

Pirólise não-isotérmica da casca de pinhão: caracterização e estudo termogravimétrico

Non-isothermal pyrolysis of pine-fruit shell: characterization and thermogravimetric study

RESUMO

Larissa Pollyane Klososki Ribeiro
larissaklos@hotmail.com
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Francisco Beltrão, Paraná, Brasil.

Michele Di Domenico
micheled@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Francisco Beltrão, Paraná, Brasil.

Luciane Batistella
luciane_batistella@unifesspa.edu.br
Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Marabá, Pará, Brasil.

Suélen Maria de Amorim
amorim_sm@yahoo.com.br
Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil.

A alta demanda energética no cenário mundial, a redução dos combustíveis fósseis e o aceleração do efeito estufa são fatores que vem contribuindo para busca de fontes de energia renováveis. Os resíduos gerados, principalmente pelos setores agroindustriais, podem ser aproveitados como uma ótima fonte energética. Neste contexto, este estudo teve como objetivo avaliar o potencial energético da casca de pinhão (CP) por meio da pirólise não-isotérmica em analisador termogravimétrico (TGA) e sua caracterização pelas análises imediata, elementar, poder calorífico e microscopia eletrônica de varredura. A CP apresentou um alto teor de matéria volátil (71,98%), um baixo teor de cinzas (1,28%) e quantidades baixas de S e N. Seu poder calorífico superior foi calculado por diferentes correlações teóricas e resultou num valor médio de $20,68 \pm 1,08 \text{ MJ Kg}^{-1}$, demonstrando seu potencial combustível. A morfologia do resíduo exibiu homogeneidade e pouca porosidade. A partir dos dados de TG e de sua derivada DTG, foi possível determinar as perdas de massa e as temperaturas de degradação dos diferentes componentes da biomassa (hemicelulose, celulose e lignina) durante o processo de pirólise.

PALAVRAS-CHAVE: Energia renovável. Biomassa. Pirólise.

ABSTRACT

The high energy demand on the world scenario, the reduction of fossil fuels, and the acceleration of the greenhouse effect have contributed to the search for renewable energy sources. The waste generated, mainly by the agro-industrial sectors, can be used as an excellent energy source. In this context, this study aimed to evaluate the energy potential of the pine-fruit shell (CP) by non-isothermal pyrolysis in a thermogravimetric analyzer (TGA) and by its characterization through proximate and ultimate analysis, calorific value and scanning electron microscopy. The CP showed a high content of volatile matter (71.98%), low content of ash (1.28%), and low amounts of S and N. Its superior calorific value was calculated by different theoretical correlations and resulted in an average value of $20.68 \pm 1.08 \text{ MJ Kg}^{-1}$, demonstrating its fuel potential. The residue morphology showed homogeneity and low porosity. From the TG data and its derivative DTG, it was possible to determine the mass losses and the degradation temperatures of the different components of the biomass (hemicellulose, cellulose, and lignin) during the pyrolysis process.

KEYWORDS: Renewable energy. Biomass. Pyrolysis.

Recebido: 04 set. 2020.

Aprovado: 01 out. 2020.

Direito autorial: Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



INTRODUÇÃO

A demanda energética tem aumentado muito no atual cenário mundial, principalmente devido ao crescimento populacional e aos constantes avanços tecnológicos. Os combustíveis fósseis ainda se enquadram como sendo o recurso mais utilizado para a geração de energia, porém são uma fonte de energia não renovável e a sua queima libera gases responsáveis pelo aumento do efeito estufa, como o dióxido de carbono (CO_2), o monóxido de carbono (CO), o gás metano (CH_4) e o óxido nitroso (NO_2) (DINIZ, 2005). Por esse motivo, a busca por fontes de energias renováveis tem sido o objetivo de muitas pesquisas. Uma alternativa viável é a utilização de biomassa, por ser considerada uma fonte energética limpa e renovável, apresentando baixo custo, fácil armazenamento e altos valores de conversão, dependendo do processo aplicado (MCKENDRY, 2002).

