

Qualidade da Lignina Kraft e de resíduos lignocelulósicos para uso energético

Sílvio Vaz Jr.
Bianca Moreira Barbosa



**Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Agroenergia
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**

**BOLETIM DE PESQUISA
E DESENVOLVIMENTO
28**

Qualidade da lignina kraft e de resíduos
lignocelulósicos para uso energético

*Sílvio Vaz Jr.
Bianca Moreira Barbosa*

Embrapa Agroenergia
Brasília, DF
2022

Embrapa Agroenergia
Parque Estação Biológica (PqEB), s/nº
Ed. Embrapa Agroenergia
Caixa Postal 40315
CEP 70770-901, Brasília, DF
Fone: +55 (61) 3448-1581
Fax: +55 (61) 3448-1589
www.embrapa.br/agroenergia
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Comitê Local de Publicações

Presidente
Patricia Verardi Abdelnur
Secretária-executiva
Lorena Costa Garcia Calsing

Membros
Alexandre Nunes Cardoso
Betulia de Moraes Souto
João Ricardo Moreira de Almeida
Leonardo Fonseca Valadares
Melissa Braga
Patricia Abrao de Oliveira Molinari
Priscila Seixas Sabaini

Revisão de texto
Everaldo Correia da Silva Filho

Normalização bibliográfica
Márcia Maria Pereira de Souza
(CRB-1/1441)

Rejane Maria de Oliveira

Projeto gráfico
Carlos Eduardo Felice Barbeiro

Editoração eletrônica e capa
Júlio César da Silva Delfino

Foto da capa
Sílvio Vaz Jr.

1ª edição
Publicação digital: PDF

Todos os direitos reservados

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Embrapa, Superintendência de Comunicação

Vaz Jr., Sílvio.

Qualidade da lignina kraft e de resíduos lignocelulósicos para uso energético / Sílvio Vaz Jr., Bianca Moreira Barbosa. – Brasília, DF : Embrapa Agroenergia, 2022.

PDF (15 p.) – (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento / Embrapa Agroenergia, ISSN 2177-0395 ; 28)

1. Energia da Biomassa. 2. Licor negro. 3. Densidade energética. 4. Título. 5. Série.

CDD (21. ed.) 333.72

Rejane Maria de Oliveira Cechinel Darós (CRB-1/12913) © Embrapa, 2022

Sumário

Resumo	5
Abstract	6
Introdução.....	7
Material e Métodos	8
Resultados e Discussão	11
Conclusões.....	13
Agradecimentos.....	13
Referências.....	13

Qualidade da lignina kraft e de resíduos lignocelulósicos para uso energético

Sílvio Vaz Jr.¹

Bianca Moreira Barbosa²

Resumo – O objetivo deste trabalho foi caracterizar e avaliar o potencial de uso da lignina kraft e de resíduos lignocelulósicos provenientes de processamento industrial, para geração de energia. Para tanto, foram avaliadas as características físicas, químicas e energéticas das biomassas de eucalipto e resíduo de milho e de lignina kraft comercial. Foram encontrados melhores densidades energéticas nos resíduos de milho e lignina kraft, e os resíduos de eucalipto foram os que apresentaram menor densidade energética. Desse modo, é esperado que a combinação de resíduos lignocelulósicos e de lignina kraft tenha um grande potencial na sua conversão em energia.

Termos para indexação: energia da biomassa, licor negro, densidade energética.

¹ Químico, doutor em Química Analítica, pesquisador da Embrapa Agroenergia, Brasília, DF.

² Química, doutora em Agroquímica, técnica de nível superior da Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa, MG.

Quality of kraft lignin and lignocellulosic residues for energetic usages

Abstract – The objective of this work was to characterize and evaluate the potential use of kraft lignin and lignocellulosic residues from industrial processing for energy generation. Therefore, the physical, chemical and energy characteristics of eucalyptus biomass and corn residue and commercial kraft lignin were evaluated. Better energy characteristics were found in the residues of corn and kraft lignin, and the residues of eucalyptus were the ones with the lowest energy density. Thus, it is expected that the combination of lignocellulosic residues and kraft lignin has a great potential for converting it into energy.

