

CORRELAÇÃO ENTRE TEOR DE UMIDADE E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE RESÍDUOS DE *PINUS TAEDA* EM DIFERENTES IDADES¹

Thielly Schmidt Furtado², Juliana Ceccato Ferreira³, Martha Andreia Brand⁴ e Márcio Daian Neves⁵

RESUMO – O crescente uso da biomassa florestal para a geração de energia leva empresas do setor de base florestal a preocuparem-se com a inclusão desta opção no uso múltiplo das florestas. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho foi verificar a influência da idade de árvores de *Pinus taeda* nas propriedades energéticas de seus componentes, e a relação existente entre o teor de umidade do material queimado e seu potencial de geração de energia útil para um sistema energético, de modo a determinar a idade ideal para se intervir nos plantios, otimizando o uso de todos os componentes das árvores, sem o esgotamento do solo. Foram realizadas análises energéticas nas folhas, galhos, copa e casca de *Pinus taeda* com 10, 12, 14 e 24 anos em delineamento experimental completamente casualizado sob esquema fatorial. Os resultados demonstraram que todas as idades podem ser utilizadas para fins de geração de energia. Houve correlação negativa significativa entre poder calorífico líquido e teor de umidade, possibilitando o ajuste de equação para a determinação do poder calorífico líquido em função do teor de umidade dos componentes avaliados nas diferentes idades.

Palavras-chave: Resíduos, Composição da madeira e Energia.

CORRELATION BETWEEN MOISTURE CONTENT AND ENERGY EFFICIENCY OF *PINUS TAEDA*'S RESIDUES AT DIFFERENT AGES

ABSTRACT – The increasing use of forest biomass for energy generation leads companies to the forestry industry to be concerned with the inclusion of energy generation in the multiple use of forests. In this sense, the objective was to determine the influence of old trees of *Pinus taeda* in the energetic properties of its components, and the relationship between the moisture content of burned material and its potential for generating useful energy for a system of energy, order to determine the ideal age to intervene plantations, optimizing the use of all components of the trees without soil exhaustion. Energy analysis were performed on leaves, twigs, bark and canopy of *Pinus taeda* with 10, 12, 14 and 24 years in a completely randomized design in factorial arrangement. The results showed that the age of 24 years achieved the best values of moisture content, ash content and net calorific value, being the one that has better energy efficiency. A significant negative correlation between net calorific value and moisture content, allowing the adjustment equation for the determination of net calorific value depending on the moisture content of the components evaluated at different ages.

Keywords: Residues, Wood's composition and Energy.

¹ Recebido em 24.08.2009 e aceito para publicação em 19.04.2012.

² Prefeitura Municipal de Botuverá, PMB, Brasil. E-mail: <thielly.furtado@gmail.com>.

³ Programa de Pós-Graduação em Bioenergia pela Universidade Federal do Paraná, UFPR, Brasil. E-mail: <mana.juli@yahoo.com.br>

⁴ Universidade do Estado de Santa Catarina, UDESC, Brasil. E-mail: <a2mab@cav.udesc.br>.

⁵ Tractebel Energia S.A, TBLE, Brasil. E-mail: <mneves@tractebelenergia.com.br>.

1. INTRODUÇÃO

A madeira é um material orgânico, e os seus constituintes químicos estão diretamente relacionados com as suas propriedades químicas, físicas e energéticas (SILVA et al., 2005). É também considerada um biopolímero natural, formado essencialmente por celulose, o principal componente da parede celular vegetal, polioses, as quais com a celulose formam a holocelulose; e lignina, um polímero aromático natural e de alto peso molecular responsável pela dureza e rigidez da parede celular, além dos extrativos, chamados de componentes acidentais que não fazem parte da parede celular, mas que, muitas vezes, determinam o uso comercial da madeira. Existem também os componentes inorgânicos, denominados cinzas, as quais são compostas por potássio, cálcio, magnésio, pequenas quantidades de sódio, manganês, ferro e alumínio, além de ânions como carbonatos, silicatos, cloretos, sulfatos e traços de zinco, cobre e cromo, entre outros (CARDOSO et al., 2001).

