



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA- UFRA
MESTRADO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

JÉSSICA SARAIVA DA COSTA

BIOMASSA RESIDUAL PARA USO ENERGÉTICO NO ESTADO DO PARÁ

BELÉM
2018



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA- UFRA
MESTRADO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

JÉSSICA SARAIVA DA COSTA

BIOMASSA RESIDUAL PARA USO ENERGÉTICO NO ESTADO DO PARÁ

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte das exigências do Curso de Mestrado em Ciências Florestais, para obtenção do título de Mestre.
Orientadora: Profa. Dra. Marcela Gomes da Silva
Co-orientador: Prof. Dr. Thiago de Paula Protásio

BELÉM
2018

Costa, Jéssica Saraiva da

Biomassa residual para uso energético no estado do Pará / Jéssica Saraiva da Costa. – Belém, PA, 2018.

67 f.

Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal Rural da Amazônia, 2018.

Orientador: Marcela Gomes da Silva.

1. Energia Renovável. 2. Resíduos Agrícolas. 3. Caracterização Energética. 4. Potencial Energético de Resíduos. I. Silva, Marcela Gomes da, (orient.) II. Título

CDD – 333.794



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA- UFRA
MESTRADO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

JÉSSICA SARAIVA DA COSTA

BIOMASSA RESIDUAL PARA USO ENERGÉTICO NO ESTADO DO PARÁ

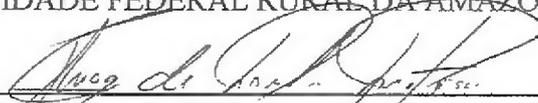
Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte das exigências do Curso de Mestrado em Ciências Florestais, para obtenção do título de Mestre.

Aprovada em 26 de abril de 2018.

BANCA EXAMINADORA



Dra. Marcela Gomes da Silva - Orientadora
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA- UFRA



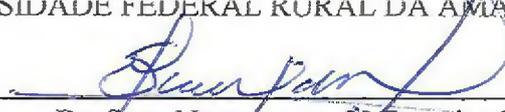
Dr. Thiago de Paula Protásio - Co-orientador
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA- UFRA



Dra. Maíra Reis de Assis - 1º Examinador
UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS- UFLA



Dra. Lina Bufalino - 2º Examinador
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA- UFRA



Dr. Suelo Numazawa - 3º Examinador
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA- UFRA

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida, por proporcionar saúde e coragem para buscar meus objetivos e assim, alcançar mais uma etapa da minha vida profissional.

À Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA) e o Programa de Pós-Graduação em Ciências florestais, pela possibilidade de realização deste trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

A minha orientadora prof. Dra. professora Marcela Gomes da Silva, pela orientação, paciência, por todos os ensinamentos, pela compreensão e auxílio durante esse período.

De igual modo, gostaria de agradecer ao meu coorientador professor Dr. Thiago de Paula Protásio, pela competência e ajuda imprescindível no decorrer desta caminhada. Por todo o auxílio nas análises químicas, energéticas e térmica no Laboratório Multiusuário de Biomateriais da Universidade Federal de Lavras-MG.

À Banca Examinadora, pela disponibilidade de avaliação deste trabalho.

Aos pequenos produtores e empresas que cederam os resíduos para serem estudados.

Aos meus colegas do Laboratório de Tecnologia de Produtos Florestais- LTPF, em especial à Elesandra, Suellen, Prof^a Thais Nagaishi, Eliel, pelo auxílio e companheirismo. E aos ex-estagiários, hoje amigos de profissão e da vida (Marcos, Dayseane, Denison, entre outros) pelo apoio cedido em momentos difíceis.

Ao Prof. Dr. Paulo Fernando Trugilho pela concessão de uso do Laboratório Multiusuário de Biomateriais e à equipe do laboratório pelo suporte durante as análises químicas, térmicas e energética do material estudado e por conduzir as análises de DSC quando tive que voltar ao Pará, em especial à Dr^a. Maíra e a aluna de graduação Alana.

À Marina que me acolheu, e me deu todo suporte logístico enquanto estive em Lavras. Muito obrigada pela amizade!

À Dona Marinete ex-funcionária da UFRA pelo auxílio em diversos momentos desde a graduação até a execução desse trabalho.

Às secretárias de pós-graduação Andreza e Greyce, pela disponibilidade e dedicação para com todos os mestrandos e doutorandos, sempre fazendo um ótimo trabalho.

E, por fim, quero agradecer à minha família, amigos e a todos que colaboraram com meu trabalho de forma direta ou indireta, pelo apoio incondicional. A realização deste trabalho jamais iria ocorrer de maneira solitária, sendo este um resultado da colaboração de várias pessoas e instituições.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Aparência física dos resíduos estudados, (a) caroço do açaí, (b) casca do cacau, (c) casca do coco, (d) cacho de dendê e (e) sabugo de milho.	22
Figura 2. Estimativa de produção de resíduo de caroço de açaí, casca de cacau, casca de coco, cacho de dendê e sabugo de milho em um cenário de 10 anos.	27
Figura 3. Valores médios de teor de umidade e densidade a granel das biomassas em condição úmida e seca	28
Figura 4. Relação entre o teor de extrativos em acetona e o poder calorífico superior das biomassas.	34
Figura 5. Análise química imediata com valores médios de teor de materiais voláteis (TMV), carbono fixo (TCF), cinzas (TCz) dos resíduos.	35
Figura 6. Relação entre o teor de carbono fixo e lignina total.	36
Figura 7. Relação entre teor de materiais voláteis e holocelulose dos resíduos.	37
Figura 8. Diferença na coloração das cinzas de acordo com o tipo de biomassa.	38
Figura 9. Mapa de distribuição espacial dos resíduos de açaí, cacau, coco, dendê e milho no estado do Pará no ano de 2016.	40
Figura 10. Mapa de localização dos municípios de coleta dos resíduos.	52
Figura 11. Curva TGA da combustão dos resíduos agrícolas.	55
Figura 12. Derivada primeira da curva TGA da combustão dos resíduos agrícolas.	56
Figura 13. Análise térmica diferencial da combustão dos resíduos.	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Coeficiente técnico encontrado na literatura de acordo com o tipo de resíduo.	20
Tabela 2. Informações gerais sobre as biomassas coletadas.....	21
Tabela 3. Análises químicas e normas utilizadas.	24
Tabela 4. Áreas cultivadas e quantidade produzida de cultivos agrícolas no Pará no ano de 2016.	26
Tabela 5. Valores de média e desvio padrão das propriedades físicas e energética das biomassas.....	30
Tabela 6. Composição elementar dos resíduos de açaí, cacau, coco, dendê e milho. ...	31
Tabela 7. Composição química molecular dos resíduos.....	32
Tabela 8. Potencial energético dos resíduos de açaí, cacau, coco, dendê e milho no estado do Pará.	38
Tabela 9. Resumo da caracterização química imediata e molecular dos resíduos utilizados na análise térmica.	53
Tabela 10. Temperaturas máximas dos estágios da combustão obtido pela análise térmica diferencial (DTA).	59