Index terms: biomass energy, black liquor, energetic density.

Introdução

Na busca por novas fontes de energia para competir com os combustíveis atualmente disponíveis no mercado, os resíduos lignocelulósicos tornaram-se uma das opções mais promissoras como formas alternativas de energia. Os resíduos derivados de biomassa são comumente usados para fins de combustível básico em instalações fabris (para produzir energia por meio da queima desses resíduos), mas também têm sido usados como fontes de processos bioenergéticos de matéria-prima, desenvolvimento de pellets. Isso irá permitir o transporte de maior quantidade de massa e energia, além de manter a integridade dos biocombustíveis durante o manuseio e uso (Stolarski et al., 2013).

A atividade das indústrias de base florestal, principalmente as serrarias, tem como consequência a elevada quantidade de resíduos gerados. Tais resíduos não só representam um problema econômico, mediante o desperdício, como também um sério problema ambiental, com a geração de passivos a serem tratados. Esses problemas podem ser revertidos em soluções se forem adotadas medidas eficientes de gerenciamento, para que os resíduos sejam transformados por meio de técnicas simples e de baixo custo em produtos energéticos, como pellets, por exemplo. Dessa forma, a sua utilização é estratégica para poupar o uso de madeira virgem e para reduzir o volume de resíduos gerados, além de colaborar para o aumento da receita da indústria, contribuindo para os conceitos de bioeconomia e de economia circular (Vaz Junior, 2020).

Uma alternativa atrativa à indústria de celulose é extrair parte da lignina do licor negro para comercialização como aditivos, os quais podem ser usados na produção de pellets, briquetes, resinas fenólicas, dispersantes e surfactantes (Lora et al., 2002; Gosselink et al., 2004).

A lignina kraft da indústria de polpa celulósica é atualmente empregada como combustível no ciclo de recuperação química do licor negro kraft, tendo em vista seu potencial de geração de energia térmica. Todavia, com o aumento da produtividade, a elevada quantidade de licor negro gerado ultrapassa a capacidade de queima na caldeira de recuperação, constituindo um gargalo para as indústrias de celulose por gerar grande quantidade de resíduo (Pereira et al., 2016; Saal et al., 2017; Boschetti et al., 2019).

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi caracterizar e avaliar o potencial de uso da lignina kraft e de resíduos lignocelulósicos provenientes de processamento industrial, para a geração de energia.

Material e Métodos

A amostra comercial de lignina kraft foi preparada pelo processo LignoBoost e fornecida por uma fábrica-piloto de papel e celulose localizada em São Paulo, Brasil. O processo de precipitação da lignina baseou-se em Berghel et al. (2013), conforme a Figura 1. O licor negro de 15% de sólidos totais foi concentrado para 27%. Após a concentração, procedeu-se à acidificação do licor utilizando-se H_2SO_4 20% v/v até alcançar valor de pH 2. Com a lignina precipitada, foram realizadas as lavagens com solução ácida (valor de pH 2) para remoção de contaminantes, seguida de sucessivas lavagens com água destilada a quente. Em seguida, a lignina foi seca em estufa a 40 °C, moída, peneirada a 100 mesh e, posteriormente, armazenada.

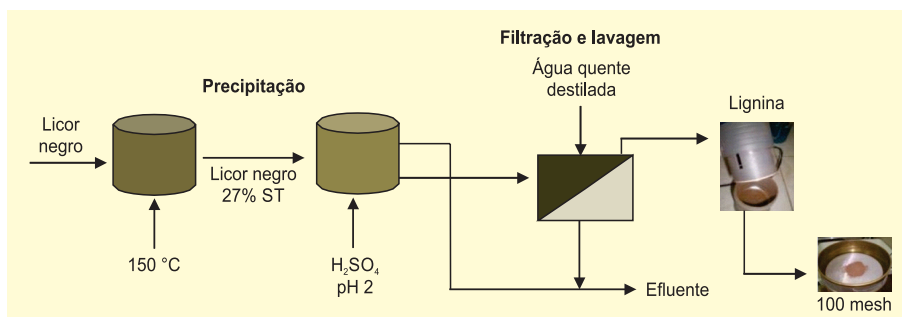


Figura 1. Esquema do processo de precipitação da lignina do licor negro Kraft. ST = sólidos totais.