As composições física, mecânica e anatômica da madeira variam de maneira significativa, especialmente devido à idade da árvore, fatores genéticos e ambientais dentro de uma mesma espécie. Essas variações ocorrem também dentro de um mesmo indivíduo quando se consideram, por exemplo, cerne e alburno, lenho tardio e inicial (TRUGILHO et al., 1996).

Ainda segundo Trugilho et al. (1996), a madeira apresenta rápido aumento em densidade e comprimento de fibras da fase juvenil até a maturidade, quando atinge determinada estabilidade. Isso ocorre pelo fato de, na maturidade, ser maior a proporção de lenho adulto. O lenho juvenil, que se encontra próximo à medula e nas partes mais altas da árvore, apresenta mais lignina e, conseqüentemente, menos celulose em sua composição, menor espessura de parede, maior diâmetro celular e menor comprimento de traqueides. Em *Pinus taeda*, o período de produção de madeira juvenil varia entre 7 e 11 anos na sua região de origem, e nas condições tropicais do Brasil já há produção de madeira adulta após os 8 anos de idade (JANKOWSKY, 1979).

As variações na composição química da madeira, ou seja, na proporção de holocelulose, lignina, extrativos e cinzas, assim como as mudanças na conformação anatômica e nas características físicas, especialmente na densidade, influenciam sobremaneira as propriedades

energéticas dos resíduos gerados ao longo do processo de industrialização das toras.

As características utilizadas para qualificar energeticamente um material são teor de umidade (TU), teor de cinzas (TC) e poder calorífico superior (PCS). O TU, dado em porcentagem (%), expressa a quantidade de água presente no material em relação a seu peso total. Por fim, o TC, também expresso em porcentagem, representa o conteúdo de material inorgânico presente na madeira. O PCS é dado em calorias por grama (cal/g) ou quilocaloria por quilograma (kcal/kg) e expressa a quantidade de energia liberada por unidade de massa do combustível, considerando que o material está completamente seco e as condições de queima são ideais, sendo influenciados exclusivamente pela composição química do material. Já o poder calorífico líquido (PCL) é a quantidade de energia útil gerada na combustão do material, sendo determinado a partir do PCS e influenciado pelo TC e pelo TU do material no momento da queima.

A partir do ano 2000, tem-se verificando crescimento do uso da biomassa florestal para a geração de energia. Desse modo, surge nas empresas do setor de base florestal a preocupação em adequar o manejo dos plantios, visando à inclusão da geração de energia no uso múltiplo das florestas. Assim, a questão que vem sendo discutida nas empresas florestais e nas entidades de pesquisa, objeto deste trabalho, é a definição da idade ideal para intervenção nos plantios de modo a otimizar o uso das árvores, com a menor exportação de nutrientes possível, de modo a evitar o comprometimento do potencial produtivo dos ciclos futuros.

Segundo Soares et al. (2003), a tendência atual é que as florestas plantadas passem a ser utilizadas segundo o conceito de florestas para multiprodutos, sendo a opção que apresenta maior possibilidade de remuneração a geração de energia a partir de subprodutos florestais.

Daí surgiu a necessidade de realizar este trabalho, que tem como objetivo verificar a influência da idade de plantios de *Pinus taeda* e das mudanças por ela causadas nas propriedades energéticas dos componentes das árvores e também a relação entre o teor de umidade do material queimado e seu potencial de geração de energia útil para um sistema energético, através do poder calorífico líquido.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O material utilizado foi coletado em povoamentos de *Pinus taeda* com idades de 10, 12, 14 e 24 anos da empresa Flobasa, pertencente ao grupo Battistella, na cidade de Bocaina do Sul. Cinco árvores foram derrubadas em cada povoamento dentro de uma parcela de 10 x 10 m. De cada uma das árvores foram coletados, separadamente, galhos, acículas, copa (parte do tronco com diâmetro inferior a 8 cm, sem galhos ou folhas) e discos na base e aos 25, 50, 75 e 100% da altura comercial (até o diâmetro mínimo de 8 cm) para a retirada da casca.