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1. Estimativa da quantidade de resíduo	20
Equação 2. Poder calorífico inferior.....	23
Equação 3. Poder calorífico útil	23
Equação 4. Determinação do teor de oxigênio.....	24
Equação 5. Estimativa da massa seca.....	24
Equação 6. Potencial energético.....	25
Equação 7. Índice característico da combustão.....	54
Equação 8. Índice de ignição.....	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
PAC	Programa de aceleração de crescimento
PAM	Produção agrícola municipal
PROINFA	Programa de Incentivo a Fontes Alternativas de Energia Elétrica
SIDRA	Sistema IBGE de Recuperação Automática
UFRA	Universidade Federal Rural da Amazônia
UFLA	Universidade Federal de Lavras

RESUMO

A crescente demanda por energia, em decorrência da melhoria das condições produtivas e aumento da qualidade de vida da população, impulsiona novas áreas de pesquisa na busca por fontes economicamente viáveis e sustentáveis do ponto de vista ambiental. Dentre as fontes naturais disponíveis, os resíduos lignocelulósicos provenientes de atividades agrícolas e florestais ganham destaque quanto a sua quantidade e disponibilidade. Em vista disso, o trabalho teve como objetivo avaliar o potencial energético de resíduos gerados do beneficiamento de cinco cultivos agrícolas produzidos no estado do Pará. Para tal, a pesquisa foi dividida em duas etapas, na primeira etapa foram realizados o levantamento produtivo e a caracterização das propriedades físicas, químicas e energéticas e na segunda parte foi realizado o estudo do comportamento térmico dos resíduos. O delineamento adotado foi o inteiramente casualizado, composto por cinco tratamentos (casca do coco, cacau, cacho de dendê, sabugo do milho, caroço do açaí) e três repetições. As análises mostraram que houve diferença entre as propriedades e composição dos resíduos. A umidade inicial dos resíduos e a baixa densidade foram considerados como os principais fatores limitantes. Dentre os resíduos estudados, o caroço de açaí, o sabugo de milho e o cacho de dendê, foram os que apresentaram maior potencial para utilização energética tendo em conta a sua disponibilidade e poder calorífico. Estimou-se que a potencial energético estadual seja em torno de 42 mil TJ/ano. As microrregiões de Cametá, Tome-açu e Paragominas apresentaram maior aptidão para aproveitamento energético dos resíduos. Com os resultados referente a análise termogravimétrica, foi observado que a combustão dos resíduos ocorreu em três estágios. A perda de massa dos resíduos, se deu em temperatura e intensidades diferentes. O caroço de açaí foi a biomassa que apresentou maior resistência térmica e regularidade na liberação da energia.

Palavras-chave: Energia Renovável, Combustão, Caracterização energética, Potencial.

ABSTRACT

The growing demand for energy, as a result of the improvement of the productive conditions and increase of the quality of life of the population, drives new research areas in the search for economically viable and sustainable sources from the environmental point of view. Among the available natural sources, lignocellulosic residues from agricultural and forestry activities are highlighted as to their quantity and availability. The objective of this work was to evaluate the energy potential of residues generated from the processing of five agricultural crops produced in the state of Pará. The research was divided into two stages: in the first stage, the productive survey was carried out and the characterization of the physical, chemical and energetic properties and in the second part the thermal behavior of the residues was studied. The design was a completely randomized design, composed of five treatments (coconut shell, cocoa, palm tree bunch, corn cob, açai fruit seed) and three replications. The analyzes showed that there was a difference between the properties and composition of the residues. The initial moisture content and the low density were considered as the main limiting factors. Among the residues studied, the açai fruit seed, the corn cob and the palm frond were the ones that presented the greatest potential for energy use considering their availability and calorific value. It has been estimated that the state energy potential is around 42 thousand TJ / year. The microregions of Cametá, Tome-açú and Paragominas presented greater aptitude for the use of waste energy. With the results referring to thermogravimetric analysis, it was observed that the combustion of the residues occurred in three stages. The mass loss of the residues occurred at different temperatures and intensities. The açai fruit seed was the biomass that presented greater thermal resistance and regularity in the release of the energy.

Keywords: Renewable Energy, Combustion, Energy Characterization, Potential.

SUMÁRIO

RESUMO	vii
ABSTRACT	ix
1 CONTEXTUALIZAÇÃO	11
REFERÊNCIAS	14
2 LEVANTAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DE RESÍDUOS	16
RESUMO	16
ABSTRACT	16
2.1 INTRODUÇÃO	17
2.2 MATERIAL E MÉTODOS	19
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
2.4 CONCLUSÃO	41
REFERÊNCIAS	41
3 ESTUDO DA DEGRADAÇÃO TÉRMICA DE RESÍDUOS AGRÍCOLAS POR MEIO DE ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA	50
RESUMO	50
ABSTRACT	50
3.1 INTRODUÇÃO	51
3.2 MATERIAL E MÉTODOS	52
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
3.4 CONCLUSÃO	61
REFERÊNCIAS	61
CONCLUSÕES GERAIS	66

1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Desde 2007, o governo brasileiro investe em projetos que visam melhorar as condições de infraestrutura social, urbana, logística e energética nacional, por meio de iniciativas como o Programa de Aceleração do Crescimento-PAC, que tem como objetivo estimular o crescimento e garantir o desenvolvimento acelerado e sustentável (BRASIL, 2017).

Melhoria das condições produtivas, assim como, da qualidade de vida da população acarreta no aumento da demanda energética (SAXENA; ADHIKARI; GOYAL, 2007). Isso significa que esforços precisam ser feitos para garantir energia em quantidade e com qualidade para alcançar o desenvolvimento que se pretende.

Dentro deste contexto, surgiu o Programa de Incentivo a Fontes Alternativas de Energia Elétrica-PROINFA, criado pelo governo brasileiro com intuito de diversificar a matriz energética nacional através do aumento da participação de fontes renováveis, mediante a instalação de usinas eólicas, pequenas centrais hidrelétricas e termelétricas a biomassa.

Aumentar a representatividade de outras fontes na matriz brasileira contribui para diminuir a dependência de usina hidroelétrica, que atualmente é considerada como a principal fonte de energia elétrica no País. De acordo com Wenceslau (2013), essa fonte é altamente dependente do ciclo hidrológico e em períodos de baixa pluviosidade o provimento energético torna-se mais instável e isso pode afetar a segurança energética nacional.

Neste sentido, o uso de biomassa está entre os recursos promissores para complementar o fornecimento energético nacional. Pois é um recurso de emissão neutra de carbono, apresenta baixo conteúdo de enxofre comparado com outros combustíveis e pode ser utilizado de maneira similar aos combustíveis fósseis (IDRIS et al., 2012; DERMIBAS, 2005; DERMIBAS, 2000).