O setor agroindustrial é um dos principais geradores de biomassas residuais, com uma estimativa de produção mundial de 1,3 bilhão de toneladas por ano (FAO, 2013). Esses resíduos quando descartados inadequadamente causam problemas ao meio ambiente, como a poluição de solos e rios, acarretando problemas à saúde pública (SOARES et al., 2016). Logo, neste trabalho, foi estudado o potencial de aproveitamento energético de uma biomassa residual gerada em grandes quantidades: a casca de pinhão. O pinhão é considerado um pseudofruto muito nutritivo, encontrado no interior das pinhas da *Araucaria angustifolia*, espécie da família Araucariceae. Seu maior consumo é localizado na região Sul do Brasil, sendo o Paraná seu maior produtor (CASAGRANDE, 2020). As cascas do pinhão são geralmente descartadas em aterros e em terrenos vazios e algumas vezes aplicadas na adubação. Neste contexto, o descarte das cascas de pinhão, pode ser re-significado a partir da coleta e destinação final adequada, sendo tratado como um coproduto de valor econômico.

Com o intuito de aproveitar a energia presente nos diferentes tipos de biomassa – incluindo os resíduos como a casca de pinhão – foram desenvolvidos processos de conversão termoquímicos, bioquímicos e físico-químicos (CARDOSO, 2012). Atualmente, os processos termoquímicos são classificados como os mais promissores para a conversão de energia a partir de diferentes resíduos. Entre os processos mais utilizados destacam-se a combustão, gaseificação e pirólise (MANARA, 2012).

A combustão acontece por meio de reações exotérmicas entre o oxigênio e os hidrocarbonetos da biomassa, onde ela é convertida em dois principais compostos, água e CO_2 . A combustão direta é o principal processo para obter energia da biomassa, sendo responsável por 97% da bioenergia produzida mundialmente. Este processo é usado em diversas aplicações, desde a geração de calor até a produção de eletricidade (DEMIRBAS, 2004). A gaseificação ocorre a partir do aquecimento do combustível sólido em temperaturas mais altas do que a pirólise, na presença de um agente gaseificante como o O_2 e o vapor d'água. A gaseificação converte a energia química presente na biomassa por meio de uma oxidação parcial, com concentrações menores de O_2 (PARTHASARATHY; NARAYANAN, 2014). A pirólise pode ser definida como a degradação térmica do material orgânico na ausência de O_2 . Esse processo de conversão é controlado por faixas de temperatura variando entre 500°C e 800°C , resultando em produtos como gases (H_2 , CO , CO_2 , CH_4 , H_2O , NH_3 e vapores orgânicos condensáveis), líquidos

(hidrocarbonetos poliaromáticos) e um sólido rico em carbono (*biochar* ou carvão) (DEMIRBAS, 2004).

É importante ter o conhecimento das características físico-químicas da biomassa estudada, pois assim é possível determinar seu desempenho, aplicação, tratamentos necessários à otimização de processos, quais reações são mais eficientes, quais reagentes são melhores para a obtenção do produto desejado, configurações dos reatores e composição dos gases gerados (PEREIRA, 2010). As características de resíduos sólidos podem ser determinadas por meio de diferentes técnicas de análise, como por exemplo, as análises de composição imediata e elementar, o poder calorífico do combustível e sua estrutura porosa (avaliadas neste estudo).

Portanto, o presente estudo tem como objetivo avaliar o potencial energético da biomassa de casca de pinhão por meio do estudo da pirólise não-isotérmica em analisador termogravimétrico e por sua caracterização físico-química e estrutural utilizando diferentes técnicas de análise.

METODOLOGIA

Preparação da biomassa

O pinhão foi obtido no comércio local da cidade de Francisco Beltrão, no estado do Paraná. Após o cozimento, o resíduo de casca de pinhão (CP) foi separado de sua semente e ficou por um período de 24h secando em estufa de aquecimento (SL 100/480, Brasil) na temperatura de 105°C. Depois de seca, a amostra foi reduzida em moinho analítico (Quimis, Brasil) e peneirada para partículas inferiores a 300 µm em peneiras granulométricas da série Tyler. Em seguida, a CP foi armazenada em recipiente fechado na ausência de luz até seu uso. A biomassa foi preparada no Laboratório de Engenharia Bioquímica da UTFPR-FB.