No laboratório, o material foi devidamente preparado para as análises das propriedades energéticas, seguindo as normas: NBR 13999 para teor de cinzas, NBR 14929 para teor de umidade e DIN 51900 para poder calorífico. Foi utilizado o delineamento experimental inteiramente casualizado, em esquema fatorial 4 x 4 (4 idades x 4 componentes das árvores) com cinco repetições.

Os dados foram submetidos à análise de variância e posteriormente ao teste de médias para determinação das melhores idades para as variáveis em estudo, além de verificação da correlação entre PCL e TU e ajuste de uma função de regressão para determinação do PCL em função do TU. As análises estatísticas foram realizadas com o auxílio do software SAS. Foram testadas cinco equações de regressão dos tipos linear, exponencial, logarítmica e hipérbole I, sendo selecionada aquela que apresentou o maior coeficiente de determinação (R^2), menores coeficientes de variação (CV) e erro-padrão da estimativa (Sx).

3. RESULTADOS

Na Tabela 1 é apresentada a análise de variância global do experimento. Nela podem ser constatados efeitos significativos de todos os fatores dentro das fontes de variação Idade e Componente. A interação Idade x Componente foi significativa apenas para PCL. Todas as variáveis, excetuando-se o TC, apresentaram coeficiente de variação baixo, refletindo a precisão na realização do experimento.

Na Tabela 2 são apresentados os testes de médias, considerando-se como fonte de variação a idade e utilizando o teste de Tukey – Kramer .

Na Tabela 3 são apresentados os testes de médias, considerando-se como fonte de variação o fator componente e utilizando o teste de Tukey – Kramer .A idade de 14 anos conferiu o maior valor de TC ao material, enquanto o menor valor foi apresentado pela idade 24, entretanto esses valores não diferem significativamente de 10 e 14 anos. O componente acícula apresentou valor de TC significativamente superior aos demais.

Em relação ao TU, o melhor resultado, menor valor, foi obtido pela idade 24, porém não diferiu significativamente de 12 e 14 anos. A casca apresentou o menor valor de TU, seguida pelo componente galho e acícula e copa, estas últimas sem diferenças significativas a 5% de probabilidade.

Quanto à variável PCS, o melhor valor foi conferido pela idade 24, entretanto não houve diferença significativa de 12 anos. Acícula e casca apresentaram valores significativamente superiores a copa e galho.

Tabela 1 – Resumo da análise de variância global do poder calorífico superior (PCS), poder calorífico líquido (PCL), teor de cinzas (TC) e teor de umidade (TU).

Table 1 – Summary of analysis of variance for overall power calorific value (GCV), calorific liquid (PCL) ash content (TC) and content (TU).

FV	Quadrados Médios			
	Poder calorífico superior (PCS)	Poder calorífico líquido (PCL)	Teor de cinzas (TC)	Teor de umidade (TU)
Idade (I)	47863,9*	273597,1*	2,2*	73,3*
Componente (C)	355647,5*	1787024,1*	20,0*	583,3*
Interação IC	12035,9 ^{NS}	165645,9*	0,6 ^{NS}	38,6 ^{NS}
Resíduo	9982,9	73615,5	0,51	24,1
CV (%)	2,0	16,7	46,5	8,4

*Significativo a 5% de probabilidade de erro, pelo teste F.

^{NS}Não significativo.



Na Tabela 4 é apresentado o teste de médias da variável PCL, considerando-se a variação da idade dentro do componente e vice-versa.

