

CARACTERÍSTICAS DE ALGUMAS BIOMASSAS USADAS NA GERAÇÃO DE ENERGIA NO SUL DO BRASIL¹

Characteristics of Some Types of Biomass Used for Energy Production in Southern Brazil

Leandro Calegari², Celso Edmundo Bochetti Foelkel³, Clovis Roberto Haselein⁴, José Luis Silva de Andrade⁵, Paulo Silveira⁶ e Elio José Santini⁴

Resumo: Este trabalho baseou-se na determinação da densidade a granel e do teor de umidade de cargas transportadas de biomassa destinadas à geração de energia térmica e elétrica em uma empresa de base florestal. As informações foram discriminadas por tipo de matéria-prima e fornecedor. A partir dessas informações e em combinação com os valores do poder calorífico, estimou-se a energia líquida gerada para cada tipo de biomassa. Os volumes das cargas de biomassas recebidas em caminhões foram determinados através do uso de trena métrica e régua de alumínio. Empregou-se uma balança para determinação do peso das cargas, enquanto o teor de umidade foi obtido por meio de amostragens. Observaram-se diferenças estatísticas significativas, tanto relativas à densidade a granel quanto ao teor de umidade, entre os diferentes tipos de biomassas utilizados pela empresa. As cargas de madeira de *Eucalyptus* spp. e de briquete se destacaram por oferecer maior massa seca por unidade de volume. Já as cargas de cavaco misturado e de refilo/costaneira destacaram-se por apresentar diferenças estatísticas significativas em relação aos fornecedores. O principal fator que influenciou a energia líquida gerada foi o teor de umidade, através de uma relação inversa. Deste modo, o peso seco da biomassa em combinação com o poder calorífico deveria ser utilizado como base para a remuneração das diferentes biomassas e fornecedores.

Palavras-chave: Biomassa, poder calorífico, densidade a granel, umidade e madeira.

Abstract: This work determined bulk density and moisture content of biomass truck loads used to generate thermal and electric energy at a forest-based pulp and paper mill. This information was classified according to type of raw material and supplier. The net energy generated for each type of biomass was estimated in combination with the fuel calorific values. The volume of the biomass loads was determined by using a metric tape and an aluminum rule. A scale was used for load weight determination while moisture content was obtained by sampling and oven-drying. Statistically significant differences were found for bulk density and moisture content among the various types of biomass used by suppliers. The eucalypt wood and briquette loads provided the largest dry mass per unit of volume. Mixed wood chips and slabs/wane/trimmers showed significant differences among suppliers. The main factor affecting net energy generation was biomass moisture content. Therefore, biomass dry weight combined with calorific fuel value should be used to remunerate the different biomasses.

Keywords: Biomass, calorific fuel value, bulk density, moisture content, and wood.

¹ Recebido para publicação em 10.1.2006 e aceito em 11.2.2006.

² Eng. Florestal. Mestrando pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Centro de Ciências Rurais da Universidade Federal de Santa Maria – CCR/UFSM, 97105-900 Santa Maria-RS, Bolsista do CNPq, <leandrocalegari@yahoo.com.br>. ³ Eng.-Agrônomo, Dr.h.c., Consultor, Grau Celsius Ltda, <foelkel@via-rs.net>.

⁴ Eng. Florestal, Professor do Departamento de Ciências Florestais – CCR/UFSM. ⁵ Eng. Florestal, Cambará S.A. Produtos Florestais, Cambará do Sul-RS; ⁶ Eng. Químico, Cambará S.A. Produtos Florestais.

1 INTRODUÇÃO

O mundo vive uma situação em que mais de 75% de sua energia provém de combustíveis fósseis. O uso da biomassa como alternativa energética pode servir para fixar o homem no campo, possibilitando um setor agropecuário mais produtivo, e para melhorar a rentabilidade das empresas madeiras, que podem gerar energia com o uso de seus próprios resíduos. Esse último aspecto é fundamental para resolver um grave problema ambiental de indústrias do setor florestal: a destinação dos resíduos (WANDER, 2001).

A madeira combustível pode ser classificada em três grandes grupos: resíduos industriais, resíduos florestais e provenientes de florestas energéticas. Dentre os resíduos industriais podem ser citadas a serragem, a maravalha (cepilho), a casca das árvores e a lenha. A serragem é originada da operação de serras, podendo ser seca ou úmida. A maravalha é gerada pelas plainas nas instalações de serraria/beneficiamento, estando disponível exclusivamente no estado seco. A casca provém do descascamento, na fábrica, das toras utilizadas no processo de fabricação de celulose e papel. As costaneiras, as aparas, os refilos e as cascas geralmente apresentam altos teores de umidade e são classificados como lenhas por Wander (2001).