A biomassa pode ser utilizada como material combustível para abastecer usinas termelétricas, capazes de proverem energia ao Sistema Interligado Nacional- SIN, sistemas de cogeração em indústrias e sistemas isolados, para atenderem comunidades afastadas que estão em grandes números nas Regiões Norte e Nordeste do País (VELÁZQUEZ et al., 2014). Podendo ser utilizada na forma de combustível sólido, líquido ou gasoso (VANNI, 2008; DERMIBAS, 2000).

São exemplos de biomassa que podem ser utilizadas como biocombustíveis os resíduos florestais, resíduos de indústrias madeireiras, resíduos agrícolas (colheita, processamento e/ou resíduo animal), resíduos de arboricultura, resíduo de esgoto e plantações para fins energéticos (WELFLE, 2017).

Em 2017, o país apresentou cerca de 546 usinas termelétricas abastecidas com biomassas, com potência total instalado de 14.518 MW, representando 8,84% da matriz energética brasileira (ANEEL, 2017). Dessas, 399 utilizam bagaço da cana de açúcar, 54 são a base de resíduos florestais, 18 a base de licor negro, 12 que operam com casca de arroz. A partir dessas informações, observa-se que majoritariamente as biomassas mais representativas são provenientes de resíduo de processamento agroindustrial e florestal.

O uso de resíduos lignocelulósicos para fins energéticos além de contribuir com o aproveitamento integral das culturas, apresenta forte apelo ambiental auxiliando na gestão de resíduos sólidos decorrentes da colheita e/ou beneficiamento.

O Brasil dispõe de grande potencial de expansão no uso da biomassa em sua matriz energética, mediante a possibilidade de aumento do número de plantio de culturas energéticas (florestais ou agrícolas) ou até mesmo a partir do uso de resíduos de inúmeras culturas que apresentam seu potencial energético ainda desconhecido.

Neste sentido, a pesquisa surgiu com o propósito de difundir o uso de biomassa para produção energética a partir da avaliação dos resíduos provenientes do beneficiamento de cultivos agrícolas plantados no Estado do Pará.

Justifica-se a pesquisa no Estado do Pará, por apresentar clima favorável para a produção de biomassa, por ser uma Região com grandes áreas de pastagens abandonadas que podem ser utilizadas para plantio e segundo Dantas e Fonteles (2005), por apresentar base econômica voltada a atividade do setor primário (extrativismo vegetal, pecuária e agricultura), dispondo de biomassas residuais que podem ser levantadas e avaliadas para verificar a sua aptidão para uso energético.

Embora haja um enorme potencial de exploração, para se obter sucesso no uso de combustível de biomassa na matriz energética nacional, é preciso ampliar e melhorar o conhecimento sobre sua composição e propriedade. Visto que a quantidade de energia disponível varia de acordo com a espécie, o tipo de tecido vegetal, o local e estágio de crescimento (JENKINS et al., 1998). E a escolha da rota de conversão vai depender, dentre outros fatores, do tipo e quantidade de matéria prima disponível (VASSILEV et al., 2010; DERMIBAŞ, 2001).

A dissertação foi dividida em dois capítulos, onde o primeiro apresenta informações sobre o levantamento da produção agrícola no Estado do Pará, a fim de conhecer o potencial de geração de resíduos e a caracterização física, química e energética dos mesmos para verificar a aptidão desse material no uso energético. Já no capítulo 2, foi realizado o estudo da combustão dos resíduos agrícolas por meio da análise termogravimétrica e térmica diferencial, de forma a identificar as etapas e reações decorrentes do aquecimento programado das amostras.

Com isso, espera-se fornecer uma base e referência para uso de resíduos de cacau, açaí, coco, dendê e milho como materiais combustíveis para geração de energia.

A questão científica que se pretende responder é: Em termos quali-quantitativos, essas biomassas residuais apresentam características favoráveis para uso na combustão direta?

1.1 Hipótese

“Os resíduos agrícolas em estudo (caroço de açaí, casca de cacau, casca de coco, cacho de dendê e sabugo de milho) apresentam características quali-quantitativas favoráveis para uso na combustão direta”.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar o potencial energético de resíduos gerado do beneficiamento de cultivos agrícolas produzidos no Estado do Pará, bem como, identificar as microrregiões com aptidão para desenvolverem projetos de aproveitamento de resíduos.

1.2.2 Objetivos específicos

Constituem os objetivos específicos:

- a) Estimar a produção anual de resíduo;
- b) Determinar as propriedades físicas, químicas e energética dos resíduos;
- c) Comparar as propriedades obtidas entre os resíduos;
- d) Investigar o comportamento da combustão das biomassas e estabelecer a relação com os componentes químicos;
- e) Estimar quanto de energia estocada poderia ser aproveitada dos resíduos;

- f) Definir quais regiões apresentam maior aptidão para uso energético de resíduos.

REFERÊNCIAS

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. BIG – Banco de Informações de Geração. 2015. Disponível em: < <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm> > Acesso em: 04 dez 2017.

BRASIL. Programa de Aceleração do Crescimento. 5º Balanço PAC. Disponível em: < <http://www.pac.gov.br/pub/up/relatorio/c459e7bfc39c3f57794d61e42e24851b.pdf>>. Acesso em: 20 nov. 2017.

DANTAS, T. M.; FONTELES, L. V. **Avanço da fronteira agrícola na Amazônia**. 2005. disponível em: < http://bvsl.panaftosa.org.br/local/File/textoc/avancos_frenteira_agricola_amazonia.pdf >. Acesso em: 02 dez. 2017.

DERMIBAS, A. Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals. **Energy conversion and Management**, v. 42, n. 11, p. 1357-1378. 2000.

DEMIRBAS, A. Potential applications of renewable energy sources, biomass combustion problems in boiler power systems and combustion related environmental issues. **Progress in energy and combustion science**, v. 31, n. 2, p. 171-192. 2005.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanço Energético Nacional 2017**: ano base 2016. Rio de Janeiro: EPE, 2017. 296 p. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2017.pdf> Acesso em: 27 de Nov de 2017.

FIGUEIREDO, A. L., **Pirólise termoquímica de pós da fibra de coco seco em um reator de cilindro rotativo para produção de bio-óleo**. 2011. 113 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Petróleo) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.

JENKINS, B. M.; BAXTER, L. L.; MILES Jr, T. R.; MILES, T. R. Combustion properties of biomass. *Fuel processing technology*, v. 54, n. 1, p. 17-46, 1998.

VANNI, S. R. **Estudo de viabilidade econômica de fontes alternativas de energia de uma comunidade típica da região nordeste do Brasil**. 2008. 164 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Instituto de Pesquisa Energética e Nucleares, São Paulo, 2008.