Dentro da idade de 10 anos, não houve variação em função do componente. Na idade de 12 anos,

Tabela 2 – Estudo do efeito simples do fator idade sobre as variáveis teor de cinzas (TC), teor de umidade (TU) e poder calorífico superior (PCS).

Table 2 – Study of the simple effect of age factor on the variable component ash content (TC), moisture content (TU) and calorific value (GCV).

Idade	Média		
	TC	TU	PCS
10	1,46 ab	58 a	4979 b
12	1,29 ab	54 ab	5039 ab
14	1,89 a	56 ab	4998 b
24	0,76 b	52b	5135 a

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem significativamente pelo teste de Tukey-Kramer.

Tabela 3 – Estudo do efeito simples do fator componente sobre as variáveis teor de cinzas (TC), teor de umidade (TU) e poder calorífico superior (PCS).

Table 3 – Study of the simple effect of component factor variables about ash content (TC), moisture content (TU) and calorific value (GCV).

Componente	Média		
	TC	TU	PCS
Acícula	2,97 a	59 a	5148 a
Casca	0,60 b	42 c	5215 a
Copa	0,89 b	63 a	4892 b
Galho	0,95 b	55 b	4893 b

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem significativamente pelo teste de Tukey-Kramer.

Tabela 4 – Estudo dos efeitos simples dos fatores componente e idade sobre a variável poder calorífico líquido (PCL).

Table 4 – Simple study of the effects of component factors and age on the variable net calorific value (GCV).

Componente	Média do PCL (kcal kg ⁻¹)			
	Idade			
	10	12	14	24
Acícula	A 1424 <u>a</u>	A 1592 <u>ab</u>	A 1728 <u>ab</u>	A 1749 <u>bc</u>
Casca	A 2323 <u>a</u>	A 2487 <u>a</u>	A 2502 <u>a</u>	A 2801 <u>a</u>
Copa	A 1361 <u>a</u>	A 1306 <u>b</u>	A 1266 <u>b</u>	A 1374 <u>c</u>
Galho	B 1428 <u>a</u>	A 2029 <u>a</u>	B 1410 <u>b</u>	A 2138 <u>ab</u>

Letras maiúsculas na linha comparam as idades dentro de cada componente a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey-Kramer. Letras minúsculas sublinhadas em itálico na coluna comparam os componentes dentro de cada idade a 5% de probabilidade, pelo teste Tukey-Kramer.

casca e galho apresentaram valores superiores ao da copa, porém estatisticamente iguais aos da acícula. Na idade 14, o componente casca foi superior a copa e galho. Já na idade 24 também a casca apresentou valor superior, enquanto copa exibiu valor significativamente inferior.

Não houve diferenças significativas em função da idade dentro dos componentes acícula, casca e copa. Apenas no componente galho as idades 12 e 24 anos foram significativamente superiores às demais.

Na Tabela 5, mostra-se a correlação entre as propriedades energéticas dos componentes de *Pinus taeda* em diferentes idades. Entre TU e PCL, pode-se verificar a existência de correlação negativa. Entretanto, apenas a correlação do TU sobre o PCL é considerada elevada.

Tabela 5 – Coeficiente de correlação de Pearson para poder calorífico líquido (PCL) em relação ao poder calorífico superior (PCS), teor de cinzas (TC) e teor de umidade (TU), em árvores de *Pinus taeda* em diferentes idades. Lages, SC – 2008/2009.

Table 5 – Pearson correlation coefficient superior calorific power (PCS), net calorific power (PCL), ash content (TC) and moisture content (TU) of *Pinus taeda* trees at different ages. Lages, SC – 2008/2009.

Variáveis de correlação	PCL
TU	-0,9404*
TC	-0,1392 ^{NS}
PCS	0,3591*

*Significativo a 5% de probabilidade de erro.

^{NS} Não significativo.

