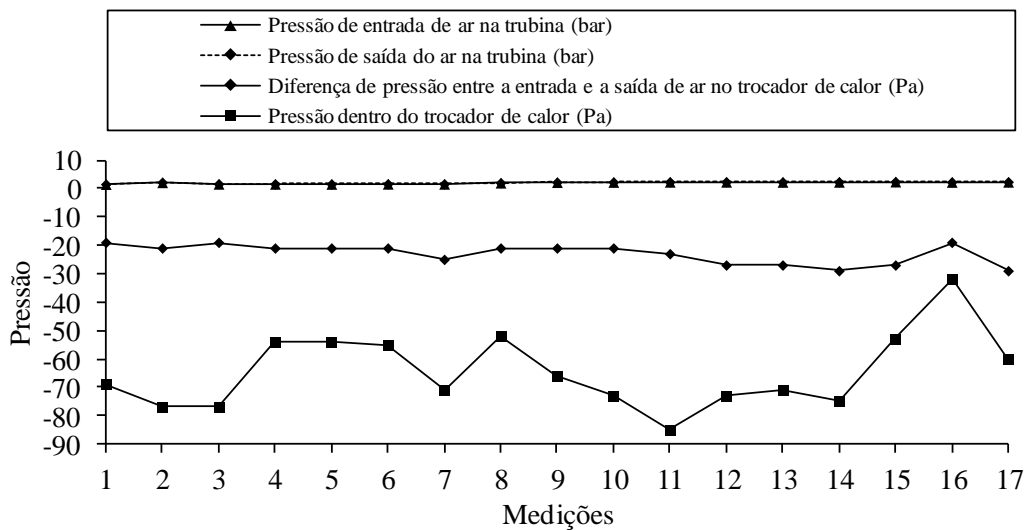


Figura 4 – Variação da pressão nos diferentes pontos do sistema durante o período de funcionamento.

As pressões de entrada e de saída da turbina se mantiveram praticamente constantes durante o funcionamento do sistema. Já a pressão dentro do trocador de calor e diferença de pressão entre a entrada e a saída de ar no trocador de calor tiveram variações ao longo dos dias, sendo no primeiro caso, mais acentuada.

A Figura 5 mostra a variação de potência gerada pelo sistema de cogeração durante o período de avaliação.

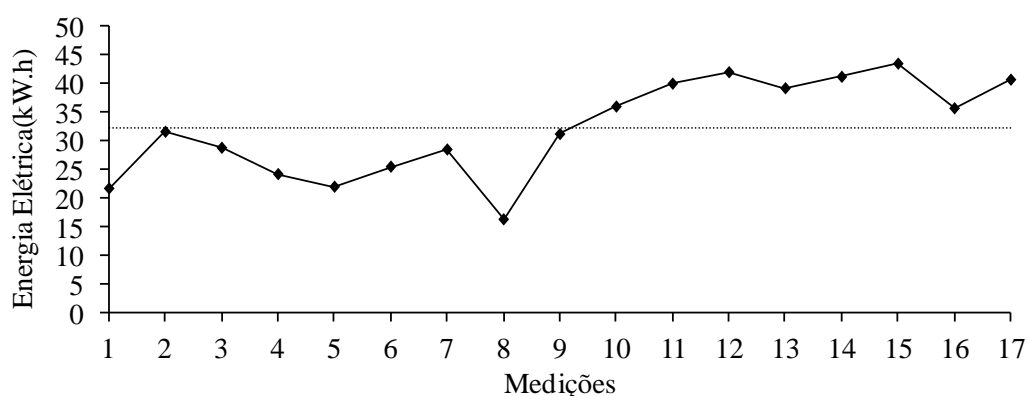


Figura 5 – Energia elétrica produzida durante o funcionamento do sistema de cogeração de energia.

A potência gerada pela turbina também apresentou variação, que está associada à variação da temperatura do ar que entra na turbina. Verifica-se que existe uma correlação positiva entre a potência gerada e a temperatura de entrada do ar quente na turbina, ou seja, quanto maior a temperatura do ar que entra na turbina, maior será a potência gerada (Tabela 4).

Tabela 4 – Correlação entre as diferentes temperaturas obtidas no sistema de cogeração e a potencia gerada pela turbina

Correlação das temperaturas (°C)	Potência gerada (kW)
No queimador	-0,08
No trocador de calor	0,49*
De entrada na turbina	0,70*
De saída da turbina	0,43*
De saída do trocador de calor	0,68*
De saída no exaustor	-0,04

*Indicam correlações significativas pelo teste t, a 95% de probabilidade.

