

Foto: Edson Alves de Lima



## Impacto do teor de umidade e da espécie florestal no custo da energia útil obtida a partir da queima da lenha

*José Mauro Magalhães Ávila Paz Moreira<sup>1</sup>*  
*Edson Alves de Lima<sup>2</sup>*  
*Ives Clayton Gomes dos Reis Goulart<sup>3</sup>*

A madeira é amplamente usada como fonte de energia e calor, principalmente em sua forma bruta, tradicionalmente conhecida como lenha, tendo oferecido uma valiosa contribuição histórica para o desenvolvimento da sociedade (BRITO, 2007). Em países em desenvolvimento, ainda são poucas as alternativas desenvolvidas para geração de energia e calor que apresentem relação benefício/custo competitivas com a madeira (BUAINAIN; BATALHA, 2007).

Aproximadamente 58% da produção mundial de madeira nas últimas duas décadas se destinou a biomassa (energia). Ela participa atualmente com cerca de 10% da geração de energia primária na matriz energética brasileira (MOREIRA, 2011).

A produção nacional de madeira para lenha oriunda da silvicultura vem apresentando crescimento desde 2003, passando de 33,8 milhões de m<sup>3</sup> para 49 milhões de m<sup>3</sup> em 2010 (IBGE, 2012). Neste mesmo período, o preço real<sup>1</sup> médio do m<sup>3</sup> de lenha pago ao produtor no estado do Paraná aumentou 87%, passando de R\$ 17,71 m<sup>-3</sup> em 2003, para R\$ 33,17 m<sup>-3</sup> em 2010.

<sup>1</sup>O preço médio foi obtido pela divisão do valor da produção pela quantidade produzida da pesquisa da Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura realizada pelo IBGE. Os preços reais (R\$ 2010) foram estimados pela deflação dos valores de preço pelo IGP-DI Geral – centrado da Fundação Getúlio Vargas (IPEA, 2012).

O aumento real nos preços pagos aos produtores pela lenha de silvicultura evidencia uma escassez de lenha no mercado interno. Esta escassez de madeira incentiva a busca por formas de aumentar a eficiência da sua conversão em energia, bem como o desenvolvimento de alternativas para comparar o custo da energia obtida com a queima da lenha com outras fontes de energia (BRITO, 1993; LIMA, 2010). Algumas alternativas já foram desenvolvidas, umas visando comparar o seu custo e potencial com outras fontes de energia (BRITO, 1993), e outras para propor uma melhor estimativa do preço a ser pago pela madeira em função do seu potencial de liberação de energia para o sistema ao invés do seu volume empilhado (estéreo) (LIMA, 2010).

O potencial energético do volume empilhado da lenha é calculado por meio de um indicador que chamaremos de densidade energética (DE), o qual varia em função do poder calorífico útil (PCU) da madeira, sua densidade e fator de empilhamento. O PCU varia de acordo com o poder calorífico superior (PCS) da madeira e o seu teor de umidade no momento da queima (BRITO, 1993).

<sup>1</sup>Engenheiro Florestal, Doutor, Analista da Embrapa Florestas, josemauro@cnpf.embrapa.br

<sup>2</sup>Licenciado em Ciências Agrícolas, Doutor, Pesquisador da Embrapa Florestas, edson@cnpf.embrapa.br

<sup>3</sup>Engenheiro Agrônomo, Mestre, Analista da Embrapa Florestas, ives.goulart@cnpf.embrapa.br

Uma das maneiras mais eficientes de aumentar o ganho de energia da madeira é o manejo do seu teor de umidade (LIMA et al., 2008; LIMA, 2010), o qual apresenta uma relação inversamente proporcional com a quantidade de energia liberada pela sua queima para o sistema de produção.

A energia potencial que a queima da madeira proporciona é dada pelo seu poder calorífico, que pode ser apresentado de duas formas (BRITO, 1993): o PCS, que considera a energia gerada para que a água evaporada pela queima da madeira encontre-se em estado líquido (volume constante); e o poder calorífico inferior (PCI), onde a água encontra-se em estado gasoso (LIMA, 2010). Na prática, o PCI deve ser preferido (BRITO, 1993), mas o método comumente utilizado para obtenção do poder calorífico da madeira é o PCS.