A equação ajustada foi do tipo linear quadrática e está apresentada a seguir.

$$y = b_0 + b_1 \times x^2$$

Os valores obtidos para o intercepto (b_0) e b_1 são apresentados na equação abaixo.

$$PCL = 3423,1043 - 0,5196 \times TU^2$$

4. DISCUSSÃO

Lúcio et al. (2010) demonstraram que o teor de cálcio (Ca) é duas vezes maior nas acículas em relação aos galhos. Para potássio (K), a relação é de sete vezes para fósforo (P), 10 para nitrogênio (N), 8 para magnésio (Mg) e 2 para enxofre (S). O trabalho de Furtado et al. (2009) demonstra que o TC das acículas pode chegar a valores entre 2 e 4%, enquanto para galhos e copa fica entre 0,3 e 1,1%. Esses estudos corroboram os maiores valores de TC encontrados na acícula em relação aos demais, neste estudo.

Schumacher e Bonacian (2006) afirmaram que a concentração de nutrientes é maior no componente acícula, seguida pela casca e ponteiro, devido à tendência que a maioria dos nutrientes minerais tem de concentrar-se nas estruturas mais novas da planta, onde há maior atividade metabólica. Essa afirmação explica o maior valor de TC no componente acícula e o inverso para a idade de 24 anos, demonstrando que as árvores com idade mais avançada não acumulam tantos nutrientes nas acículas, causando menor interferência no processo de ciclagem de nutrientes do solo.

Os valores de TU obtidos são adequados para a utilização desses resíduos como combustível. Quirino et al. (2005) afirmaram que o conteúdo de umidade máximo que uma madeira pode ter para tal fim é de 65% a 70% em base úmida. Essa umidade causa perda de calor nos gases de combustão em forma de vapor de água, já que a umidade da madeira evapora e absorve energia em combustão. Acima disso, o dispêndio de energia para a eliminação da água da madeira é superior à sua capacidade de geração e a ignição é impedida. Os maiores valores encontrados para acícula e copa e para as menores idades são determinados pela sua maior atividade fisiológica.

O PCS é diretamente influenciado pela composição química do material queimado, inclusive pelo TC. Sendo assim, o maior valor conferido pela idade de 24 anos tem relação com o baixo TC. Conforme Silva et al. (2005),

o teor de lignina da madeira eleva-se com o aumento da idade e o contrário ocorre com a holocelulose. O poder calorífico da lignina é superior ao das holoceluloses. Desse modo, indivíduos mais velhos apresentam maior poder calorífico.

Já o elevado PCS encontrado no componente acícula é explicado pela presença de resinas em sua composição.

Os resultados encontrados para PCL indicam que não ocorrem alterações significativas nos componentes acícula, casca e copa ao longo da vida da árvore, quando consideradas características que influenciam a eficiência energética do material.

O material obtido em todas as fases de vida de um povoamento pode ser utilizado para geração de energia sem grandes variações de qualidade de material.

A equação ajustada para a obtenção do PCL em função do TU apresentou coeficiente de determinação de 88%, erro-padrão da estimativa de 148 kcal e coeficiente de variação de 9%, o que significa que possui boa estimativa dos valores de PCL calculados a partir do TU. O PCL varia de forma linear, como poder ser observado na Figura 1.

Este resultado é condizente com a literatura. Silva et al. (2005) e Trugilho et al. (1996), trabalhando com diferentes espécies de eucalipto, constataram tendências lineares ou quadráticas para interações semelhantes às estudadas neste trabalho na composição química da madeira.