Foram realizadas misturas de *Eucalyptus urophylla* (Blake 1977), *Eucalyptus grandis* (Moura et al., 1980) de cavacos com 6 anos de idade e percentual de casca de aproximadamente 10%, provenientes de serrarias localizadas no estado de Minas Gerais, no Brasil, bem como de resíduos de milho (*Zea mays*) obtidos do processamento industrial localizado no Brasil.

Os resíduos de biomassa foram reduzidos a frações menores, empregando-se o moinho Willey, conforme a norma TAPPI T257 cm-85 (Technical Association of the Pulp and Paper Industry, 1985). Em seguida, as amostras foram secas a 60 ± 2 °C em estufa de circulação de ar a $12 \pm 2\%$ de umidade. O teor de umidade (base seca) das amostras de biomassa foi determinado usando-se um analisador de umidade de halogênio. Os resíduos (de eucalipto e milho) e a lignina kraft foram caracterizados de acordo com os métodos descritos na Tabela 1.

Tabela 1. Caracterização dos resíduos, da lignina Kraft e suas respectivas metodologias.

Propriedades (unidade)	Procedimento
Densidade a granel (kg m^{-3})	DIN EN 15103 (Deutsches Institut Für Normung, 2010b)
Extrativos solúveis em álcool/tolueno (%)	TAPPI T264 cn-97 (Technical Association of the Pulp and Paper Industry, 1997)
Lignina insolúvel (%)	TAPPI T222 cm-11 (Technical Association of the Pulp and Paper Industry, 2011)
Lignina solúvel (%)	TAPPI UM 250 (Technical Association of the Pulp and Paper Industry, 2011)
Análise química imediata (%)	ABNT NBR 8112 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1983)
Poder calorífico superior (MJ kg^{-1})	ASTM D-2015-66 (Standard Test Method, 1982)
Análise elementar (%)	DIN EM 15104 (Deutsches Institut Für Normung, 2011)

A densidade a granel foi calculada pela razão entre a massa obtida e o volume da biomassa (1.000 cm^3). Para análise da composição química estrutural, a holocelulose foi determinada pela soma dos teores de extrativos solúveis em álcool/tolueno, lignina total e teor de cinzas, diminuídos em 100.

A serragem livre de extrativos foi conforme a norma TAPPI T264 cn-97 (Technical Association of the Pulp and Paper Industry, 1997) e depois submetida a análises de lignina klason. O método Klason, de acordo com a norma TAPPI T222 cm-11 (Technical Association of the Pulp and Paper Industry, 2011), consiste no pré-tratamento (30 °C, 1h) da matéria-prima em H₂SO₄ aquoso a 72%, seguido de hidrólise com H₂SO₄ a 3% em uma autoclave (100 °C, 3h). O resíduo sólido remanescente após a hidrólise é a lignina insolúvel. A fração de lignina solúvel foi quantificada no filtrado de acordo com o TAPPI método UM 250 (Technical Association of the Pulp and Paper Industry, 2011b).

A análise química imediata inclui cinzas, matéria volátil e teor de carbono fixo. São determinados por meio de testes gravimétricos, diretos e indiretos, que permitem seu cálculo. O poder calorífico superior e inferior é definido como o calor liberado ao queimar um grama de combustível em um calorímetro (recipiente fechado). Foi utilizado o equipamento, uma bomba calorimétrica adiabática, marca IKA, modelo 300.