## Metodologia de cálculo

De acordo com Brito (1993), as análises de PCS e PCI são diferenciadas pelo teor de hidrogênio na madeira, valor relativamente constante em todas as madeiras (em torno de 6%). Descontando-se do valor do PCS a quantidade de energia necessária para se retirar o hidrogênio da madeira, obtêm-se o valor do PCI (equação 1).

$$PCI = PCS - 324 \quad (1)$$

Onde:

PCI = poder calorífico inferior (kcal kg<sup>-1</sup>)

PCS = poder calorífico superior (kcal kg<sup>-1</sup>)

Durante o processo de combustão da madeira, parte da energia potencial é utilizada para evaporar a água nela contida, caso o seu teor de umidade não seja nulo. Esta energia não é disponibilizada para o sistema de produção, devendo ser subtraída da quantidade de energia que o sistema de produção recebe, restado o poder calorífico líquido (PCL) (BRITO, 1993) ou o PCU (LIMA et al., 2008), calculado através da equação 2 (BRITO, 1993). A quantidade de energia perdida em decorrência do teor de umidade da madeira varia em função do seu teor de umidade e do seu PCI.

$$PCU = PCI \times \frac{(100-U)}{100} - 6 \times U \quad (2)$$

Onde:

PCU = poder calorífico útil (kcal kg<sup>-1</sup>)

U = teor de umidade da madeira (% - kg/kg base úmida)

O PCU estabelece uma relação entre energia e massa (kcal kg<sup>-1</sup>), mas a comercialização da madeira normalmente é realizada com base em volume de madeira empilhada. Dessa forma, os valores da densidade da madeira e o fator de empilhamento irão influenciar a quantidade de energia potencialmente disponível para o sistema por estéreo (LIMA, 2010). O cálculo do potencial energético da madeira empilhada será realizado por meio da densidade energética (DE), cuja unidade será Gcal st<sup>-1</sup>.

A densidade básica (DB) é dada pela massa seca da madeira dividida pelo volume da madeira completamente saturada, sendo expressa pela unidade (kg m<sup>-3</sup>). A fórmula do fator de empilhamento, cuja unidade é (st m<sup>-3</sup>), está representada na equação 3.

$$FE = \frac{VE}{VS} \quad (3)$$

Onde:

FE = fator de empilhamento (st m<sup>-3</sup>)

VE = volume de madeira empilhado (m<sup>3</sup>)

VS = volume de madeira sólido (m<sup>3</sup>)

O preço da madeira é expresso em reais por metro estéreo (R\$ st<sup>-1</sup>). A DE é calculada por meio da equação 4. Para um melhor ajuste de escala, a unidade de energia é convertida em Gcal, multiplicando o seu denominador por 1.000.000.

$$DE = \frac{DB \times \left[ (PCS - 324) \times \frac{(100-U)}{100} - 6 \times U \right]}{FE \times 10^6} \quad (4)$$

Onde:

DE = densidade energética (Gcal st<sup>-1</sup>)

DB = densidade básica (kg m<sup>-3</sup>)

O custo da energia obtida a partir de um metro cúbico de madeira empilhada é calculado através da equação 5, que é expresso em R\$ Gcal<sup>-1</sup>.

$$CE = \frac{(\text{Preço} \times FE \times 10^6)}{DB \times \left[ (PCS - 324) \times \frac{(100-U)}{100} - 6 \times U \right]} \quad (5)$$

Onde:

CE = custo da energia (R\$ Gcal<sup>-1</sup>)

Preço = preço da madeira (R\$ st<sup>-1</sup>)

A DB e o PCS variam entre espécies, entre indivíduos da mesma espécie e até dentro de um mesmo indivíduo de acordo com a sua idade, altura e diâmetro. Entretanto, para facilitar as comparações e o processo de tomada de decisão sobre a aquisição de madeira para energia, consideraremos um valor padrão de DB e PCS para uma mesma espécie de madeira.

## Análise de sensibilidade

As análises da densidade energética e do custo da energia foram realizadas para seis principais matérias primas florestais utilizadas pelas cooperativas do Paraná para geração de energia, sendo: *Eucalyptus benthamii*, *E. camaldulensis*, *Corymbia citriodora*, *E. dunnii*, *E. grandis* e o híbrido *E. urograndis* (GOULART, 2012). Além destes, a bracatinga também foi considerada por ser uma importante espécie nativa explorada para produção de lenha na região sul do Brasil. Na Tabela 1 são apresentados os valores médios considerados de PCS e DB para as espécies florestais selecionadas.