VELÁZQUEZ, S.M.S.G.; SANTOS, S.M.A.; MOREIRA, J.R.; COELHO, S.T. Geração de Energia Elétrica em Comunidades Isoladas na Amazônia a partir de Biomassa Sustentável: Projeto ENERMAD. Disponível em: < https://www.researchgate.net/profile/Jose_Roberto_Moreira/publication/267826541_A_Geracao_de_Energia_Eletrica_em_Comunidades_Isoladas_na_Amazonia_a_partir_de_Biomassa_Sustentavel/links/548731eb0cf268d28f071e24/A-Geracao-de-Energia-Eletrica-em-Comunidades-Isoladas-na-Amazonia-a-partir-de-Biomassa-Sustentavel.pdf > Acesso em: 05 dez. 2017.

SAXENA, R. C.; ADHIKARI, D. K.; GOYAL, H. B. Biomass-based energy fuel through biochemical routes: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, n. 1, p. 167-178. 2009.

SINGH, N. B.; KUMAR, A.; RAI, S. Potential production of bioenergy from biomass in an Indian perspective. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 39, p. 65-78. 2014.

WELFLE, A. Balancing growing global bioenergy resource demands-Brazil's biomass potential and the availability of resource for trade. **Biomass and Bioenergy**, v. 105, p. 83-95. 2017.

WENCESLAU, F. F. **PROINFA: Uma contribuição para a diversificação da matriz energética no Rio Grande do Sul?**. 2013. 168 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Regional) – Universidade de Santa Cruz do Sul, Santa Cruz do Sul, 2013.

WELFLE, Andrew. Balancing growing global bioenergy resource demands-Brazil's biomass potential and the availability of resource for trade. **Biomass and Bioenergy**, v. 105, p. 83-95, 2017.

2 LEVANTAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DE RESÍDUOS

RESUMO

A busca por novas fontes de matéria prima para suprir a demanda energética brasileira vem crescendo. Dentre as fontes naturais disponíveis, os resíduos lignocelulósicos derivados principalmente de atividades agrícolas e florestais ganham destaque quanto a sua quantidade e disponibilidade, haja vista que a base econômica nacional gira em torno dos produtos agro-florestais, conseqüentemente toneladas de resíduos são produzidos anualmente. Com isso, o objetivo do trabalho foi avaliar em termos quali-quantitativo o potencial energético de resíduos provenientes do beneficiamento de cultivos agrícolas do estado do Pará e indicar áreas com maior aptidão para aproveitamento energético. Para tal, foi realizado o levantamento da produção agrícola e estimou-se a geração anual de resíduos dos cultivos de açaí, cacau, coco, dendê e milho com base nos dados de Produção Agrícola Municipal (PAM) do IBGE. De maneira geral, quando recém coletados os resíduos de cacau, coco e dendê apresentaram umidade entre 41-86%, apenas o sabugo de milho apresentou umidade abaixo de 13%. Houve efeito significativo do tipo de resíduo quanto ao poder calorífico, densidade básica e conseqüentemente densidade energética. Dentre os resíduos estudados, o caroço de açaí, o sabugo de milho e o cacho de dendê, foram os que apresentaram maior potencial para utilização energética haja vista sua disponibilidade e poder calorífico. Estimou-se que o potencial energético estadual seja em torno de 42 mil TJ/ano. As microrregiões de Cametá, Tome-açú e Paragominas apresentaram maior aptidão para aproveitamento energético dos resíduos.

Palavras-chave: resíduos; poder calorífico; potencial energético.

ABSTRACT

The search for new sources of raw material to supply Brazilian energy demand has been growing. Among the available natural sources, the lignocellulosic residues derived mainly from agricultural and forestry activities are emphasized as to their quantity and availability, since the national economic base revolves around agroforestry products, consequently tons of waste are produced annually. Therefore, the objective of this work was to evaluate in qualitative and quantitative terms the energy potential of residues from the processing of agricultural crops in the state of Pará and indicate areas with greater aptitude for energy use. For this purpose, a survey of agricultural production was carried out and the annual generation of residues of açaí, cacao, coconut, palm and maize crops was estimated based on IBGE's Municipal Agricultural Production (PAM) data. In general, when newly collected cocoa, coconut and palm residues presented humidity between 41-86%, only corn cob had moisture content below 13%. There was a significant effect of the type of residue on calorific value, basic density and consequently energy density. Among the residues studied, the açaí fruit seed, the corn cob and the palm frond were the ones that presented the greatest potential for energy use due to its availability and calorific value. It has been estimated that the state energy potential is around 42 thousand TJ/year. The microregions of Cametá, Tome-açú and Paragominas presented greater aptitude for the use of waste energy.

Keywords: waste; calorific value; energy potential.

2.1 INTRODUÇÃO

No Brasil, aproximadamente 59% da oferta energética advêm de fontes não renováveis, principalmente do petróleo e seus derivados que juntos somam 37,3% desse total (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE, 2016). Frente aos desafios de se promover o desenvolvimento do País de forma sustentável, uma das vertentes seria garantir o suprimento energético limpo e autossustentável, tornando-se necessário a substituição gradual desses combustíveis fósseis por fontes menos poluentes.

Neste cenário, vem crescendo a procura por matéria-prima alternativa que possa suprir a demanda de energia seja no âmbito local, regional ou nacional. Dentre as fontes naturais disponíveis, os resíduos lignocelulósicos derivados principalmente de atividades agrícolas e florestais ganham destaque quanto a sua quantidade e disponibilidade, haja vista que, boa parte da base econômica brasileira gira em torno da produção agroflorestal, conseqüentemente toneladas de resíduos são gerados.

O estado do Pará, dentre os estados da região norte do país, apresenta-se com grande potencial para uso de resíduos agrícolas na geração de energia, visto que é o segundo maior estado brasileiro e no que se refere a produção, em 2016 o total gerado neste estado foi de 10,4 milhões de toneladas de produtos agrícolas oriundos de culturas temporárias e permanentes, de acordo com dados da Produção Agrícola Municipal-PAM (IBGE, 2017). Comparando com o total produzido na região Norte do país, esse montante correspondeu a cerca de 45% do total.

Ao decompor o total produzido, verifica-se que entre os dez cultivos mais representativas no estado, constam o milho, açaí, cacau, dendê e coco. Essas espécies, somadas tiveram aproximadamente 3,4 milhões de toneladas de produção em 2016, ocupando uma área de 614 mil hectares (IBGE, 2017). Os subprodutos dessas culturas dentre outras destinações poderiam ser considerados como potenciais matérias primas para uso como combustível energético.

Todavia, para se obter sucesso no uso de biomassa residual como matéria prima energética, definir a forma mais adequada de conversão e até mesmo prever possíveis obstáculos que possam ser encontrados antes e durante a sua utilização, é necessário conhecer o seu potencial quali-quantitativo a partir da determinação da quantidade disponível, localização, sua composição e propriedades (NONES et al., 2017; CARDOEN et al., 2015; MCKENDRY, 2002).