Caracterização da biomassa

A análise imediata consiste na determinação dos teores de umidade (U), matéria volátil (MV), carbono fixo (CF) e cinzas (CZ) para resíduos sólidos em geral. Esta análise foi realizada em um forno mufla (Zezimaq, Brasil) utilizando as metodologias descritas pelas normas CEN/TS 14774-1, CEN/TS 14778-1, CEN/TS 14780, CEN/TS 15148 e CEN/TS 14775 (CEN/TS, 2004; 2005). Os procedimentos foram feitos utilizando cadinhos de porcelana, para suportar a alta temperatura do forno, e uma massa inicial de 1,0 g da amostra de CP. Em seguida, os teores de U, MV, CZ e CF foram calculados pelas equações descritas a seguir.

$$U(\%) = \left(\frac{m_2 - (m_3 - m_1)}{m_2} \right) (100) \quad (1)$$

$$MV(\%b.s.) = \left(\frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \right) (100) \quad (2)$$

$$CZ(\%b.s.) = \left(\frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \right) (100) \quad (3)$$

$$CF(\%b.s.) = 100 - (U + MV + CZ) \quad (4)$$

Onde %b.s. é a porcentagem de massa em base seca, m_1 é a massa do cadinho vazio, m_2 é a massa da amostra úmida e m_3 é a massa do cadinho vazio + amostra depois da estufa.

Na análise elementar foram determinados os teores de carbono (C), hidrogênio (H) e nitrogênio (N) através do analisador elementar Carbo Erba EA 1110 (CE Instruments, Inglaterra) na Central de Análises do Departamento de Química, da Universidade Federal de Santa Catarina, Campus de Florianópolis. O teor de enxofre (S) foi obtido da literatura e o teor de oxigênio (O) foi calculado por diferença, de acordo com a Equação 5:

$$O = 100 - C - H - N - CZ - S \quad (5)$$

O poder calorífico é definido como a quantidade de calor desprendido pela combustão completa do combustível. O poder calorífico superior (PCS) é a quantidade total de energia que poderá ser liberada a partir da combustão, incluindo o calor latente de vaporização da água (CONSUEGRA, 2013). O PCS pode ser mensurado tanto experimentalmente com o uso de bombas calorimétricas quanto por correlações teóricas (MCKENDRY, 2002). Neste trabalho, o PCS teórico da CP foi determinado a partir dos resultados da análise imediata, usando três correlações da literatura: Parikh; Channiwala & Ghosal (2005) (Equação 6), Cordero et al. (2001) (Equação 7) e Sheng & Azevedo (2005) (Equação 8).

$$PCS = 0,3536(CF) + 0,1559(MV) - 0,0078(CZ) \quad (6)$$

$$PCS = 0,3543(CF) + 0,1708(MV) \quad (7)$$

$$PCS = 19,914 - 0,2324(CZ) \quad (8)$$

A análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV) é capaz de fornecer imagens com alta resolução da superfície da biomassa sólida, sendo utilizada para adquirir informações sobre sua morfologia e seus constituintes (NAGATANI, 1987). A análise de MEV foi realizada em um microscópio EVO MA 15 (Zeiss, Alemanha) no Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais (CMCM), da UTFPR-CT. Para esta análise, foi necessário o uso de uma porta-amostra de alumínio ao qual uma fita de carbono dupla-face foi colada, sendo a amostra aplicada na sobre fita. A biomassa foi recoberta com pó de ouro com a finalidade de melhorar a condutividade na análise.

Análise Térmica

A pirólise não-isotérmica da biomassa de CP foi avaliada por meio da análise termogravimétrica (TGA), realizada em um analisador termogravimétrico SDT Q600 (TA Instruments, Portugal) no laboratório multiusuário Central de Análises, da UTFPR, Campus Pato Branco. Nesse procedimento, uma dada quantidade de amostra ($10 \pm 0,5$ mg), foi aquecida ($15 \text{ }^\circ\text{C min}^{-1}$) da temperatura ambiente até $900 \text{ }^\circ\text{C}$ em atmosfera inerte. A vazão de nitrogênio (N_2) inserida no equipamento foi constante e igual 100 mL min^{-1} .