Denomina-se briquetagem ao processo de compactação de resíduos lignocelulósicos. O teor de umidade aceitável para sua produção depende do tipo de equipamento utilizado, mas na maioria dos casos deve ser menor que 20%, o que às vezes torna necessária a introdução de um processo de secagem (QUIRINO, 1991).

Os resíduos florestais, deixados no terreno após a colheita das árvores das florestas, também constituem potencial fonte de energia. Entretanto, devido à excessiva exploração de nutrientes, deve-se realizar um monitoramento quando esse tipo de biomassa

é utilizado. As cinzas resultantes da combustão podem retornar à floresta como fertilizantes, uma vez que a cinza aumenta o pH e os teores de P, K, Mg e Ca do solo.

Segundo Soares e Hakkila (1987), os maiores problemas da madeira com relação à poluição são a fuligem (partículas de carvão) e a fumaça. O Sistema FIEP (2002) define fuligem como sendo partículas de combustíveis não completamente queimadas, presentes nos gases de exaustão. São partículas com características de carvão vegetal, pelo alto teor de carbono e minerais que apresentam.

A madeira e a casca contêm cerca de 6% de hidrogênio, com relação ao seu peso seco, o qual tende a combinar com o oxigênio, formando água, que deverá ser evaporada durante o processo de combustão (INCE, 1979). Deste modo, a quantidade de energia liberada pela biomassa durante a combustão pode ser expressa como poder calorífico superior (PCS) ou poder calorífico inferior (PCI). O PCS corresponde à totalidade do calor liberado na combustão. Já o PCI corresponde ao PCS, deduzidos o calor necessário para vaporizar a água existente na composição do combustível e a umidade proveniente da combustão do hidrogênio, denominada de água de formação. Portanto, o PCI corresponde à quantidade de calor útil liberado na queima do combustível.

O calor liberado pela combustão da madeira varia de acordo com os seus constituintes. Hakkila (1984) *apud* Soares e Hakkila (1987) relatou que materiais com alto conteúdo de carbono e hidrogênio significam alto poder calorífico, enquanto o oxigênio apresenta efeito contrário. Soares e Hakkila (1987) constataram que a resina e outros produtos existentes em maiores proporções nas acículas e nos ramos de *Pinus taeda* proporcionam maior PCS do resíduo florestal, quando comparado à madeira.

O uso da biomassa para geração de energia deve necessariamente levar em conta as características particulares de cada tipo, no que se refere à combustão. A biomassa adquirida pelas empresas para geração de energia geralmente apresenta-se muito heterogênea. Diferentes tipos de materiais são adquiridos, os quais podem ser provenientes de diversos fornecedores.

Este trabalho baseou-se na determinação do teor de umidade e do poder energético da biomassa utilizada por uma empresa de base florestal. A distinção baseou-se no tipo de biomassa e nos fornecedores.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O presente estudo foi realizado na empresa Cambará S.A. Produtos Florestais, localizada no município de Cambará do Sul-RS. As principais biomassas energéticas utilizadas por essa empresa são: cavaco misturado (mistura de cavacos, serragem e casca de *Pinus* spp.), rejeito das peneiras (trata-se dos rejeitos das peneiras classificadoras dos cavacos de *Pinus taeda* L. destinadas ao processo de produção de celulose), casca de *Pinus taeda* L. (obtida do descascador), fuligem (rejeito proveniente das caldeiras), madeira de *Eucalyptus* spp., resíduos florestais (obtidos pela moagem de galhos e acículas provenientes da colheita de florestas de *Pinus* spp.) e maravalha, briquetes, refilos e costaneiras, os quais se referem basicamente a *Pinus* spp., devendo ser ressaltado que estes dois últimos geralmente se apresentavam misturados na mesma carga.

Entre as biomassas geradas dentro do pátio da empresa, o rejeito das peneiras e a casca de *Pinus taeda* são transportados até as caldeiras por meio de caminhões tipo caçamba. A fuligem, também proveniente do pátio, é transportada por caminhão poliguindaste. Já o restante da biomassa gerada fora do pátio da empresa é transportado até

as caldeiras por caminhões de carroceria aberta e caminhões graneleiros.

Inicialmente, o trabalho baseou-se na determinação da densidade a granel e no teor de umidade das cargas de biomassa destinadas para energia. Estas informações foram identificadas quanto aos fornecedores e ao tipo de material. No segundo momento, com a inclusão dos dados referentes ao PCS, estimou-se a energia líquida gerada para cada tipo de biomassa, por unidade de peso e volume.