**Tabela 1.** Poder calorífico superior (PCS) e densidade básica (DB) médios das espécies florestais consideradas.

Espécie florestal	DB (kg m <sup>-3</sup> )	PCS (kcal kg <sup>-1</sup> )
<i>Eucalyptus benthamii</i>	477 <sup>(a)</sup>	4681 <sup>(a)</sup>
<i>E. camaldulensis</i>	630 <sup>(a)</sup>	5085 <sup>(a)</sup>
<i>Corymbia citriodora</i>	730 <sup>(a)</sup>	4718 <sup>(a)</sup>
<i>E. dunnii</i>	550 <sup>(a)</sup>	4732 <sup>(a)</sup>
<i>E. grandis</i>	475 <sup>(a)</sup>	4650 <sup>(a)</sup>
<i>E. urograndis</i>	526 <sup>(a)</sup>	4523 <sup>(a)</sup>
<i>Mimosa scabrella</i>	560 <sup>(b)</sup>	4700 <sup>(b)</sup>

(a) Pereira et al.(2000); (b) Carvalho (2003).

O preço considerado para as análises foi obtido a partir de contatos telefônicos e conversas informais realizadas no mês de maio de 2012 com cooperativas paranaenses sobre o valor pago pelo estéreo de lenha entregue no comprador. O valor médio obtido é de R\$ 60 st<sup>-1</sup>, sendo o preço médio pago pelas cooperativas do leste do Paraná (R\$ 50 st<sup>-1</sup>) inferior ao valor pago pelas cooperativas do oeste (R\$ 75 st<sup>-1</sup>). Esta diferença é explicada em parte pelos custos com frete para

transporte da madeira, uma vez que a maioria dos plantios florestais do Paraná se situam na região leste do estado (ANUÁRIO..., 2011). O fator de empilhamento considerado é o mesmo para todas as espécies, sendo de 1,43 st m<sup>-3</sup>, valor normalmente adotado na prática (MACHADO; FIGUEIREDO-FILHO, 2003). A utilização deste valor fixo deve-se à falta de informações de valores calculados para cada espécie, nas condições consideradas no presente trabalho. A análise de sensibilidade considerou uma variação de teor de umidade das espécies florestais entre 20% e 60%. Tais valores são considerados razoáveis para a lenha seca ao ar livre.

A variação da DE, que quantifica a energia útil liberada para o sistema, por meio da combustão de um metro estéreo de lenha das diferentes matérias-primas ao longo dos teores de umidade considerados pode ser observada na Figura 1.

A Figura 1 demonstra o impacto no aumento de energia útil para o sistema ao se secar a madeira, ou quando se trabalha com matérias-primas diferentes. O ganho de densidade energética entre o menor e o maior teor de umidade considerado é muito semelhante para todas as espécies, sendo algo em torno de 143% de acréscimo entre os teores de umidade de 60% e 20%. Entretanto, em termos absolutos, o ganho em densidade energética é maior em madeiras com maior densidade básica, variando de 0,66 Gcal st<sup>-1</sup> (*E. benthamii* e *E. grandis*) a 1,02 Gcal st<sup>-1</sup> (*C. citriodora*). Tais resultados indicam que é possível superar o dobro da densidade energética da madeira pelo manejo do seu teor de umidade.

Na Figura 2 é apresentada a variação do custo da energia útil liberada para o sistema de produção, por meio da combustão de um metro estéreo de lenha das diferentes matérias primas ao longo dos teores de umidade considerados.

O decréscimo no custo da energia apresenta comportamento não linear para todas as espécies estudadas, diminuindo a taxas decrescentes. Isto significa que os ganhos econômicos obtidos a partir da secagem da madeira vão decrescendo à medida que o seu teor de umidade vai caindo.