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Caracterização da biomassa

A partir da análise imediata, foram encontrados teores de 8,89% de U, 71,98% de MV, 1,28% de CZ e 26,74% de CF. A umidade presente na biomassa afeta

negativamente suas propriedades, devido ao gasto de energia necessário para o aquecimento e vaporização da água (DE SOUZA et al., 2012). O teor de U encontrado foi àquele remanescente após a secagem inicial da amostra, moagem e armazenamento, indicando que a CP é uma biomassa higroscópica. De acordo com Mckendry (2002), a quantidade de umidade para os processos de conversão deve ser inferior a 50%. O material volátil representa os gases liberados no aquecimento a uma alta temperatura sem contato com o ar. Neste estudo, o elevado teor de MV mostra que a biomassa pode entrar facilmente em ignição. Ainda, indica uma boa aplicabilidade da CP na produção de *biochar* sólido, que posteriormente pode ser gaseificado e convertido em compostos gasosos (VIRMOND et al., 2012). O teor de CF é a quantidade de massa remanescente após a liberação dos materiais voláteis, excluindo as cinzas e a umidade (CIESLINSKI, 2014) (CIESLINSKI, 2014), ou seja, é a quantidade de material responsável por manter a combustão. Portanto, o carbono fixo tem relação direta com o poder calorífico (PÉREZ; MELGAR; BENJUMEA, 2012). O alto teor de carbono fixo aumenta o índice de combustão (FROEHLICH, 2014) e requer em um maior tempo de residência dentro do reator de queima. Por fim, a amostra apresentou um baixo teor de CZ, o que é favorável para processos de degradação térmica, nos quais um valor inferior a 10% é aceitável. A cinza corresponde a quantidade de matéria mineral presentes na biomassa como, cálcio, fósforo, potássio, entre outros (SANTOS, 2013). A partir do teor de cinzas é possível analisar a viabilidade econômica e o potencial da biomassa como um combustível renovável (CIAMPI, 1992). Uma alta quantidade de CZ pode afetar os custos do processo, pois gera incrustações nos equipamentos afetando na transferência de calor e sendo necessário manutenções constantes nos equipamentos (KLAUTAU, 2008). Os resultados encontrados neste trabalho para a análise imediata são bem próximos aos obtidos por Alves et al. (2019) para a casca de pinhão: 5,23% (U), 72,05% (MV), 26,67% (CF) e 1,28% (CZ).

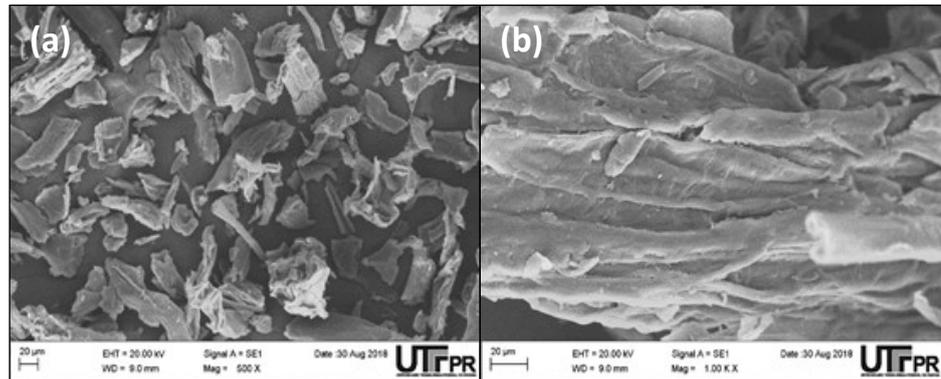
A partir da análise elementar é possível notar que CP apresenta elevados teores dos elementos C (43,76%) e O (47,80%), o qual juntos compreendem mais de 90% do peso total da biomassa. O teor de H pode estar relacionado à quantidade de carbono na amostra, já que ambos são constituintes das cadeias carbônicas das fibras de celulose. Um alto teor de C contribui para uma maior eficiência da combustão, pois libera mais energia (BORGES; SELLIN; MEDEIROS, 2008). A razão atômica O/C foi calculada a partir dos dados da análise elementar, sendo encontrado um valor de 0,82%. Este dado tem grande relevância, pois quanto menor for esta razão, melhores são as propriedades térmicas do combustível (BRAND, 2007). Os baixos conteúdos de N (0,69%) e S (0,12%) podem ser destacados como um ponto positivo da CP, pois não gera-se os compostos NOx e SOx durante o processo de pirólise (SANTOS, 2013).