O levantamento dos dados relativos à densidade a granel e ao teor de umidade foi realizado durante o período compreendido entre os dias 28 de janeiro e 19 de março de 2003. Utilizou-se trena métrica para determinação do volume das cargas transportadas pelo caminhão poliguindaste. Já para as demais cargas, uma régua de alumínio, demarcada de 5 em 5 cm, foi utilizada para determinação da altura média das cargas. O peso líquido correspondente a cada carga medida foi obtido no Setor de Balança. A determinação do teor de umidade das cargas foi realizada por meio de amostras obtidas de diferentes posições do interior da carga.

A partir dos dados de volume e peso foi possível calcular a densidade a granel das cargas, sendo expressa em kg m^{-3} , exceto para as cargas de madeira de *Eucalyptus* spp. (adquirido em forma de toretes) e de refilo/costaneira, que foram expressas em kg st^{-1} . Portanto, as unidades de volume utilizadas neste trabalho sempre se referem aos volumes das cargas da biomassa tal qual no recebimento.

Considerando que caminhões de carrocerias com tampas laterais, quando não completamente cheios de biomassa, apresentam dificuldade de visualização e, conseqüentemente, de determinação da altura da carga, mediram-se apenas os que estavam completamente cheios. Quando as cargas não necessitavam de tampas laterais, como é o

caso do *Eucalyptus* spp. e do refilo/costaneira, mediram-se apenas as cargas dispostas de forma regular. Cargas compostas pela mistura de diferentes tipos de biomassa, quando identificadas, não foram analisadas, exceto para as cargas de refilo/costaneira.

Após serem devidamente identificadas, as amostras foram condicionadas em sacos plásticos e conduzidas ao Laboratório de Controle de Qualidade, que pertence à empresa, para determinação de seu teor de umidade (base úmida). O levantamento dos dados somente foi realizado nos materiais que chegavam diretamente à fábrica. Materiais que ficavam depositados no pátio (principalmente madeira de *Eucalyptus* spp.) não foram analisados.

Os dados relativos à densidade a granel e ao teor de umidade foram avaliados por meio de análise de variância, a 5% de probabilidade, pelo teste *Least Significant Difference* (LSD) de Fisher. Materiais provenientes de mais de um fornecedor foram avaliados separadamente, objetivando a comparação entre eles.

Do sistema de dados da empresa, obteve-se a quantidade média mensal de aquisição de cada tipo de biomassa. Para estimar a quantidade total de energia líquida produzida pela empresa a partir de cada tipo de biomassa, utilizou-se o PCS de análise realizada nessas biomassas em agosto de 2002, pela Fundação Estadual de Ciência e Tecnologia (CIENTEC/RS), relacionados no Quadro 5.

A energia líquida gerada pelos diferentes tipos de biomassas foi determinada pela equação 1.

$$ELG = PCI - \Sigma E_{tu} \quad (\text{eq. 1})$$

Sabendo-se que $PCI = PCS_{\text{efetivo}} - E_c$ têm-se:

$$ELG = PCS_{\text{efetivo}} - E_c - \Sigma E_{tu} \quad (\text{eq. 2})$$

em que ELG = energia líquida gerada; PCS_{efetivo} = poder calorífico superior efetivo,

considerando a eficiência do combustível de 95%; E_c = energia consumida para evaporar a água de formação; e ΣE_{tu} = energia total gasta para evaporar a água presente na biomassa, representada pelo teor de umidade.

Quando relacionado à unidade de peso, o PCS_{efetivo} foi obtido pelo produto entre o PCS da biomassa e sua eficiência média (0,95). Quando relacionado à unidade de volume, o PCS_{efetivo} , expresso pela unidade de peso, foi multiplicado com o peso seco de biomassa, que foi obtido pela Equação 3.

$$\text{Peso seco por unidade de volume} = \frac{\text{densidade a granel} \cdot (1 - (\text{teor de umidade} \% / 100))}{\text{densidade a granel} \cdot (1 - (\text{teor de umidade} \% / 100))} \quad (\text{eq. 3})$$

Para cada molécula de água (peso molecular igual a 18 g), têm-se 2 g de hidrogênio. O peso de hidrogênio, em kg, presente por unidade de peso de biomassa seca pode ser obtido por peso de hidrogênio ($\text{kg kg}^{-1}_{\text{biomassa}}$) = ((teor de hidrogênio %)/100). Considerando a energia de evaporação da água, a energia total consumida para evaporar a água de formação por unidade de peso seco de biomassa é dada pela equação 4.

$$E_c = E_v \cdot (9 \cdot ((\text{teor de hidrogênio} \% / 100))) \quad (\text{eq. 4})$$

em que E_c = energia consumida para evaporar a água de formação ($\text{kcal kg}^{-1}_{\text{água}}$); e E_v = energia de evaporação da água, estabelecida em $560 \text{ kcal kg}^{-1}_{\text{água}}$.