Na Tabela 5 estão apresentados os valores de produção e o consumo e de energia pelo sistema de cogeração e do sistema de injeção de biomassa utilizado para fornecer combustível auxiliar (biomassa).

Tabela 5 – Produção e consumo de energia do sistema de cogeração de energia

Consumo de energia elétrica (kWh)	
Sistema de cogeração funcionando juntamente com o sistema de injeção de biomassa	85
Sistema de cogeração funcionando (sem injeção de biomassa)	58,5
Produção de energia elétrica (kWh)	
Produção máxima de energia pelo sistema	55
Produção média de energia do sistema	32,24
Déficit de energia (kWh)	

De maneira geral, a queima de biomassa ocorreu no início do processo, quando os gases da carbonização ainda não apresentavam poder calorífico suficiente para manter a combustão. Logo, houve a queima de biomassa por um período de aproximadamente cinco horas, sendo que nas primeiras 2 horas a injeção de biomassa é maior, sendo injetado a cada 15 minutos, 0,8 m³ de cavacos, o que corresponde ao conteúdo do silo auxiliar, totalizando ao final das 2 horas 3,2 m³ de cavacos. Nas três horas restantes, os gases da carbonização começam a apresentar poder calorífico mais elevado, ocasionando a redução da quantidade de biomassa injetada no queimador. Nessa etapa foram injetados 0,8 m³ de cavacos a cada 45 minutos, sendo que ao final das três horas foram utilizados 4 m³ de cavacos. Vale ressaltar que a quantidade de biomassa utilizada pode variar dependendo da composição dos gases da carbonização que chegam ao queimador, sendo que a média observada quando o sistema se encontrava em funcionamento foi de 5 horas, consumindo ao todo 10,4 m³ de cavacos.

4. DISCUSSÕES

Para que o sistema de cogeração de energia funcione adequadamente é importante o controle da temperatura nas diferentes etapas do sistema. Com relação à temperatura dos gases da carbonização que chegam ao queimador, verificou-se que a temperatura média observada (160°C a 170°C) encontra-se em um valor adequado, pois segundo Costa (2012) quando os gases da carbonização atingiam a temperatura de 120°C, o poder calorífico e a vazão dos combustíveis gasosos são suficientes para manter a combustão dos gases em uma fornalha. Sendo assim, a temperatura média dos gases da carbonização observada no sistema (Tabela 3) pode ser considerada suficiente para manter a queima dos gases no queimador. A quantidade de gases da carbonização que chegam até o queimador é controlada através da regulação do número de fornos que se encontram em diferentes estágios do processo de carbonização. Para conseguir uma mistura de gases adequada é necessário que se tenha a seguinte combinação na praça de carbonização: um forno em processo de descarga/carga, oito fornos em processo de resfriamento natural e três fornos carbonizando. Entretanto, foi difícil manter essa configuração durante todo o tempo, pois os fornos precisaram de manutenção, além de outros problemas decorrentes do processo. Por isso, para que se consiga manter o sistema de cogeração funcionando ininterruptamente, faz-se necessário acoplar mais fornos, para conseguir manter pelo menos três fornos sempre carbonizando.

A temperatura média obtida na câmara de combustão de uma fornalha acoplada a um forno de produção de carvão vegetal, estudado por Oliveira (2012) variou de 650°C a 1150°C. Os valores observados no presente estudo (900°C a 950°C) ficaram dentro da faixa de variação observada pelo autor.

A temperatura do ar na entrada da turbina é um importante parâmetro do sistema e está relacionada com a quantidade de energia gerada. Nos trabalhos desenvolvidos por Kautz e Hansen (2007) e De Mello e Monteiro (2012), que também estudaram a turbina Turbec 100, observou-se que a temperatura do ar na entrada da turbina foi de 950°C, valor superior ao observado no presente trabalho (700°C a 850°C). A temperatura de exaustão do gás observada por Kautz e Hansen (2007) e De Mello e Monteiro (2012) foi de 650°C, superior à encontrada no presente trabalho (300°C a 400°C), sendo que essa diferença pode ser explicada pelo fato da temperatura de entrada na turbina ser também menor.