O PCS é uma das propriedades mais importantes para análise de um combustível. A partir dos valores encontrados pelas correlações teóricas obteve-se uma média e desvio padrão de $20,68 \pm 1,08$ MJ Kg⁻¹ para o PCS da CP, o que é um alto valor quando comparado aos dados de carvões minerais, combustíveis fósseis mais utilizados, que segundo Domenico (2013) possui valor de PCS de 15,23 MJ Kg⁻¹.

Para a avaliação da morfologia da biomassa de CP foi realizada a análise de MEV, mostrada na Figura 1. Verifica-se na Figura 1 (a) que as partículas da biomassa possuem uma grande distribuição de tamanhos. Este resultado está

coerente com a granulometria aplicada, sendo a maior parte da amostra passando na peneira de 300 μm e retida na bandeja de fundo. Ainda, pode ser observado que a CP apresentou boa homogeneidade das partículas. Já na Figura 1 (b) verifica-se que a biomassa apresenta uma superfície lisa e com baixa porosidade.

Figura 1 - Imagens MEV da biomassa de casca de pinhão nas aproximações de 500x (a) e 1000x (b).

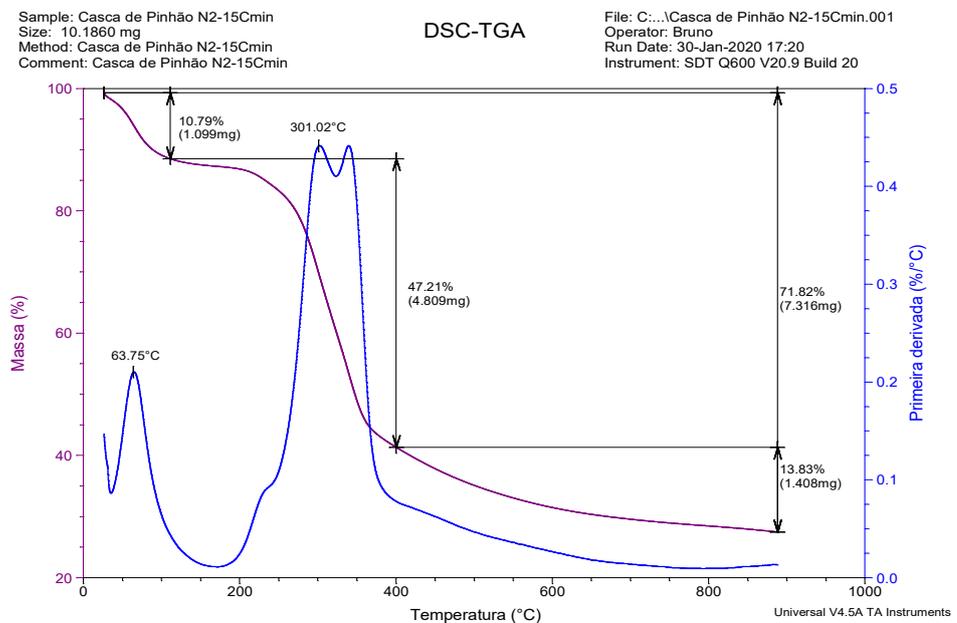


Fonte: Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais (CMCM), da UTFPR – Curitiba (2020).

Análise térmica

O perfil termogravimétrico (TG) e sua derivada (DTG) obtidos para a pirólise não-isotérmica da CP na razão de aquecimento de $15\text{ }^{\circ}\text{C min}^{-1}$ é mostrado na Figura 2.

Figura 2 - Curvas experimentais de TG e DTG para a pirólise não-isotérmica da casca de pinhão numa razão de aquecimento de $15\text{ }^{\circ}\text{C min}^{-1}$.



Fonte: TA Instruments (2020).

O número de etapas de perda e massa da biomassa é mais bem observada pela curva de DTG, onde a quantidade de picos existentes na curva corresponde à quantidade de estágios e reações ocorrendo durante o processo. As curvas

apresentadas possuem o comportamento característico de degradação térmica para biomassas lignocelulósicas, contendo três etapas bem definidas de perda de massa: (i) liberação de umidade (água) desde a temperatura ambiente até aproximadamente 110 °C; (ii) decomposição de carboidratos (hemicelulose e celulose) presentes na biomassa no intervalo de temperatura de 200 a 400 °C; e, (iii) acima de 400 °C, uma degradação contínua e lenta provavelmente associada à lignina remanescente na biomassa. Ao final do processo da pirólise, a massa remanescente corresponde ao carvão e as cinzas (RAMBO et al., 2015).