Utilizaram-se valores médios de teor de hidrogênio obtidos de biomassas analisadas pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT/SP) e CIENTEC/RS, sendo 5,3% para a casca, 6,1% para os cavacos de *Eucalyptus* spp. e *Pinus* spp. (incluindo os rejeitos das peneiras, da maravalha e do refilo/costaneira) e 5,85% para o restante. A conversão para a unidade de volume foi realizada da mesma forma que para o PCS_{efetivo} .

A energia total gasta para evaporar a água existente na composição da biomassa foi obtida pelo somatório dos seguintes gastos de energia:

- a) Para a água passar de 25 °C (temperatura ambiente) para 100 °C (temperatura de evaporação)

$$\Delta Q = m_{\text{água}} \cdot c \cdot \Delta t \quad (\text{eq. 5})$$

em que ΔQ = quantidade de energia necessária para a elevação da temperatura da água contida em uma unidade de volume (kcal m³ ou kcal st⁻¹); $m_{\text{água}}$ = peso de água por unidade de volume de biomassa (kg m⁻³ ou kg st⁻¹), obtido pela diferença entre a densidade a granel e o peso seco de biomassa; c = calor específico da água (1 kcal kg⁻¹ °C); e Δt = variação da temperatura (°C)

- b) Para a água mudar de estado (líquido ao gasoso)

$$Q_m = m_{\text{água}} \cdot L \quad (\text{eq. 6})$$

em que Q_m = energia de mudança de estado (kcal m⁻³ ou kcal st⁻¹); $m_{\text{água}}$ = peso da água por unidade de volume da biomassa (kg m⁻³ ou kg st⁻¹); e L = calor latente de vaporização da água (540 kcal kg⁻¹).

- c) Para o vapor d'água passar de 100 para 145 °C (temperatura na saída da chaminé)

Considerando que as entalpias do vapor a 145 e 100 °C correspondem a 654 e 639 kcal kg⁻¹, respectivamente, ocorre uma variação de entalpia $\Delta H = 15$ kcal kg⁻¹.

$$Q_{ch} = \Delta H \cdot m_{\text{água}} \quad (\text{eq. 7})$$

em que Q_{ch} = energia necessária para o vapor d'água sair pela chaminé (kcal m⁻³ ou kcal st⁻¹); $m_{\text{água}}$ = peso da água (vapor-d'água) por unidade de volume da biomassa (kg m⁻³ ou kcal st⁻¹); e ΔH = variação de entalpia, estabelecida em 15 kcal kg⁻¹.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Devido ao grande movimento de caminhões, nem sempre foi possível obter simultaneamente, da mesma carga, a densidade e o teor de umidade. Porém, na maior parte das vezes esses dados foram obtidos simultaneamente.

A obtenção dos dados referentes às cargas de briquetes mostrou-se problemática. Além da pequena porcentagem fornecida desse tipo de material, essas cargas se apresentavam dispostas de forma irregular sobre os caminhões.

A análise da densidade a granel e do teor de umidade foi inicialmente feita com relação ao tipo de biomassa (Quadro 1). Consideraram-se todas as amostras obtidas, independentemente dos fornecedores.

Conforme indicado pela análise de variância, ocorreram diferenças estatísticas significativas tanto relativas à densidade a granel quanto ao teor de umidade, entre os diferentes tipos de biomassa. A madeira de *Eucalyptus* spp. e o briquete se destacaram por oferecer maior peso seco por unidade de volume. Por outro lado, o rejeito da peneira, a fuligem e a casca de *Pinus* spp. são os materiais com a menor relação peso seco/volume. Os baixos teores de umidade referentes à maravalha e ao briquete estão relacionados ao processo de produção, uma vez que não podem ser obtidos a partir de madeiras com altos teores de umidade.

Os tipos de biomassa oferecidos por vários fornecedores foram analisados da mesma forma que anteriormente, procurando-se identificar as variações que ocorrem entre eles. Consideraram-se apenas os fornecedores dos quais foi possível obter um número razoável de amostras. Não foi identificada diferença estatística significativa entre a densidade a granel base úmida e o teor umidade com relação aos principais fornecedores amostrados para três tipos de

biomassa: resíduo florestal, madeira de *Eucalyptus* spp. e maravalha (Quadro 2).

Os tipos de biomassa que apresentaram considerável variação com relação aos fornecedores foram o cavaco misturado (Quadro 3) e o refilo/costaneira (Quadro 4).