A análise elementar é definida como a determinação de carbono, hidrogênio, nitrogênio e enxofre, bem como fornece um método conveniente para relatar a composição elementar orgânica principal do carvão. O equipamento utilizado foi o Vario Micro Cube CHNS, Elementar. O teor de enxofre também foi determinado no analisador elementar. O valor de oxigênio foi determinado pela soma dos teores de carbono, nitrogênio, hidrogênio, enxofre e cinzas diminuídos em 100, de acordo com a norma DIN EN 15296 (Deutsches Institut Für Normung, 2011).

A estimativa do poder calorífico útil foi realizada de acordo com o anexo E da norma DIN EN 14918 (Deutsches Institut Für Normung, 2010a). A densidade energética foi calculada multiplicando-se o valor calorífico útil pela densidade aparente do material, conforme sugerido por Obernberger; Therk, 2010.

Os resultados obtidos foram submetidos ao teste de Lilliefors para normalidade (Lilliefors, 1967) e ao teste de Cochran para homogeneidade de variância (Cochran, 1950). Os dados de caracterização dos resíduos e da lignina kraft foram analisados estatisticamente por análise de variância para avaliar diferenças entre os tratamentos. Quando foram encontradas

diferenças significativas entre os resultados, foi aplicado o teste de Tukey ao nível de significância de 95%.

Resultados e Discussão

Nos processos de peletização, os teores de lignina e de umidade da biomassa são os parâmetros mais importantes que determinam a durabilidade dos pellets (Samuelsson et al., 2009; Karkania et al., 2012). O teor de umidade para o resíduo de milho e partículas de eucalipto foi em média 8,82% (base úmida) e 14,0% (base úmida), respectivamente. Assim, o teor de umidade dos resíduos estão de acordo com o sugerido por outros autores para produção de pellets, o qual varia entre 8%–15% (base úmida) (Torbjörn et al., 2012).

Na Tabela 2 mostram-se os valores médios das propriedades físicas e químicas dos resíduos e da lignina kraft. A caracterização das matérias-

Tabela 2. Valores médios das propriedades físicas e químicas das partículas dos resíduos lignocelulósicos e da lignina Kraft.

Característica	Resíduos		Lignina Kraft
	Eucalipto	Milho	
Densidade a granel (kg m ⁻³)	137 (b) ¹³	ND	492 (a) ^{14(*)}
Poder calorífico superior (MJ kg ⁻¹)	18,9 (b) ^{0,3}	19,2 (b) ^{0,4}	26,3 (a) ^{0,3}
Poder calorífico inferior (MJ kg ⁻¹)	17,5 (b) ^{0,6}	18,0 (b) ^{0,5}	25,1 (a) ^{0,6}
Densidade energética (10 ⁴ MJ m ⁻³)	1,5 (b) ^{0,4}	1,9 (b) ^{0,3}	ND
Análise elementar (%)	C = 49,2; N = 0,2; H = 5,9; O = 44,3; S = 0,1	C = 50,1; N = 1,3; H = 5,1; O = 41,2; S = 1,4	C = 66,2; N = 0,2; H = 5,6; O = 23,4; S = 2,4
Teor de voláteis (%)	89,13(a) ^{0,52}	84,33(a) ^{0,48}	
Teor de cinzas (%)	0,3 (c) ^{0,2}	0,8 (c) ^{0,1}	1,1 (c) ^{0,3}
Teor de carbono fixo (%)	10,60(b) ^{0,40}	14,86(b) ^{0,56}	
Extrativos solúveis em álcool/tolueno (%)	5,2 (b) ^{0,3}	5,8 (b) _{0,3}	ND
Lignina solúvel (%)	2,6 (d) ^{0,4}	8,0 (c) ^{0,3}	12,7 (c) ^{0,4}
Lignina insolúvel (%)	33,2 (b) ^{0,2}	3,6 (d) ^{0,1}	85,4 (a) ^{0,2}
Lignina total (%)	35,8 (b) ^{0,2}	12,0 (b) ^{0,3}	98,1(a) ^{0,3}
Holocelulose (%)	59,0 (b)	64,8 (a)	0,2 (c)