Na Tabela 1 são apresentados os valores das temperaturas iniciais (T_0), finais (T_f) e de pico ou máxima ($T_{máx}$) para cada estágio de perda de massa observados na Figura 2. De acordo com os dados é possível afirmar que perda de massa total durante a pirólise da CP é 71,83%. De acordo com este valor, restam ao final da análise 28,17% de massa da biomassa em estudo. Este valor está coerente com a soma das quantidades de CF e CZ da análise imediata da amostra (28,02%), indicando a precisão da análise de TG feita neste trabalho.

Tabela 1 – Perdas de massa durante a pirólise da casca de pinhão a uma razão de aquecimento de 15°Cmin⁻¹

Etapa	T_0 (°C)	T_f (°C)	$T_{máx}$ (°C)	%perda de massa
(i)	27,01	110,25	63,75	10,79
(ii)	110,25	399,73	301,02	47,21
(iii)	399,73	887,85	348,00	13,83
Total	-	-	-	71,83

Fonte: Autoria própria (2020).

CONCLUSÃO

O objetivo deste estudo foi avaliar o potencial energético da casca de pinhão por meio da sua caracterização físico-química, estrutural e pirólise por análise térmica. O elevado teor de voláteis, de 71,98%, indicou que a CP tem facilidade para entrar em ignição. Ainda, seu baixo teor de cinzas e as baixas quantidades de nitrogênio e enxofre, mostram que este combustível tem baixa tendência de liberar de poluentes, motivando futuros estudos. O poder calorífico da CP foi encontrado como sendo 20,68±1,08 MJ Kg⁻¹, confirmando o grande potencial energético para aproveitamento desta biomassa em processos térmicos de conversão de energia. A partir da pirólise da biomassa foi possível identificar os picos de perda de massa relativos aos principais componentes (hemicelulose, celulose e lignina), que auxilia a compreender o comportamento da biomassa em um reator térmico.

REFERÊNCIAS

ALVES, J. L. F. et al. Determination of the Bioenergy Potential of Brazilian Pine-Fruit Shell via Pyrolysis Kinetics, Thermodynamic Study, and Evolved Gas Analysis. *Bioenergy Research*, v. 12, n. 1, p. 168–183, 2019.

BORGES, F.; SELLIN, N.; MEDEIROS, S. H. W. Caracterização e avaliação de lodos

de efluentes sanitário e industrial como biomassa na geração de energia. **Ciencia y Engenharia/ Science and Engineering Journal**, v. 17, p. 27–32, 2008.

BRAND, M. A. Qualidade Da Biomassa Florestal Para O Uso Na Geração De Energia Em Função Da Estocagem. p. 170, 2007.

CARDOSO, B. M. Uso da Biomassa como Alternativa Energética. p. 112, 2012.

CASAGRANDE, E.; VIEIRA, C. Semente da fartura. Disponível em:
<http://www.clicrbs.com.br/sites/swf/dc_pinhao/index.html>. Acesso em: 20 agosto. 2020.

CEN/TS 14774-1:2004. European Committee for Standardization, Solid biofuels – Methods for determination of moisture content – Oven dry method – Part 1: Total moisture – Reference method (English Version). August, 2004.

CEN/TS 14775:2004. European Committee for Standardization. Solid biofuels – Method for the determination of ash content (English Version). August, 2004.

CEN/TS 14778-1:2005. European Committee for Standardization. Solid biofuels – Sampling – Part 1: Methods for sampling (English Version). November, 2005.

CEN/TS 14780:2005. European Committee for Standardization. SOLid biofuels – Methods for sample preparation (English Version). March, 2005.

CEN/TS 15148:2005. European Committee for Standardization. Solid biofuels – Method for the determination of the content of volatile matter (English Version). December, 2005.

CIAMPI, G. J. DOS S. **Desenvolvimento de um calorímetro para a determinação do conteúdo energético de combustíveis sólidos**, 1992

CIESLINSKI, J. **ESTUDO DA EMISSÃO E DO CONTROLE DOS GASES E PARTICULADOS PROVENIENTES DA QUEIMA DE BIOMASSA** Guaratinguetá, 2014.