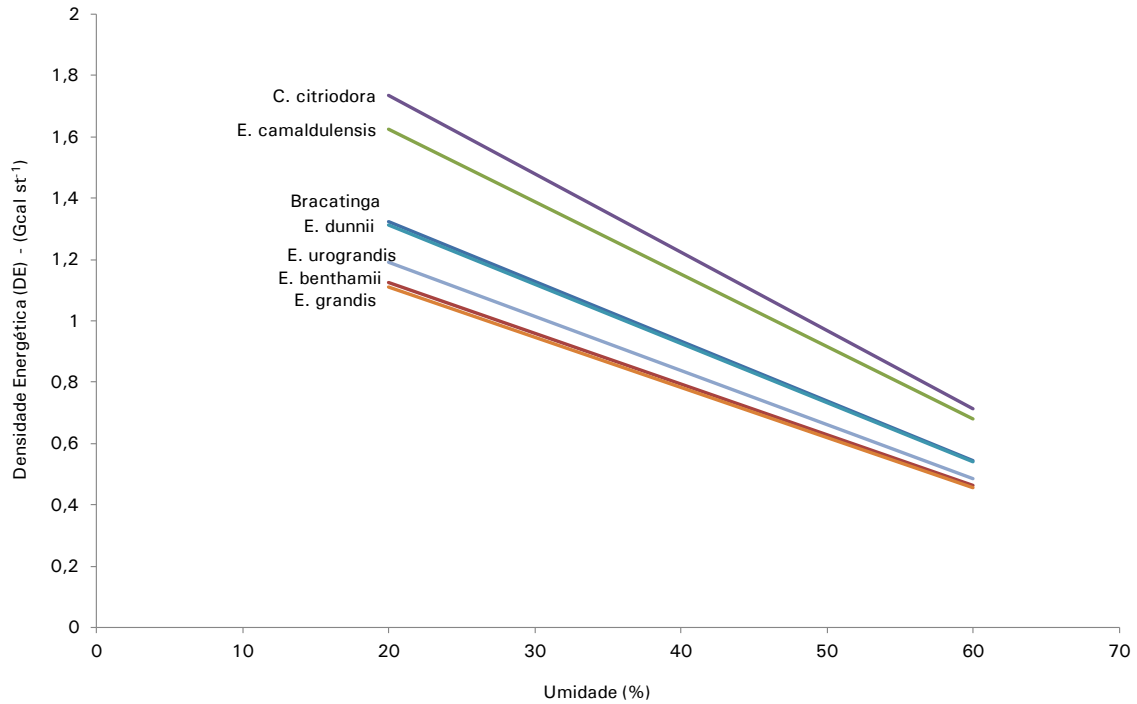


Figura 1. Análise de sensibilidade da DE obtida com as diferentes matérias-primas entre teores de umidade de 20% a 60%.

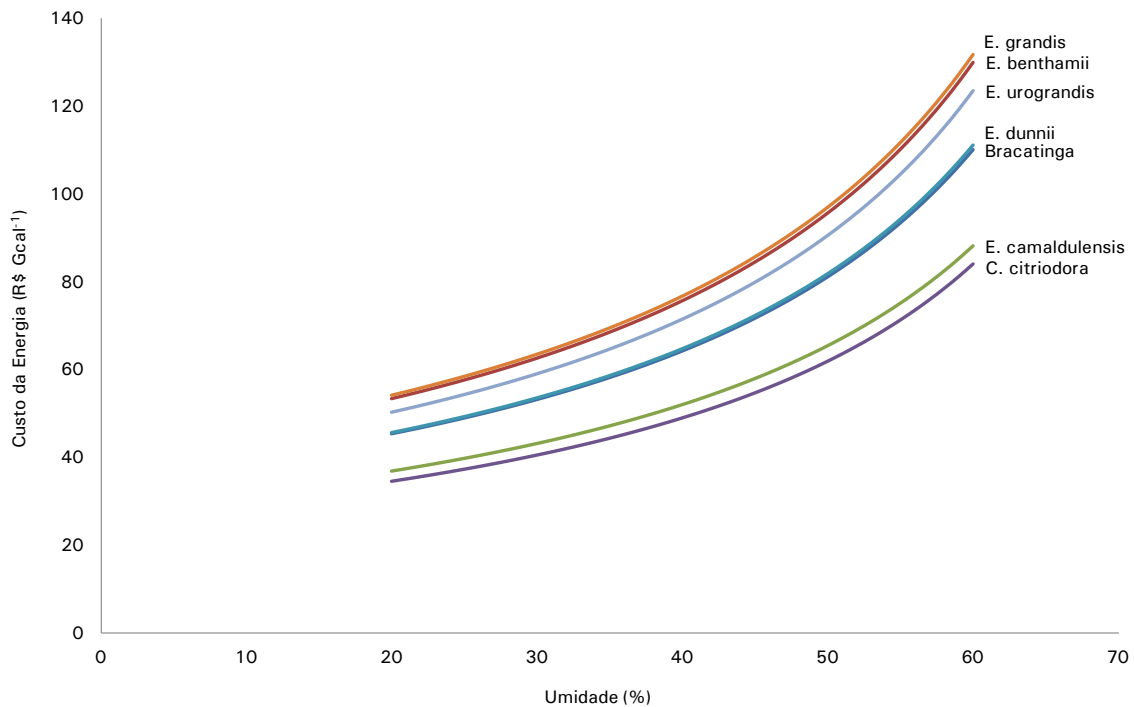


Figura 2. Análise de sensibilidade do custo da energia obtida com as diferentes matérias primas entre teores de umidade de 20% a 60%.

## Conclusões

Existe uma diferença significativa entre a densidade energética do volume de lenha empilhada a partir de diferentes espécies florestais e teores de umidade da madeira.