O desempenho da turbina de combustão externa (EFGT) é notavelmente influenciado pelos parâmetros operacionais como a taxa de pressão, a temperatura de entrada na turbina e a diferença de temperatura no trocador de calor (COCCO et al., 2006). Durante o funcionamento do sistema de cogeração houve variação das temperaturas em todas as etapas (Figura 3). Essa variação pode ter ocorrido devido à variabilidade na vazão e qualidade do gás de carbonização que chega ao queimador. Conforme mencionado é preciso no mínimo de três fornos para manter a vazão e o poder calorífico dos gases adequado para que o sistema funcione de maneira satisfatória. Entretanto, não foi possível garantir o abastecimento dos gases de forma homogênea durante todo o tempo e, portanto ocorreram alterações na quantidade e qualidade dos gases que chegaram ao queimador, influenciando a temperatura na câmara de combustão após a queima dos gases. Observou-se que a temperatura média de entrada na turbina foi de 683°C, variando de 572°C a 728°C. A temperatura do ar na entrada da turbina apresentou variação de acordo com a temperatura dentro do queimador dos gases da carbonização, ou seja, quanto maior a temperatura obtida no queimador, maior foi a temperatura do ar que entrou na turbina.

Além disso, ao analisar a Tabela 4, observa-se que houve uma correlação positiva entre a temperatura de entrada na turbina e a potência gerada, corroborando com a tendência observada por Panteleo et al. (2013), que avaliaram o desempenho da turbina Turbec 100 utilizando como combustíveis gás natural e biomassa, e também verificaram que quanto maior a temperatura de entrada na turbina maior a produção de energia.

Da mesma forma, também avaliando a turbina Turbec 100, Kautz e Hansen (2007) observaram que a eficiência da turbina é afetada pela temperatura de entrada

do ar na turbina e da diferença de temperatura no trocador de calor, mantendo-se a pressão constante. Essa mesma relação também foi determinada no trabalho desenvolvido por Cocco et al (2006), avaliando a turbina Turbec 100, que verificaram para uma determinada relação de pressão, tanto a eficiência quanto a potência aumentam com a temperatura de entrada na turbina.

A pressão do ar na entrada e na saída da turbina durante o funcionamento do sistema permaneceu constante (Figura 4), conforme foi observado também em outros trabalhos, como Cocco et al. (2006), Kautz e Hansen (2007), Panteleo et al. (2013).

O consumo de energia elétrica do sistema de cogeração de energia (Tabela 5), foi determinado com o objetivo de verificar se a produção de energia pelo sistema de cogeração seria capaz de suprir a demanda de energia da planta de cogeração, que precisa manter ligados diversos equipamentos (exaustores, computadores, picador, esteiras, rosca sem fim e outros). Sendo assim, quando toda a planta se encontrava em funcionamento, incluindo o sistema de injeção de combustível auxiliar, situação que ocorre no início do processo, verificou-se que o consumo de energia foi de 85 kWh. Quando o sistema de injeção de biomassa é desligado, o gasto de energia caiu para 58,5 kWh. Considerando-se a produção média de energia atingida pelo sistema de 32,24 kWh o consumo de energia pelo sistema ainda é maior, o que gera um déficit de aproximadamente 26,26 kWh. A turbina Turbec 100 foi desenvolvida para trabalhar em condições próximas aos padrões ISO (15°C, 1.013 bar e 60% de umidade) (PANTELEO et al., 2013). O princípio de funcionamento dessa turbina é a expansão do ar ao ser aquecido. Ou seja, o ar ambiente entra nas serpentinas do trocador de calor, é aquecido pelo gás combusto que passa por fora dessa estrutura, e expande. Quanto maior a diferença de temperatura entre o gás combusto e o ar ambiente, maior será a expansão do ar na turbina. Logo, em regiões com temperaturas mais baixas, consegue-se maior expansão do ar, e conseqüentemente, maior geração de energia na turbina, ou seja, maior eficiência do sistema. Entretanto em regiões mais quentes, como no caso de Martinho Campos - MG, que apresenta temperatura média anual de 19,8°C e 25,3°C, acima da condição ISO, a potência alcançada pela turbina foi menor. Deste modo, para conseguir produzir a quantidade de energia para suprir a demanda da planta e da UPE Buritis, faz-se necessário a utilização de uma turbina com maior capacidade de geração de energia (300 kW- 400 kW), para compensar as temperaturas mais elevadas da região.

Quanto ao consumo de biomassa, verificou-se que existe a necessidade de utilização desse combustível auxiliar principalmente no início do processo, em geral durante as cinco primeiras horas. Nesse período, 10,4m³ de cavacos são consumidos.

5. CONCLUSÕES

Verificou-se que é possível gerar energia a partir da queima dos gases da carbonização em fornos de alvenaria utilizando turbina a gás.