Em relação à densidade a granel base úmida, observou-se que o fornecedor 14 foi o que apresentou menor valor. Esse fornecedor é uma serraria pertencente à própria empresa. A curta distância de transporte realizada por esse fornecedor provavelmente contribui

Quadro 1 - Média da densidade a granel base úmida (Dgbu), teor de umidade e densidade a granel base seca (Dgbs, peso seco por unidade de volume) em relação ao tipo de biomassa

Table 1 - Average green bulk density (Dgbu), moisture content and bulk density (Dgbs, oven-dry weight) of different types of biomass

Tipo de Biomassa	Nf ⁽¹⁾	Dgbu ⁽²⁾		Teor de Umidade		Dgbs ⁽²⁾ (kg _{seco} m ⁻³)
		Na ⁽³⁾	(kg _{úmido} m ⁻³)	Na ⁽³⁾	(%)	
Cavaco misturado ⁽⁵⁾	19	66	436,93 f ⁽⁴⁾	86	55,62 e	194
Rejeito das peneiras ⁽⁶⁾	1	4	397,56 def	8	64,90 h	140
Fuligem ⁽⁸⁾	1	4	273,00 b	3	49,15 d	139
Casca de <i>Pinus</i> spp. ⁽⁶⁾	1	4	351,33 cd	10	60,32 g	139
Madeira de <i>Eucalyptus</i> spp.	4	13	740,93 h	6	52,08 d	355
Serragem de <i>Pinus</i> spp.	1	6	425,61 ef	6	56,60 ef	185
Serragem de <i>Eucalyptus</i> spp.	1	4	297,75 bc	7	43,87 c	167
Refilo/costaneira ⁽⁷⁾	10	23	412,30 e	25	57,80 f	174
Resíduo florestal ⁽⁶⁾	3	10	377,92 de	12	55,70 ef	167
Maravalha ⁽⁷⁾	9	15	189,84 a	12	16,12 b	159
Briquete ⁽⁷⁾	1	2	646,53 g	2	8,14 a	594

⁽¹⁾ Número de fornecedores; ⁽²⁾ para a madeira de *Eucalyptus* spp. e refilo/costaneira, expressos em kg st⁻¹; ⁽³⁾ número de amostras; ⁽⁴⁾ valores seguidos pela mesma letra, na mesma coluna, não diferem estatisticamente a 5% de probabilidade, pelo teste LSD de Fisher; ⁽⁵⁾ refere-se, basicamente, à mistura de cavacos, casca e serragem de *Pinus* spp.; ⁽⁶⁾ refere-se basicamente a *Pinus taeda*; ⁽⁷⁾ refere-se basicamente a *Pinus* spp.; e ⁽⁸⁾ rejeito proveniente das caldeiras.

Quadro 2 - Valores médios de densidade a granel base úmida (Dgbu), teor de umidade (TUbu) e densidade a granel base seca (Dgbs, peso seco por unidade de volume) em relação aos principais fornecedores de resíduo florestal, madeira de *Eucalyptus* spp. e maravalha

Table 2 - Average values of green bulk density (Dgbu), moisture content (TUbu) and bulk density (Dgbs, oven-dry weight) in relation to the main suppliers of forest residue, eucalypt wood and shaves

Tipo de Biomassa	Fornecedor	Dgbu ⁽²⁾		TUbu		Dgbs ⁽²⁾ (kg _{seco} m ⁻³)
		Nr ⁽¹⁾	(kg _{úmido} m ⁻³)	Nr ⁽¹⁾	(%)	
Resíduo florestal	1	3	377,05 a ⁽³⁾	8	55,75 a	166,84
Resíduo florestal	2	4	362,98 a	4	55,60 a	161,16
Madeira de <i>Eucalyptus</i> spp.	1	6	744,60 a	4	52,02 a	357,26
Madeira de <i>Eucalyptus</i> spp.	2	4	756,27 a	3	52,20 a	361,50
Maravalha	1	5	194,33 a	4	17,21 a	160,89
Maravalha	2	5	198,94 a	3	16,98 a	165,16
Maravalha	3	3	202,57 a	3	16,91 a	168,32

⁽¹⁾ Número de repetições; ⁽²⁾ para a madeira de *Eucalyptus* spp., expresso em kg st⁻¹; e ⁽³⁾ valores seguidos pela mesma letra, na mesma coluna e relacionados ao mesmo tipo de biomassa, não diferem estatisticamente a 5% de probabilidade, pelo teste LSD de Fisher.

para que não ocorra compactação da carga, influenciando na mais baixa densidade. Os demais fornecedores percorrem distâncias maiores até chegar à fábrica, o que provavelmente pode favorecer o aumento de densidade da carga.

Variação significativa do peso seco por unidade de volume do cavaco misturado foi observada entre os principais fornecedores, destacando-se os de número 5, 6, 11 e 12, pelo fornecimento de material com maior peso seco por unidade de volume.