Dentre as características que se deve conhecer dos combustíveis para uso energético estão: a densidade; o teor de umidade; o poder calorífico; a análise imediata (cinzas, materiais voláteis e carbono fixo); a composição elementar (C, N, H, O e S) e molecular (lignina, celulose, hemicelulose e extrativos) (PROTÁSIO, 2014; FERNANDES et al., 2013; VALE et al., 2011).

O teor de umidade representa a quantidade de água que uma biomassa pode conter e é influenciada diretamente pelo tipo de matéria prima selecionada. Para o uso em processo de conversão térmica como a pirólise, combustão e gaseificação, geralmente opta-se por materiais com baixo conteúdo de umidade, visto que o aumento da umidade pode afetar a combustão causando baixa ignição, diminuição da temperatura de combustão e afetando negativamente o balanço energético global (FERNANDES et al., 2013; SAIT et al., 2012; MCKENDRY, 2002).

O teor de materiais voláteis expressa a quantidade de material que se desprende da biomassa, em forma de gás, durante decomposição térmica do combustível, onde, a sua quantidade influencia diretamente no comportamento da combustão (OBERNBERGER; THEK, 2004), quanto maior esse valor em um combustível maior será a sua reatividade e mais fácil de iniciar a ignição e a queima (WERTHER, 2000).

O carbono fixo representa a parte do combustível livre de umidade, voláteis e cinzas. Recomenda-se que as biomassas para uso energético (combustão direta, co-incineração e produção de carvão vegetal) apresentem altos teores de carbono fixo (SOARES, 2014). E quanto as cinzas, são resíduos que resultam da combustão dos componentes orgânicos, a sua alta concentração reduz o poder calorífico e pode causar danos como a corrosão ou incrustações em equipamentos (DERMIRBAS, 2002)

A determinação da composição elementar da biomassa auxilia na qualificação da mesma para uso energético, representando o percentual em massa seca dos teores de carbono (C), hidrogênio (H), oxigênio (O), enxofre (S) e nitrogênio (N). Protásio et al. (2013) e Protásio et al. (2011) reportaram em seus trabalhos que a alta concentração de C e H contribui de forma positiva para produção de energia, pois apresentam correlação positiva com poder calorífico.

Já quanto o conteúdo de N e S, são importante parâmetro para verificar o potencial poluidor das biomassas uma vez que durante a sua queima são emitidos à atmosfera óxidos de enxofre e nitrogênio que podem causar poluição ambiental (REN et al., 2017; DERMIBAS, 2004).

Devido a biomassa ser composta de uma variedade de componentes como celulose, hemicelulose, lignina e em pequenas proporções os extrativos e cinzas e a sua proporção variar de espécie para espécie (QUIRINO et al., 2004; MCKENDRY, 2002;), a sua quantificação para uso energético se faz necessário, pois, a presença de algumas biomoléculas pode comprometer ou favorecer seu uso. De acordo com Queiroz, Ferreira e Rambo (2014), a lignina e os extrativos estão entre os componentes que contribuem de forma positiva no poder calorífico.

O poder calorífico exprime a quantidade de energia contida em dado material por unidade de massa, sendo expresso de duas formas: poder calorífico superior- PCS e poder calorífico inferior- PCI (LEITE et al., 2014; MCKENDRY, 2001). A diferença entre PCS e PCI é devido o primeiro representar a energia total que pode ser liberada na oxidação de um combustível incluindo o calor latente de água, já o segundo não inclui esta grandeza física (MCKENDRY, 2001). Para uso energético, o poder calorífico é um importante parâmetro para seleção das biomassas pois influenciam diretamente no rendimento energético e na definição do layout das plantas industriais (FERNANDES et al, 2013; VITAL; CARNEIRO; PEREIRA, 2013).

Em decorrência dos resíduos lignocelulósicos serem materiais bastante heterogêneos quanto a sua composição e propriedades, o trabalho buscou avaliar em termos quali-quantitativo o potencial energético de resíduos provenientes do beneficiamento de cultivos agrícolas do estado do Pará, indicando áreas com maior aptidão para aproveitamento energético.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1 Levantamento da produção agrícola do estado do Pará

O levantamento da produção agrícola do estado foi realizado com base no Banco de Dados Agregado- SIDRA do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística- IBGE (2017), que fornecem informações sobre: área plantada ou destinada à colheita, área colhida, quantidade produzida, rendimento médio e valor da produção de lavouras temporárias e permanentes, em várias regiões do Brasil levantados desde 1974 até 2016.

Foram selecionadas 5 espécies entre as 10 mais representativas na produção anual do estado do Pará, sendo elas: açaí (*Euterpe oleracea* Mart.), cacau (*Theobroma cacao* L.), coco (*Cocos nucifera* L.), dendê (*Elaeis guineensis* Jacq.) e milho (*Zea mays* L.). A estimativa da quantidade de resíduos gerados do cultivo de coco, dendê e açaí foi

calculada por meio do produto entre a quantidade produzida por cada espécie (toneladas), no ano de 2016 e coeficientes técnicos disponíveis na literatura que, por sua vez, representa a proporção de biomassa residual gerada em relação à massa inicial do produto (tabela 1).

Tabela 1. Coeficiente técnico encontrado na literatura de acordo com o tipo de resíduo.

Espécie	tipo de resíduo	Coeficiente técnico (ton res/ton prod)	Autor
açaí	caroço	0,79	Ribeiro (2017)
cacau	casca	0,8	Silva Neto et al. (2001)
coco	casca	0,85	Dias et al (2012)
dendê	cacho	0,25	Furlan Júnior et al. (2006)
milho	sabugo	0,6	Dias et al (2012)

Para estimar a quantidade de casca de cacau e do sabugo de milho, foi utilizada a equação 1, uma vez que a quantidade produzida anualmente do cacau e do milho, é referente apenas a massa das amêndoas do cacau e dos grãos de milho, que representa, respectivamente, apenas 20% e 40% do total do peso do fruto. Buscou-se por regra de três encontrar o valor referente ao peso da casca do cacau e sabugo de milho.

$$EQr = \frac{(Quant.prod * CT)}{\% prod IBGE} \quad \text{Equação 1}$$

Onde: EQr = estimativa da quantidade de resíduo (toneladas); Quant.prod = quantidade produzida no ano de referência; CT = coeficiente técnico (%); % prod IBGE = é a percentagem referente ao produto descrito no IBGE, em relação ao peso total (20% para o cacau e 40% para o milho).