*As medias seguidas da mesma letra entre parênteses para os resíduos de madeira (dentro da mesma linha), e para a lignina Kraft (dentro da mesma linha), não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Os desvios padrão estão sobrescritos. ND: Não determinado.

primas do eucalipto e da lignina kraft foi realizada nos laboratórios de Energia da Madeira e de Celulose e Papel do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa (UFV), sendo os dados compartilhados entre os estudantes que trabalharam com as mesmas matérias-primas. Esses dados foram previamente publicados por Boschetti et al. (2017). A densidade a granel da lignina kraft foi maior que a observada para o resíduo de eucalipto. Esses valores evidenciam uma maior taxa de compactação da lignina kraft em relação a essa biomassa.

O poder calorífico superior da madeira ($18,9 \text{ MJ kg}^{-1}$) e do milho ($19,2 \text{ MJ kg}^{-1}$) foi significativamente menor que o da lignina kraft ($26,3 \text{ MJ kg}^{-1}$). Nota-se que a lignina kraft, por suas propriedades aglutinantes e energéticas, tem um grande potencial energético para ser utilizada como aditivo em pellets (Demirbas, 2002; Berghel et al., 2013). Além disso, a lignina kraft tem potencial aplicação como aglutinante, emulsificante, dispersante, agente de favorecimento, fertilizante e adesivo de copolímero (Kubo; Kadla, 2004; Whittaker et al., 2017). As melhorias dizem respeito a propriedades como maiores valores de poder calorífico e menores teores de cinzas. Bem como menores tendências de escória e menores emissões de partículas finas durante a combustão em comparação com os pellets de madeira.

O maior poder calorífico observado nos resíduos de milho é atribuído à presença dos óleos vegetais, com alta capacidade energética, e presente nos extrativos. Os resíduos de milho apresentaram maior densidade energética comparado aos resíduos de eucalipto. O efeito dos extrativos na durabilidade dos pellets sugere que eles lubrificam a passagem do material pelo moinho, enquanto alguns outros estudos sugerem que eles têm um papel na ligação (Karkania et al., 2012; Whittaker et al., 2017).

Os teores de lignina, extrativos solúveis em álcool/tolueno e holocelulose (Tabela 2) para a biomassa apresentaram teores diferentes entre as matérias-primas. Por sua vez, os resíduos de milho apresentaram maior teor de holocelulose extrativo e menor conteúdo de lignina total, em relação ao eucalipto. O efeito do teor de extrativo pode ser dependente da distribuição do tamanho das partículas e do teor de lignina. Mudanças no teor de umidade também podem ter efeitos positivos ou negativos na durabilidade de pellets, embora pareça haver alguma interação com o conteúdo extrativo (Torbjörn et al., 2012; Whittaker et al., 2017).

As cinzas são provenientes do conteúdo mineral da biomassa e a sua quantificação é importante, pois teores elevados implicam uma maior demanda de limpeza em fornalhas e em outros sistemas em que ocorre a queima da biomassa. A lignina kraft apresentou o maior teor de cinzas em relação as biomassas, porém um teor de cinzas, de acordo com o esperado por Tomani (2010), em que valores de cinzas de até 1% em lignina kraft extraída pelo processo LignoBoost são considerados aceitáveis.

Conclusões

Os resíduos de milho, eucalipto e de lignina kraft possuem potencial energético, uma vez que apresentaram um elevado poder calorífico superior e inferior. Os resíduos de milho apresentaram maior densidade energética em comparação aos resíduos de eucalipto. No entanto, os resíduos de milho apresentaram alto teor de extrativos, provenientes de óleos vegetais, que podem influenciar na passagem da biomassa pelos moinhos durante processos de peletização.