CONSUEGRA, A. D. S. A. CINÉTICA DA GASEIFICAÇÃO DO BAGAÇO DE LARANJA E SERRAGEM DE MADEIRA COM CO₂. v. 26, n. 4, p. 1–37, 2013.

CORDERO, T. et al. Predicting heating values of lignocellulosics and carbonaceous

materials from proximate analysis. *Fuel*, v. 80, n. 11, p. 1567–1571, 2001

DE SOUZA, M. M. et al. **Estimativa de poder calorífico e caracterização para uso energético de resíduos da colheita e do processamento de Pinus taeda**, 2012.

DEMIRBAS, A. Combustion characteristics of different biomass fuels. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 30, n. 2, p. 219–230, 2004.

DINIZ, J. Conversão térmica de casca de arroz à baixa temperatura: produção de bioóleo e resíduo sílico-carbonoso adsorvente. ... **À Baixa Temperatura: Produção De Bioóleo E Resíduo ...**, p. 156, 2005.

DOMENICO, M. DI. **GASEIFICAÇÃO DE CARVÃO MINERAL BRASILEIRO NA PRESENÇA DE ORTOSSILICATO DE LÍTIO VISANDO A PRODUÇÃO AUMENTADA DE HIDROGÊNIO**. UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, 2013.

FAO. Desperdício de alimentos tem consequências no clima, na água, na terra e na biodiversidade. Disponível em: <<http://www.fao.org.br/dacatb.asp>>. Acesso em: 15 de agosto de 2020.

FROELICH, P. L.; MOURA, A. B. D., Carvão vegetal: Propriedades físico-químicas e principais aplicações. *Tecnologia e Tendências*, v. 9, n. 1, 2014.

KLAUTAU, J. **ANÁLISE EXPERIMENTAL DE UMA FORNALHA A LENHA DE FLUXO CO- CORRENTE PARA SECAGEM DE GRÃOS**, 2008.

MANARA, P.; ZABANIOTOU, A. Towards sewage ludge based biofuels via thermochemical conversion – a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 16, p. 2566-2582, 2012

MCKENDRY, P. Energy production from biomass (part 2): conversion technologies. **Bioresource Technology**, v. 83, n. July 2001, p. 47–54, 2002.

NAGATANI, T. et al. Development of an ultra high resolution scanning electron microscope by means of a field emission source and inlens system. *Scanning Microsc.*, v.11, p.901-909, 1987.

PARIKH, J.; CHANNIWALA, S. A.; GHOSAL, G. K. A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels. *Fuel*, v. 84, n. 5, p. 487–494, 2005.

PARTHASARATHY, P.; NARAYANAN, K. S. Hydrogen production from steam gasification of biomass: Influence of process parameters on hydrogen yield - A review. **Renewable Energy**, v. 66, p. 570–579, 2014.

PEREIRA, E. I. PRODUÇÃO DE CARVÃO ATIVADO A PARTIR DE DIFERENTES PRECURSORES UTILIZANDO $FeCl_3$ COMO AGENTE ATIVANTE. p. 90, 2010.

PÉREZ, J. F.; MELGAR, A.; BENJUMEA, P. N. Effect of operating and design parameters on the gasification/combustion process of waste biomass in fixed bed downdraft reactors: An experimental study. **Fuel**, v. 96, p. 487–496, 2012.

RAMBO, M. K. D. et al. Estudo de análise termogravimétrica de diferentes biomassas lignocelulósicas utilizando a análise por componentes principais. **Ciência e Natura**, v. 37, n. 3, p. 862–868, 2015.

SANTOS, N. A. DO V. Pirólise Rápida De Coprodutos Do Processo Produtivo Do Biodiesel : Efeito Das Condições De Pirólise E Caracterização Dos Produtos. **Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Lavras**, p. 161, 2013.

SHENG, C.; AZEVEDO, J. L. T. Estimating the higher heating value of biomass fuels from basic analysis data. **Biomass and Bioenergy**, v. 28, n. 5, p. 499–507, 2005.

SOARES, D. et al. Gaseificação de serragem de madeira com vapor de água: estudo cinético. **Scientia cum Industria**, v. 4, n. 2, p. 119–124, 2016.

VIRMOND, E. et al. Characterisation of agroindustrial solid residues as biofuels and potential application in thermochemical processes. **Waste Management**, v. 32, n. 10, p. 1952–1961, 2012.