2.2.2 Coleta e preparo das amostras

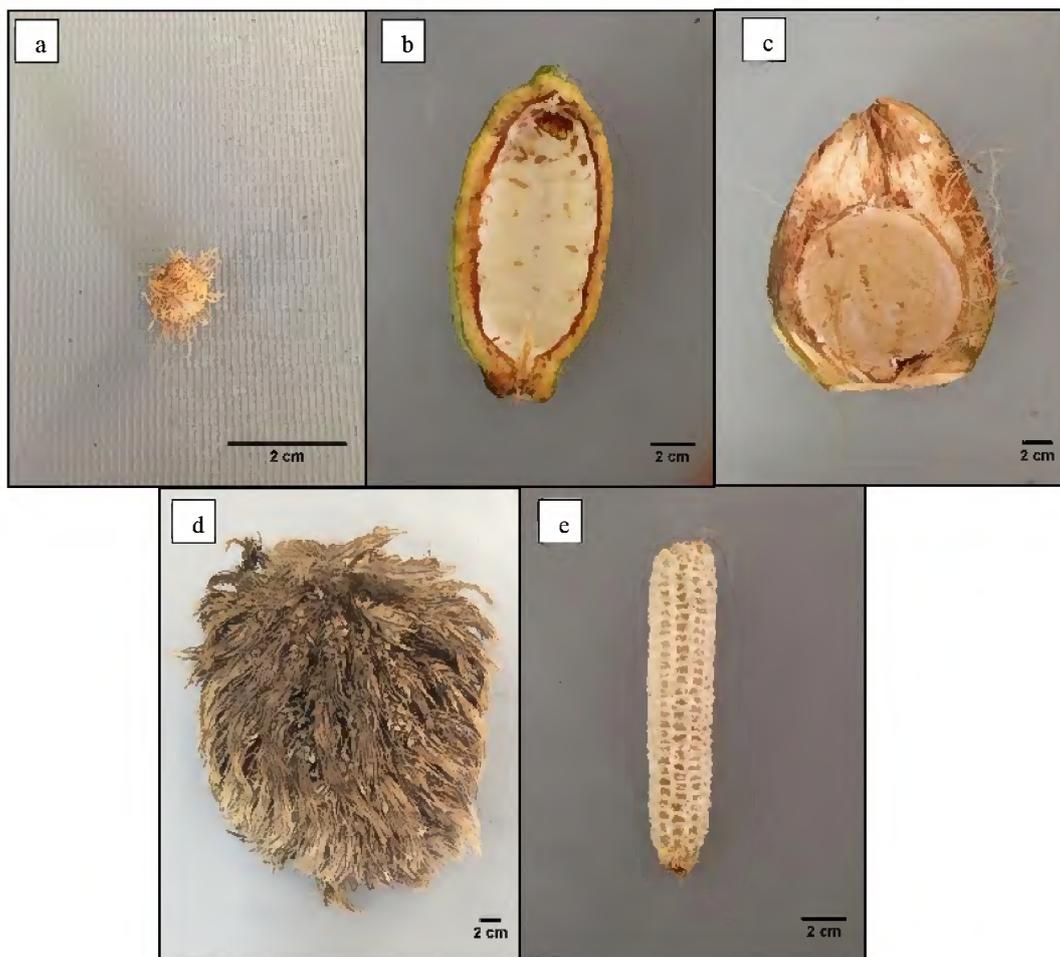
Informações sobre o local de coleta e o tipo de resíduo amostrado estão presentes na tabela 2. De cada biomassa foi realizada amostragem do tipo composta para obtenção das variáveis estudadas. As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos e levadas ao Laboratório de Tecnologia de Produtos Florestais da Universidade Federal Rural da Amazônia, para avaliar a aptidão das biomassas através da caracterização das propriedades físicas, químicas e energéticas.

Tabela 2. Informações gerais sobre as biomassas coletadas.

Produto	Tipo de resíduo	Descrição	Local de coleta
Açaí	caroço (semente)	Gerado após a extração da polpa do açaí, em despoldadores locais.	Município: Belém Mesorregião: Região Metropolitana de Belém – Pará Fornecedor: pequeno produtor
Cacau	casca (epicarpo, mesocarpo e endocarpo)	Gerado após a remoção das sementes.	Município: Marituba Mesorregião: Região Metropolitana de Belém – Pará Fornecedor: empresa
Coco	casca (epicarpo, mesocarpo e endocarpo)	Coletado após consumo da água do coco verde, na qual foi removido a parte comestível interna.	Município: Marituba Mesorregião: Região Metropolitana de Belém – Pará Fornecedor: pequeno produtor
Dendê	Cacho	Gerado após a extração dos frutos. No processo produtivo, os cachos com as sementes foram mergulhados em água quente para facilitar a remoção.	Município: Moju Mesorregião: Nordeste – Pará Fornecedor: empresa
Milho	Sabugo	Coletado após a remoção dos grãos, que previamente passaram pelo processo de secagem.	Município: Paragominas Mesorregião: Sudeste – Pará Fornecedor: pequeno produtor

Na figura 1 estão representados os aspectos externos dos resíduos em estudo, na qual: a letra “a” corresponde ao caroço (semente) do açaí, que é proveniente do fruto de uma das palmeiras nativas da região amazônica; as letras “b” e “c” vista transversal da casca do cacau e do coco, respectivamente; o cacho do dendê letra “d” material que é gerado após a remoção dos frutos que são utilizados para a produção de biodiesel e o sabugo do milho “e”.

Figura 1. Aparência física dos resíduos estudados, (a) caroço do açaí, (b) casca do cacau, (c) casca do coco, (d) cacho de dendê e (e) sabugo de milho.



2.2.3 Caracterização física e energética da biomassa

As propriedades físicas dos resíduos (umidade e densidade a granel) foram determinadas em duas condições de umidade, quando recém coletada e após atingirem a umidade de equilíbrio ao serem postas para secar ao ar livre durante um período de dois meses.

A densidade a granel dos resíduos foi determinada utilizando como base a norma NBR 6922 da ABNT (1981). Para tal, as amostras dos resíduos foram pesadas em um recipiente com massa e dimensões conhecidas.

Foi determinada a umidade das amostras em base úmida, pelo método gravimétrico, tomando-se uma amostra de 10 gramas colocados em placas de petri e levadas a estufa até obtenção de massa constante a $105 \pm 3^\circ\text{C}$. A densidade básica foi calculada por meio da relação entre a massa seca e o volume saturado, sendo o volume obtido pelo método de deslocamento da água em proveta graduada.

Para a determinação do poder calorífico superior, reduziu-se o tamanho das amostras em um moinho do tipo Willey, posteriormente, classificou-se as amostras em peneiras de 40-60 *mesh*, sendo utilizado o material retido nesta última. O poder calorífico superior (PCS) foi determinado em uma bomba calorimétrica digital da marca IKA C-200, seguindo a norma ASTM E711/87 (ASTM, 2004). O poder calorífico inferior (PCI) e o poder calorífico útil PCU foram calculados utilizando as equações abaixo, este último foi calculado com base na umidade quando coletado e após secagem ao ar livre.

$$PCI = PCS - (600 * 9H/100) \quad \text{Equação 2}$$

Onde: PCI é o poder calorífico inferior (kcal.kg^{-1}); PCS é o poder calorífico superior (kcal.kg^{-1}) e H é o teor de hidrogênio (%).

$$PCU = [PCI * (100 - u)/100] - 6 * u \quad \text{Equação 3}$$

Onde: PCU é o poder calorífico útil (kcal/kg); PCI é o poder calorífico inferior (kcal.kg^{-1}); u é o teor de umidade em base úmida (%).