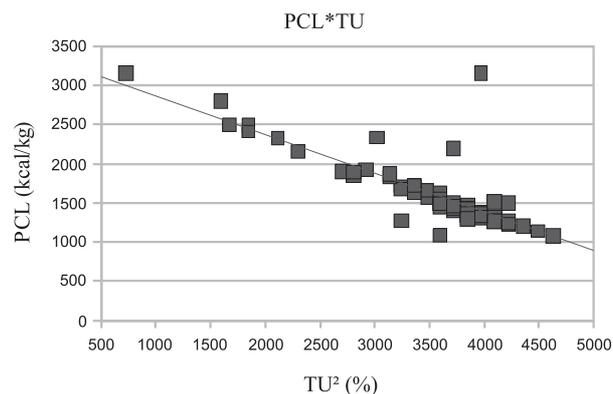


Figura 1 – Curva de regressão de poder calorífico líquido (PCL) e função do teor de umidade (TU) na segunda potência.

Figure 1 – Regression curve of net calorific value (PCL) and function of moisture content (TU) in the second power.

5. CONCLUSÕES

1) O material obtido em todas as fases de vida de um povoamento pode ser utilizado para geração de energia sem grandes variações de qualidade de material.

2) Existe alta correlação negativa entre poder calorífico líquido e teor de umidade.

2) A equação que mais se ajustou aos dados foi a linear quadrática.

6. AGRADECIMENTOS

À Tractebel S.A., pelo apoio financeiro para a realização das atividades do projeto; à Flobasa, por permitir o acesso a seus povoamentos e o uso de seu material; à EMBRAPA Florestas, pela concessão de bolsas a dois dos autores; e à Universidade do Planalto Catarinense – UNIPLAC, pela utilização de suas dependências e concessão de bolsas a integrantes do grupo de pesquisa.

7. REFERÊNCIAS

- CARDOSO G. V. et. al. Adequação de metodologia amostral de madeira de *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus globulus* para determinação do teor de cinzas. In: CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL, SÃO PAULO, BRASIL, 34., 2001. Disponível em: <<http://www.celso-boelkel.com.br/artigos/ABTCP/abtcp.%20para%20site%202001a.pdf>>
- FURTADO, T. S. et al. Influência da idade da árvore na eficiência energética dos resíduos. In: CONGRESSO BRASILEIRO SOBRE FLORESTAS ENERGÉTICAS, 1., 2009, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: Embrapa Florestas, 2009.
- JANKOWSKY, I. P. **Madeira juvenil:** formação e aproveitamento industrial.. Piracicaba: IPEF, 1979. (Circular Técnica, 81)
- LÚCIO, A. D. C. et al. Limites de precaução e de controle em análises nutricionais de espécies florestais. **Revista Árvore**, v.34, n.3, p.529-537, 2010. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-67622010000300017&script=sci_arttext>
- QUIRINO, W. F. et al. Poder calorífico da madeira e materiais lignocelulósicos. **Revista da Madeira**, n. 89, p. 100-106, abr. 2005. Disponível em: <<http://www.funtec.org.br/arquivos/podercalorifico.pdf>>
- SCHUMACHER, M. V.; BONACINA, D. M. Quantificação da biomassa e nutrientes em povoamentos de pinus. **Revista da Madeira**, n. 99. set. 2006. Disponível em: <http://www.remade.com.br/revistadamaadeira_materia.php?num=962&subject=Nutrientes&title=Quantifica%20da%20biomassa%20e%20nutrientes%20em%20povoamentos%20de%20pinus>
- SILVA, J. C. et. al. Influência da idade e da posição ao longo do tronco na composição química da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill. ex. Maidem. **Revista Árvore**, v.29, n.3, p.455-460, 2005. Disponível em: <www.scielo.br/pdf/rarv/v29n3/a13v29n3.pdf>
- SOARES, T. S. et al. Otimização de multiprodutos em povoamentos florestais. **Revista Árvore**, v.27, n.6, p.811-820, 2003.
- TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; MENDES, L. M. **Influência da idade nas características físico-químicas e anatômicas da madeira de *Eucalyptus saligna***. Lavras, MG: Universidade Federal de Lavras, 1996. Disponível em: <www.dcf.ufla.br/cerne/artigos/16-02-20099844v2_n1_artigo%2009.pdf>