O poder calorífico superior da madeira ($18,9 \text{ MJ kg}^{-1}$) e do milho ($19,2 \text{ MJ kg}^{-1}$) foi significativamente menor que o da lignina kraft ($26,3 \text{ MJ kg}^{-1}$). A lignina kraft, por suas propriedades aglutinantes e energéticas, tem um grande potencial energético para ser utilizada como aditivo em pellets ou para ser usada em outros produtos energéticos, agregando valor às cadeias agroindustriais.

A lignina kraft associada com os resíduos de milho e eucalipto pode ter um grande potencial na sua conversão em energia em processos de compactação de biomassa, já que os resíduos e a lignina apresentaram baixo teor de cinzas e potencial energético.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao projeto Capes-Embrapa “Biorrefinaria da Lignina” pela bolsa de doutorado de Bianca Moreira Barbosa.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8112**: Análise química imediata do carvão vegetal. Rio de Janeiro, 1983.

BERGHEL, J.; FRODESON, S.; GRANSTROM, K.; RENSTROM, R.; STAHL, M.; NORDGREN, D.; TOMANI, P. The effects of kraft lignin additives on wood fuel pellet quality, energy use and shelf life. **Fuel Processing Technology**, v. 112, p. 64-69, Aug. 2013. DOI: 10.1016/j.fuproc.2013.02.011

BLAKE, S. T. Four new species of *Eucalyptus*. **Austrobaileya**, v. 1, n. 1, p. 1-10, 1977.

BOSCHETTI, W. T. N.; CARVALHO, A. M. M. L.; CARNEIRO, A. C. O. SANTOS, L. C.; POYARES, L. B. Q. Potential of kraft lignin as an additive in briquette production. **Nordic Pulp & Paper Research Journal**, v. 34, n. 1, p. 147-152, 2019. DOI: 10.1515/npprj-2018-0002.

BOSCHETTI, W. T. N.; POYARES, L.; SANTOS, L. C.; FREITAS, T. P.; SOUZA, L. D. S.; ASSIS, G. A. G.; FARIA, B. F. H.; CARVALHO, A. M. M. L. Lignina Kraft como aditivo na produção de briquetes. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA, 3., 2017, Florianópolis. **Anais [...]** Florianópolis: CBCTEM, 2017.

COCHRAN, W. G. The comparison of percentages in matched samples. **Biometrika**, v. 37, n. 3/4, p. 256-266, Dec. 1950. DOI: 10.2307/2332378.

DEMIRBAS, A. Relationships between heating value and lignin, moisture, ash and extractive contents of biomass fuels. **Energy Exploration & Exploitation**, v. 20, n. 1, p. 105-111, 2002. DOI: 10.1260/014459802760170420.

DEUTSCHE INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN EN 14918**: solid biofuels: determination of calorific value. Berlin, 2010a. 63 p. Technical standard.

DEUTSCHE INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN EN 15103**: solid biofuels: determination of bulk density. Berlin, 2010b. 14 p. Technical standard.

DEUTSCHE INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN EN 15104**: solid biofuels: determination total content of carbon, hydrogen and nitrogen: instrumental methods. Berlin, 2011a. 15 p. Technical standard.

DEUTSCHE INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN EN 15296**: solid biofuels: conversion of analytical results from one basis to another. Berlin, 2011b. 15 p. Technical standard.

GOSELINK, R. J. A.; GURAN, B.; ABÄCHERLI, A. Co-ordination network for lignina-standardisation, production and applications adapted to market requirements (Euro lignin). **Industrial Crops and Products**, v. 20, p. 121-129, 2004.

KARKANIA V.; FANARA, E.; ZABANIOTOU, A. Review of sustainable biomass pellets production – A study for agricultural residues pellets' market in Greece. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 3, p. 1426-36, Apr. 2012. DOI: 10.1016/j.rser.2011.11.028.

KUBO, S.; KADLA, J. F. Poly(ethylene oxide)/Organosolv lignin blends: relationship between thermal properties, chemical structure, and blend behavior. **Macromolecules**, v. 37, p. 6904–6911, July 2004. DOI: 10.1021/ma0490552.