A variável densidade energética (DE) dos resíduos estudados foi determinada pelo produto entre o poder calorífico inferior em MJ.m^{-3} e a densidade básica em g.cm^{-3} .

2.2.4 Composição química dos resíduos

Para realização das análises da química molecular (lignina, celulose, hemicelulose, cinzas e extrativos), da química imediata e elementar do material investigado, as amostras foram submetidas à secagem artificial em estufa a $\pm 103^\circ\text{C}$, trituração, moagem e classificação granulométrica em peneiras de 40, 60 e 200 *mesh* e levadas ao laboratório de biomateriais da Universidade Federal de Lavras.

A análise imediata foi realizada tomando como base as diretrizes da norma ASTM D1762/ 84 (ASTM, 2013) para obtenção das variáveis teor de materiais voláteis, teor de cinzas e carbono fixo. O Carbono fixo foi calculado subtraindo-se 100 % da soma dos valores percentuais obtidos de voláteis e cinzas.

Os componentes químicos, bem como, as normas utilizadas para a caracterização das biomassas estão presentes na tabela 3.

Tabela 3. Análises químicas e normas utilizadas.

Componentes químicos	Metodologia
Extrativos solúveis em acetona	TAPPI T280 PM-99 (TAPPI, 2000)
Extrativos solúveis em água quente	TAPPI 207 cm-99 (TAPPI, 1999)
Lignina solúvel	NBR 7989 (ABNT, 2010)
Lignina insolúvel	(GOMIDE; DEMUNER, 1986)
Holocelulose	(BROWNING, 1963)
Celulose	(KENNEDY; PHILLIPS; WILLIANS, 1987)
Cinzas	NBR 13999 (ABNT, 2003)

O teor de hemicelulose foi calculado por diferença entre o teor de holocelulose e celulose. O teor de lignina total foi obtido por meio da soma dos valores obtidos da lignina solúvel e insolúvel. E os extrativos totais pela soma do percentual obtido material extraído em acetona e em água quente.

A composição elementar dos resíduos estudados, foi determinada em um analisador universal da marca Elementar (modelo Vario Micro Cube), onde obteve-se teor de carbono (C%), hidrogênio (H%), nitrogênio (N%), enxofre (S%). O oxigênio (O%) foi quantificado por meio da equação 4. Para esta análise foi utilizado 2 mg de amostra seca com granulométrica entre 0,074 a 0,250 mm (60-200 mesh).

$$O = 100 - (C + H + N + S + Cz)$$

Equação 4

Onde: O é o teor de oxigênio (%), C é o teor de carbono (%), H é o teor de hidrogênio (%), N é o teor de nitrogênio (%), S é o teor de enxofre (%) e Cz correspondendo ao teor de cinzas (%) de cada biomassa.

2.2.5 Estimativa do potencial energético das biomassas

Para a estimativa do potencial energético de cada biomassa foram utilizados dados da estimativa da massa seca de cada cultivo e o poder calorífico inferior. A estimativa da massa seca foi obtida, conforme a equação 5.

$$MS = EQr - \left(\frac{EQr * TU}{100} \right)$$

Equação 5

Onde: MS = estimativa da massa seca, em toneladas; EQr = estimativa da quantidade de resíduo, em toneladas; TU = teor de umidade em base úmida encontrado nos resíduos estudados, em %.

A estimativa do potencial energético foi determinada, com base nos dados de produção agrícola do IBGE ao nível de microrregião. O cálculo foi realizado

multiplicando a massa seca encontrada na equação 5 para cada biomassa pelo poder calorífico inferior (MJ/ton), o resultado foi expresso em Terajoule por ano.

$$PE = MS * PCI \quad \text{Equação 6}$$

Onde: PE = potencial energético, em TJ/ano; MS = massa seca do resíduo produzido no ano de 2016; PCI = poder calorífico inferior das biomassas, em MJ/tonelada.

Com posse dos dados da quantidade de energia potencial disponível de cada resíduo gerado nas 22 microrregiões do estado, foi confeccionado um mapa no *software* ArcGis 10.1, para demonstração da distribuição do total disponível e das biomassas correspondentes. Foram selecionadas as regiões com produção acima de 500 TJ/ano para a elaboração do mapa.

Para a confecção do mapa, foi adquirido no site do IBGE a malha territorial dos municípios do estado do Pará. As áreas foram destacadas quanto a estoque de energia em seis classes de valores, indicando as regiões de maior potencial em gradiente de cores. Já a escala em círculo, refere-se à quantidade de energia disponível por biomassa em quatro classes de valor.

2.2.6 Delineamento experimental e análise dos dados

O delineamento adotado na pesquisa foi o inteiramente casualizado, com 5 tratamentos (casca do coco, cacau, cacho de dendê, sabugo do milho, caroço do açaí) e 3 repetições para cada análise, considerando como fator de variação os tipos de biomassas. Foram testados os seguintes parâmetros: físicos (densidades básica e energética), energético (poderes caloríficos superior e inferior) e composições química (imediate, elementar e molecular).

Os dados foram submetidos aos testes de normalidade de Shapiro-Wilk e homogeneidade de variância de Levene, ambos à 95% de probabilidade. Após comprovação da normalidade e homogeneidade de variância dos dados, realizou-se a análise de variância univariada e aplicou-se o teste de Tukey a 5% de significância para a comparação múltipla das médias. A análise estatística foi realizada com auxílio do programa *R* (R Development Core Team, 2014).

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1 Levantamento de produção e estimativa de geração de resíduo

Segundo o *ranking* de produção agrícola de lavouras temporárias e permanentes do estado do Pará, os cultivos de açaí, cacau, coco, dendê e milho estão entre as espécies com maior área de cultivo e produção (Tabela 4), correspondendo a 44% das áreas plantadas no Pará.

Tabela 4. Áreas cultivadas e quantidade produzida de cultivos agrícolas no Pará no ano de 2016.