Quadro 3 – Valores médios de densidade a granel base úmida (Dgbu), teor de umidade e densidade a granel base seca (Dgbs, peso seco por unidade de volume) do cavaco misturado em relação aos principais fornecedores

Table 3 – Average values of green bulk density (Dgbu), moisture content and bulk density (Dgbs, oven-dry based) of mixed chips in relation to the main suppliers

Fornecedor	Dgbu		Teor de Umidade		Dgbs (kg _{seco} m ⁻³)
	Nr ⁽¹⁾	(kg _{úmido} m ⁻³)	Nr ⁽¹⁾	(%)	
1	4	428,36 bcde ⁽²⁾	6	53,62 B	199
2	4	427,73 bcde	6	55,57 bc	190
3	7	481,20 g	9	56,21 C	211
4	4	430,66 cde	7	55,20 bc	193
5	6	500,17 h	11	55,03 bc	225
6	4	458,82 f	3	48,28 A	237
7	4	446,55 ef	3	61,74 D	171
8	3	407,74 b	4	54,91 bc	184
9	4	424,88 bcd	8	61,10 D	165
10	4	414,22 bc	4	53,31 B	193
11	4	435,29 de	4	49,60 A	219
12	3	483,98 gh	8	55,78 bc	214
13	4	465,10 fg	2	57,23 C	199
14	4	265,51 a	6	56,98 C	114

⁽¹⁾ Número de repetições; e ⁽²⁾ valores seguidos pela mesma letra, na mesma coluna, não diferem estatisticamente a 5% de probabilidade, pelo teste LSD de Fisher.

Quadro 4 – Valores médios de densidade a granel base úmida (Dgbu), teor de umidade e densidade a granel base seca (Dgbs, peso seco por unidade de volume) do refilo/costaneira com relação aos principais fornecedores

Table 4 – Average values of green bulk density (Dgbu), moisture content and bulk density (Dgbs, oven-dry based) of wane edges/slabs in relation to the main suppliers

Fornecedor	Dgbu ⁽²⁾		Teor de Umidade		Dgbs ⁽³⁾ kg _{seco} st ⁻¹
	Nr ⁽¹⁾	kg _{úmido} st ⁻¹	Nr ⁽¹⁾	(%)	
1	4	409,21 b ⁽⁴⁾	4	57,24 bc	175
2	4	336,61 a	3	58,85 bcd	139
3	3	418,35 b	4	61,67 d	160
4	4	434,87 bc	5	60,10 cd	174
5	3	409,84 b	4	56,08 b	180
6	3	476,40 c	3	59,60 bcd	192
7	4	423,14 bc	4	49,62 a	213

⁽¹⁾ Número de repetições; e ⁽²⁾ valores seguidos pela mesma letra, na mesma coluna, não diferem estatisticamente a 5% de probabilidade, pelo teste LSD de Fisher.

Quadro 5 – Energia líquida gerada e sua participação na energia total disponibilizada pelas diferentes biomassas

Table 5 – Net energy generated and its proportion in the total energy yielded by the various types of biomass

Tipo de Biomassa		PCS ⁽¹⁾ (kcal kg ⁻¹ seco)	Dg ⁽²⁾ (kg m ⁻³ ou kg st ⁻¹)	TU ⁽³⁾ (%)	PCS _{efetivo} ⁽⁴⁾ (kcal m ⁻³ ou kcal st ⁻¹)	Ec ⁽⁵⁾ (kcal m ⁻³ ou kcal st ⁻¹)
1	Cavaco misturado	4.870	436,93	55,62	897.122,5	59.615,5
2	Rejeito das peneiras	4.760	397,56	64,90	631.016,0	42.901,3
3	Casca de pinus	5.005	351,33	60,32	662.849,0	37.238,6
4	Fuligem	5.580	273,00	49,15	735.887,5	40.789,9
5	Madeira de <i>Eucalyptus</i> spp.	4.445	740,93	52,08	1.499.302,8	109.157,7
6	Refilo/costaneira	5.110	412,30	57,80	844.637,4	53.491,7
7	Resíduos florestais	4.900	377,92	55,70	779.333,4	49.192,9
8	Maravalha	4.945	189,84	16,12	748.059,3	48.956,1
9	Briquete	4.700	646,53	8,14	2.651.774,5	182.589,4

Continua... (Continued...)

Quadro 5, cont. (Table 5, cont.)