A turbina selecionada nesse projeto não foi capaz de gerar energia suficiente para suprir a demanda da planta de cogeração, sendo que da maneira com que esta funcionando (12 fornos, turbina com potencia de 100 kW), gera um déficit de energia. Portanto, é necessária a utilização de uma turbina com maior potência e acoplar um maior número de fornos para que a geração de energia por esse sistema de cogeração seja maior do que o gasto, tornando o sistema viável.

O consumo de biomassa (cavacos) foi de 10,4 m³, ocorrendo principalmente no início do processo, até que os gases da carbonização apresentem qualidade suficiente para manter a queima.

6. AGRADECIMENTOS

Ao Programa de P&D regulado pela ANEEL, a ArcelorMittal Bioflorestas e CEMIG pelo financiamento e parceria no projeto. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao CNPq pela bolsa produtividade e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG/SECTES), pelo apoio financeiro e pela concessão de bolsa.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARJA, G. J. A. **A cogeração e sua inserção ao sistema elétrico**. 2006, 171 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Mecânicas) – Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2006.

CARDOSO, M. T.; DAMÁSIO, R. A. P.; CARNEIRO, A. C. O.; JACOVINE, L. A. G; VITAL, B. R.; BARCELLOS, D. C. Construção de um sistema de queima de gases da carbonização para redução da emissão de poluentes. **Cerne**, v. 16, Suplemento, p. 115-124, 2010.

COCCO, D.; DEIANA, P.; CAU, G. Performance evaluation of small size externally fired gas turbine (EFGT) power plants integrated with direct biomass dryers. **Energy**, v.31, n. 10-11, p. 1459–1471, 2006.

COSTA, J. M. F. N. **Temperatura final de carbonização e queima dos gases na redução de metano, como base à geração de créditos de carbono**. 2012. 71 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2012.

DE MELLO, P. E. B.; MONTEIRO, D. B. Thermodynamic study of an EFGT (externally fired gas turbine) cycle with one detailed model for the ceramic heat exchanger. **Energy**, v. 45, n. 1, p. 497-502, 2012.

KAUTZ, M.; HANSEN, U. The externally-fired gas-turbine (EFGT-Cycle) for decentralized use of biomass. **Applied Energy**, v. 84, n. 7–8, p.795–805, 2007.

OLIVEIRA, A. C. **Sistema forno-fornalha para a produção de carvão vegetal**. 2012. 73 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2012.

PANTALEO, A.M.; CAMPOREALE, S. M.; SHAH, N. Thermo-economic assessment of externally fired micro-gas turbine fired by natural gas and biomass: Applications in Italy. **Energy Conversion and Management**, v.75, p.202–213, 2013.

SILVA, J. V.; NOGUEIRA, G. S.; SANTANA, R. C.; LEITE, H. G.; OLIVEIRA, M. L. R.; ALMADO, R. P. Produção e acúmulo de nutrientes em povoamento de

eucalipto em consequência da intensidade do desbaste e da fertilização. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.47, n.11, p.1555-1562, 2012.

CONCLUSÕES GERAIS

Pode-se concluir com esse trabalho que o estoque de biomassa de uma floresta de *Eucalyptus*, aos 79 meses de idade foi de 145,99 t.ha⁻¹, sendo que, deste montante 11,67% (17,03 t.ha⁻¹) está em forma de resíduos gerados por ocasião da colheita. Dentre os resíduos da colheita, a casca apresenta maior contribuição sendo que a perda de casca total foi de 2,74 t.ha⁻¹ (25,7%). Com relação aos resíduos gerados na unidade de produção de carvão os finos lideraram com aproximadamente 20%.

Observou-se que a madeira de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* aos 79 meses, avaliada no presente trabalho, apresentou qualidade para a produção de carvão vegetal. Os resíduos da colheita florestal e da carbonização apresentaram potencial para serem utilizados para a geração de energia, uma vez que estocam uma grande quantidade de energia que não é utilizada. Entretanto, os finos de menor granulometria (0-2mm) apresentam-se contaminados, o que dificulta o seu aproveitamento.

Foi possível gerar energia a partir da queima dos gases da carbonização em fornos de alvenaria utilizando turbina a gás. Entretanto, a turbina selecionada não conseguiu gerar energia suficiente para suprir a demanda da planta de cogeração, portanto, seria necessário a utilização de uma turbina com maior potência e acoplar um maior número de fornos para que a geração de energia por esse sistema de cogeração seja maior do que o gasto, tornando o sistema viável.