A secagem da madeira pode chegar a dobrar a quantidade de energia disponibilizada para o sistema, e o ganho absoluto é maior para madeiras com maior densidade básica.

O custo da energia obtida pela queima de um estêreo de madeira decresce com a diminuição do

teor de umidade da madeira, mas este decréscimo é não linear e diminui a taxas decrescentes.

Este trabalho apresenta informações que visam orientar a decisão da compra de madeira para energia, particularmente a lenha, para os consumidores deste produto.

Os produtores de florestas para energia, sejam elas plantadas ou nativas manejadas, devem incluir a produtividade das espécies na sua análise para gerar um indicador de produção de energia (ou rentabilidade) por unidade de área. Tal consideração é necessária porque a produtividade pode variar com as espécies, e a baixa densidade energética, em termos de volume, pode ser compensada pela maior produtividade da espécie, gerando uma maior quantidade de energia por hectare.

## Referências

- ANUÁRIO Estatístico da ABRAF 2011: ano base 2010. Brasília, DF: ABRAF, 2011. 130 p.
- BRITO, J. O. Expressão da produção florestal em unidades energéticas. In: CONGR ESO FLORESTAL PANAMERICANO, 1.; CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 7., 1993, Curitiba. **Floresta para o desenvolvimento**: política, ambiente, tecnologia e mercado: anais. São Paulo: SBS; [S.I.]: SBEF, 1993. v. 3. p. 280-282.
- BRITO, J. O. O uso energético da madeira. **Estudos Avançados**, São Paulo, SP, v. 21, n. 59, p. 185-193, jan./mar. 2007.
- BUAINAIN, A. M.; BATALHA, M. O. **Cadeia produtiva de madeira**. Brasília, DF: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento: IICA, 2007. 82 p. (MAPA. Agronegócios, v. 6).
- CARVALHO, P. E. R. **Espécies arbóreas brasileiras**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Colombo: Embrapa Florestas, 2003. v. 1. 1039 p.
- GOULART, I. C. G. dos R. **Diagnóstico preliminar das demandas por tecnologias florestais em cooperativas agropecuárias do estado do Paraná**. Colombo: Embrapa Florestas, 2012. 37 p. (Embrapa Florestas. Documentos, 234). No prelo.
- IBGE. **Sistema IBGE de recuperação automática: SIDRA**. Rio de Janeiro RJ, 2012. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br>>. Acesso em: 25 abr. 2012.
- IPEA. **IPEADATA**: índice geral de preços: disponibilidade interna (IGP-DI). Disponível em: <[www.ipeadata.gov.br](http://www.ipeadata.gov.br)>. Acesso em: 01 jun 2012.
- LIMA, E. A. de; ABDALA, E. M.; WENZEL, A. A. **Influência da umidade no poder calorífico superior da madeira**. Colombo: Embrapa Florestas, 2008. 3 p. (Embrapa Florestas. Comunicado técnico, 220).
- LIMA, E. A. de. **Alternativa para estimar o preço da madeira par a energia**. Colombo: Embrapa Florestas, 2010. 3 p. (Embrapa Florestas. Comunicado técnico, 260).
- MACHADO, S. do A.; FIGUEIREDO-FILHO, A. **Dendrometria**. Curitiba, 2003. 309 p.
- MOREIRA, J. M. M. A. P. Potencial e participação das florestas na matriz energética. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 68, p. 363-372, abr./jun. 2011.
- 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, 2000. 113 p. (Embrapa Florestas. Documentos, 38).

### Comunicado Técnico, 293

Embrapa Florestas  
Endereço: Estrada da Ribeira Km 111, CP 319  
Colombo, PR, CEP 83411-000  
Fone / Fax: (0\*\*) 41 3675-5600  
E-mail: sac@cnpf.embrapa.br



Ministério da  
Agricultura, Pecuária  
e Abastecimento



1ª edição  
Versão eletrônica (2012)

### Comitê de Publicações

Presidente: *Patrícia Póvoa de Mattos*  
Secretária-Executiva: *Elisabete Marques Oaida*  
Membros: *Álvaro Figueredo dos Santos, Antonio Aparecido Carpanezi, Claudia Maria Branco de Freitas Maia, Dalva Luiz de Queiroz, Guilherme Schnell e Schuhli, Luís Cláudio Maranhão Froufe, Marilice Cordeiro Garrastazu, Sérgio Gaiad*

### Expediente

Supervisão editorial: *Patrícia Póvoa de Mattos*  
Revisão de texto: *Patrícia Póvoa de Mattos*  
Normalização bibliográfica: *Francisca Rasche*  
Editoração eletrônica: *Rafaele Crisóstomo Pereira*