LILLIEFORS, H. W. On the Kolmogorov-Smirnov test for normality with mean and variance unknown. **Journal of the American Statistical Association**, v. 62, n. 318, p. 399-402, 1967. DOI: 10.1080/01621459.1967.10482916.

- LORA, J. H.; GLASSER, W. G. Recent application of lignina: a sustainable alternative to nonrenewable materials. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 10, p. 39-48, 2002.
- MOURA, V. P. G.; CASER, R. L.; ALBINO, J. C.; GUIMARÃES, D. P.; MELO, J. T.; COMASTRI, S. A. **Evaluation of Eucalyptus species and provenances in Minas Gerais and Espírito Santo**: partial results. Planaltina, DF EMBRAPA-CPAC, 1980. 104 p.
- OBERNBERGER, I.; THEK, G. **The pellet handbook**: the production and thermal utilization of pellets. London: Earthscan, 2010. 593 p.
- PEREIRA, B. L. C.; CARNEIRO, A. C. O.; CARVALHO, A. M. M. L.; VITAL, B. R.; OLIVEIRA, A. C.; CANAL, W. D. Influence of adding kraft lignin in eucalyptus pellets properties. **Floresta**, v. 46, n. 2, p. 235-242, 2016.
- SAAL, U.; WEIMAR, H.; MANTAU, U. Wood processing residues. **Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology**, v. 166, p. 27-41, Mar. 2017. DOI: 10.1007/10_2016_69. 2017.
- SAMUELSSON, R.; THYREL, M.; SJÖSTRÖM, M.; LESTANDER, T. A. Effect of biomaterial characteristics on pelletizing properties and biofuel pellet quality. **Fuel Process Technology**, v. 90, n. 9, p. 1129–1134, Sept. 2009. DOI: 10.1016/j.fuproc.2009.05.007.
- STANDARD TEST METHOD. **ASTM D-2015-66**: Gross Calorific Value of Coal and Coke by the Adiabatic Bomb Calorimeter. Philadelphia, 1982.
- STOLARSKI, M. J.; SZCZUKOWSKI, S.; TWOROWSKI, J.; KRZYŻANIAK, M.; GULCZYŃSKI, P.; MLECZEK, M. Comparison of quality and production cost of briquettes made from agricultural and forest origin biomass. **Renewable Energy**, v. 57, p. 20-26, Sept. 2013. DOI: 10.1016/j.renene.2013.01.005.
- TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **T 257 cm-85**: Sampling and preparing wood for analysis. Atlanta: Tappi Press, 1985. 5 p.
- TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **TAPPI T264 cn-97**: Preparation of wood for chemical analysis. Atlanta: Tappi Press, 1997.
- TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **TAPPI T222 cm-11**: Acid-insoluble lignin in wood and pulp. Atlanta: Tappi Press, 2011.
- TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **TAPPI UM 250**: Acid-soluble lignin in wood and pulp. Atlanta: Tappi Press, 2011.
- TOMANI, P. The lignoboost process. **Celulose Chemistry and Technology**, v. 44, n. 1-3, p. 53-58, 2010).
- TORBJÖRN, A. L.; MICHAEL, F.; ROBERT, S.; MEHRDAD.; MIKAEL, T. Industrial scale biofuel pellet production from blends of unbarked softwood and hardwood stems: the effects of raw material composition and moisture content on pellet quality. **Fuel Processing Technology**, v. 95, p. 73-77, Mar. 2012.
- VAZ JUNIOR, S. **Treatment of agroindustrial biomass residues**: a sustainable approach. Cham: Springer, 2020. 103 p.
- WHITTAKER, C.; SHIELD, I. Factors affecting wood, energy grass and straw pellet durability – a review. **Renewable and sustainable Energy Reviews**, v. 71, p. 1-11, May 2017.



MINISTÉRIO DA
AGRICULTURA, PECUÁRIA
E ABASTECIMENTO