Tipo de Biomassa	ΣE_{tu} ⁽⁶⁾ (kcal m ⁻³ ou kcal st ⁻¹)	PCI ⁽⁷⁾ (kcal m ⁻³ ou kcal st ⁻¹)	Energia Líquida Gerada (ELG)		
			(kcal m ⁻³ ou kcal st ⁻¹) ⁽⁸⁾	(kcal kg ⁻¹ úmido) ⁽⁹⁾	(kWh kg ⁻¹ úmido) ⁽¹⁰⁾
1	153.102,89	837.506,9	684.404,0	1.566,4	1,82
2	162.550,36	588.114,7	425.564,3	1.070,4	1,24
3	133.511,02	625.610,4	492.099,4	1.400,7	1,63
4	84.533,09	695.097,6	610.564,5	2.236,5	2,60
5	243.102,10	1.390.145,1	1.147.043,0	1.548,1	1,80
6	150.134,92	791.145,7	641.010,8	1.554,7	1,81
7	132.615,91	730.140,5	597.524,6	1.581,1	1,84
8	19.279,39	699.103,3	679.823,9	3.581,0	4,16
9	33.155,35	2.469.185,1	2.436.029,8	3.767,9	4,38

Continua... (Continued...)

Quadro 5, cont. (Table 5, cont.)

Tipo de Biomassa	Quantidade Média Mensal		Energia Líquida Média	
	(kg úmidos por mês) ⁽¹¹⁾	Participação (%)	(kWh por mês) ⁽¹²⁾	Participação (%)
1	11.121.339	53,2	20.247.713,63	48,30
2	538.934	2,6	670.527,17	1,60
3	840.320	4,0	1.368.045,36	3,26
4	630.000	3,0	1.637.674,84	3,91
5	3.080.080	14,7	5.542.207,30	13,22
6	1.674.520	8,0	3.025.941,81	7,22
7	1.390.053	6,7	2.554.498,11	6,09
8	882.000	4,2	3.671.094,07	8,76
9	731.217	3,5	3.202.272,06	7,64
Total	20.888.463	100,0	41.919.974,34	100,00

⁽¹⁾ Poder calorífico superior, determinado em agosto/2002 e expresso com base nos materiais absolutamente secos;

⁽²⁾ densidade a granel base úmida média, expressa em kg_{úmido} por unidade de volume, sendo para a madeira de *Eucalyptus* spp. e para a do refilo/costaneira expressas em st; ⁽³⁾ teor de umidade médio (base úmida); ⁽⁴⁾ poder calorífico superior efetivo, obtido pelo produto do PCS, da eficiência média (0,95) e peso do seco de biomassa por unidade de volume, sendo este último obtido pela equação 3; ⁽⁵⁾ energia consumida para evaporar a água de formação, obtida pela equação 4;

⁽⁶⁾ Energia total gasta para evaporar a água presente na biomassa, estimado pelo somatório das equações 5, 6 e 7; ⁽⁷⁾ poder calorífico inferior, determinado pela diferença entre PCS_{efetivo} e Ec; ⁽⁸⁾ obtido pela equação 1; ⁽⁹⁾ obtido pela razão entre a ELG, expressa por unidade de volume, e a densidade a granel base úmida; ⁽¹⁰⁾ obtido pela conversão de unidades 1 kcal = 0,0011627 kWh; ⁽¹¹⁾ Valor médio obtido entre os meses de janeiro e março de 2003; e ⁽¹²⁾ obtido pelo produto entre a ELG, expressa em kWh kg⁻¹ úmido, e a quantidade média mensal de biomassa, em kg_{úmido} por mês.

Para as cargas de refilo/costaneira, da mesma forma que para o cavaco misturado, alguns fornecedores destacaram-se por oferecer material de melhor qualidade. Neste caso destacaram-se os fornecedores 6 e 7, por produzir material com maior peso seco por unidade de volume.

A determinação da energia líquida gerada pelas diferentes biomassas, assim como sua participação no total da energia produzida pelas caldeiras, é mostrada no Quadro 5.

Em relação ao PCS determinado e utilizado como base dos cálculos no Quadro 5, observa-se que o valor determinado para o resíduo florestal encontra-se próximo ao observado por Soares e Hakkila (1987) para o resíduo de *Pinus taeda* (4 932 kcal kg⁻¹). Para a madeira de *Eucalyptus* spp., apresentou-se inferior ao descrito por Vale et al. (2000) para o *Eucalyptus grandis* (4.641 kcal kg⁻¹); por Jara (1989), *apud* Vale et al. (2000), para *Eucalyptus grandis* de 10 anos de idade (4.790 kcal kg⁻¹); e por Quirino (2003) para *Eucalyptus* sp. (4.850 kcal kg⁻¹). Quando comparado ao *Pinus*, o PCS do *Eucalyptus* spp. apresentou-se inferior. Conforme Soares e Hakkila (1987), as coníferas, por conter maior quantidade de resina, têm maior poder calorífico que as folhosas. Segundo observado por Wander (2001), o PCS da madeira de *Pinus elliottii* apresentou-se em cerca de 4.837 kcal kg⁻¹. Este valor é próximo ao determinado para o cavaco misturado, ao rejeito das peneiras e ao briquete. Entretanto, apresenta-se significativamente inferior quando comparado ao refilo/costaneira. O valor determinado para a fuligem apresentou-se superior ao descrito por Andrade et al. (2003), para carvão obtido a partir de *Pinus taeda* (5.210 kcal kg⁻¹), e por Quirino e Brito (1991), para briquetes de carvão vegetal (5.364 kcal kg⁻¹).

Nota-se ainda que a energia líquida potencialmente disponível para geração, quando considerada por unidade de peso, está significativamente relacionada com o teor de

umidade (INCE, 1979), numa relação inversa entre ambas. O teor de umidade da biomassa influenciou significativamente na quantidade de matéria seca e, conseqüentemente, na produção de calor. O briquete e a maravalha, materiais com menores teores de umidade, foram adquiridos em menor quantidade pela empresa, em razão da menor disponibilidade no mercado. A energia líquida total contida no somatório dos diferentes tipos de biomassa foi estimada em aproximadamente 42.000.000 kWh por mês, sendo 48,3% proveniente do cavaco misturado, devido à grande quantidade adquirida.

4 CONCLUSÕES

Observaram-se diferenças estatísticas significativas, tanto relativa à densidade a granel quanto ao teor de umidade, entre os diferentes tipos de biomassa utilizados pela empresa em estudo. As cargas de madeira de *Eucalyptus* spp. e de briquete se destacaram por oferecer maior peso seco por unidade de volume. Já as cargas de cavaco misturado e de refilo/costaneira destacaram-se por apresentar diferença estatística significativa com relação aos principais fornecedores. O principal fator que influenciou a energia líquida gerada foi o teor de umidade, através de uma relação inversa. Deste modo, o peso seco da biomassa em combinação com o poder calorífico deveria ser utilizado como base para remuneração das diferentes biomassas e fornecedores.

5 AGRADECIMENTO

À empresa Cambará S.A. Produtos Florestais, pela concessão do estágio e pelo apoio financeiro para a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, A. S. et al. Qualidade do carvão produzido a partir de *Pinus taeda* L. **Pesquisa Florestal Online**, 2003. Disponível em: <<http://www.floresta.ufpr.br/fonline/t11.htm>>. Acesso em: 17 abr. 2004.

INCE, P. J. **How to estimate recoverable heat energy in wood or bark fuels.** US Department of Agriculture. Forest Products Laboratory. General Technical Report FPL 29, 1979. 10 p. Disponível em: <www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplgtr/fplgtr29.pdf>. Acesso em: 17 abr. 2004.

QUIRINO, W. F. Briquetagem de resíduos ligno-celulósicos. Brasília: IBAMA/DIRPED/LPF. **Circular Técnica**, v. 1, n. 2, p. 69-80, 1991.

QUIRINO, W. F. **Utilização energética de resíduos vegetais.** Brasília: Fundação de Tecnologia Florestal e Geoprocessamento-FUNTEC, Laboratório de Produtos Florestais-IBAMA, 2003. 35 p. Disponível em: <<http://www.funtec.org.br/arquivos/aproveitamento.pdf>>. Acesso em: 17 abr. 2004.

QUIRINO, W. F.; BRITO, J. O. **Características e índice de combustão de briquetes de carvão vegetal.** Brasília: IBAMA/DIRPED/LPF, 1991. (Série Técnica, 13)

SISTEMA FIEP. **Entenda como energia pode ser gerada.** Instituto Euvaldo Lodi do Paraná - IEL/PR, 2002. Disponível em: <http://www.fiepr.com.br/portal_fiep/fieprn/energian/energiacombust.htm>. Acesso em: 17 abr. 2004.

SOARES, R. V.; HAKKILA, P. Potencial energético dos resíduos de desbastes em plantações de *Pinus taeda* no Estado do Paraná, Brasil. **Revista Floresta**, v. 17, n. 1, 2, p. 73-94, 1987.

VALE, A. T. et al. Produção de energia do fuste de *Eucalyptus grandis* Hill ex-Maiden e *Acacia mangium* Willd. em diferentes níveis de adubação. **Cerne**, v. 6, n. 1, p. 83-88, 2000.

WANDER, P. R. **Utilização de resíduos de madeira e lenha como alternativas de energias renováveis para o desenvolvimento sustentável da região nordeste do Estado do Rio Grande do Sul.** 2001. 105 f. Dissertação (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.