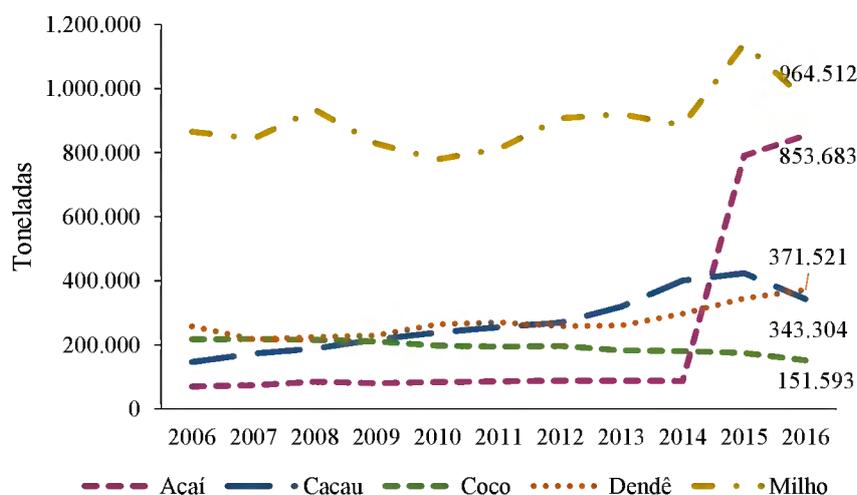
Ranking	Cultura	Área cultivada		Quantidade produzida	
		(hectare)	%	(toneladas)	%
1	Soja (em grão)	433.813	30,95	1.304.598	12,45
2	Mandioca	291.872	20,83	4.263.013	40,70
3	Milho (em grão)	198.461	14,16	643.008	6,14
4	açaí	166.509	11,88	1.080.612	10,32
5	Cacau (em amêndoa)	130.193	9,29	85.826	0,82
6	Dendê (cacho de coco)	99.402	7,09	1.486.082	14,19
7	Arroz (em casca)	72.973	5,21	181.660	1,73
8	Banana (cacho)	42.510	3,03	504.907	4,82
9	Feijão (em grão)	31.361	2,24	24.066	0,23
10	Coco-da-baía	19.188	1,37	178.345	1,70

Fonte: Adaptado de SIDRA/IBGE (2017).

Aproximadamente 1,08 milhão de toneladas de açaí; 1,5 milhão de cacho de coco de dendê; 643 mil toneladas de grão de milho; 178 mil toneladas de coco e 86 mil toneladas de amêndoas de cacau foram produzidos em todo o Pará ano de 2016. Comparando com outros estados brasileiros é o maior produtor de dendê e açaí, o 2º maior de cacau, o 4º maior produtor de coco e o 11º de milho.

Com essa grande participação na produção nacional, por conseguinte, é gerado uma grande quantidade de resíduos durante o beneficiamento/colheita desses produtos. Esse montante de biomassa residual foi estimado na figura 2, em uma série histórica de dez anos com base nos dados de produção anual da PAM (IBGE, 2017).

Figura 2. Estimativa de produção de resíduo de caroço de açaí, casca de cacau, casca de coco, cacho de dendê e sabugo de milho em um cenário de 10 anos.



Fonte: Adaptado de SIDRA/IBGE (2017).

Observa-se pelo gráfico que houve uma tendência de crescimento na geração de resíduos dessas espécies, nos últimos 10 anos, em decorrência do aumento da quantidade produzida no estado. Só no ano de 2016, estima-se que a quantidade gerada de sabugo de milho foi entorno de 965 mil toneladas, cerca de 854 mil toneladas de caroço de açaí, 343 mil toneladas de casca de cacau, 152 mil toneladas de casca de coco e 372 mil toneladas de cacho de dendê. O caroço de açaí apresentou variação abrupta no gráfico pois de 2006 a 2014 foi considerado apenas os dados de extrativismo vegetal.

Ao avaliar a quantidade de resíduos gerados: o sabugo de milho, o caroço de açaí, o cacho de dendê e casca de cacau foram os mais expressivos. Embora o coco tenha apresentado uma queda de produção de 2006 a 2016, ainda assim é uma das dez culturas que mais geram resíduos no estado.

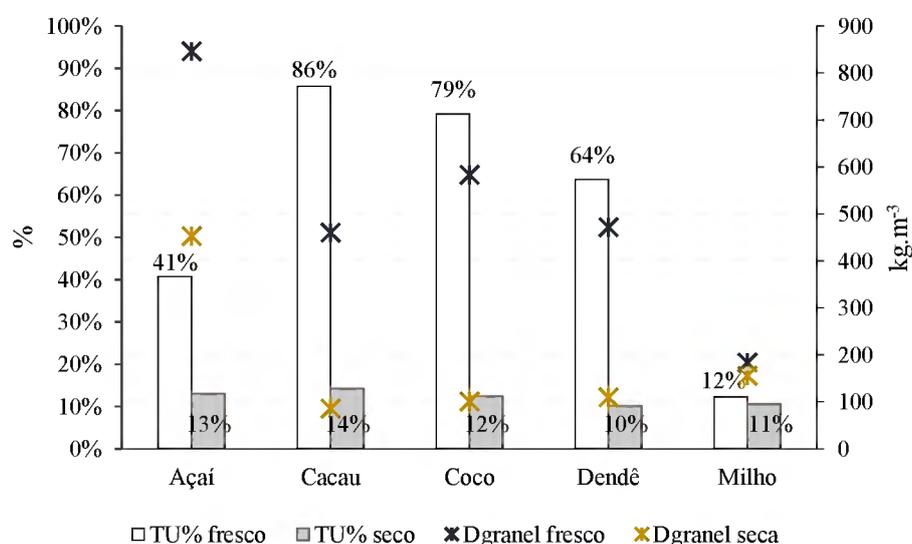
Quanto ao cacau, observa-se tendência de aumento de produção desde 2008 que foi o período em que o governo estadual criou a lei nº 7.093 (PARÁ, 2008) com o objetivo de promover e/ou apoiar ações voltadas ao desenvolvimento sustentado das zonas de produção de cacau e aumentar a eficiência de produção e comercialização para promover a cacauicultura regional.

O valor total de geração de resíduo, não levou em consideração os usos alternativos que possam existir atualmente no estado, apenas a estimativa do total gerado baseado na produção agrícola estadual.

2.3.2 Propriedades física e térmica da biomassa

Valores referentes a média de teor de umidade, densidade a granel de cada resíduo agrícola estudado estão presentes na figura 3. Observa-se que a casca do cacau, foi a biomassa que apresentou maior teor de umidade em base úmida, correspondendo a uma massa de água de aproximadamente 86% do seu peso fresco, seguido da casca de coco e do cacho de dendê. Já o sabugo de milho apresentou baixo valor de umidade, devido o mesmo passar pelo processo de secagem durante o seu beneficiamento, para facilitar a remoção dos grãos.

Figura 3. Valores médios de teor de umidade e densidade a granel das biomassas em condição úmida e seca



Na literatura é estipulado um limite de umidade em base úmida de 55% a 65% para iniciar o processo de combustão e fornece energia para o sistema (VITAL; CARNEIRO; PEREIRA, 2013; QUIRINO et al., 2004; QUAACK; KNOEF; STASSEN, 1999; JENKINS et al., 1998). A casca do cacau e coco, quando recém-coletados se encontraram muito acima do limite estabelecido.

O elevado teor de umidade nos combustíveis de biomassa, reduz a quantidade de energia produzida durante a queima, pois parte da energia que seria liberada é utilizada para evaporação da água contida em seu interior (WERTHER et al., 2000) diminuindo assim a sua eficiência energética (MCKENDRY, 2002; LIMA; ABDALA; WENZEL, 2008).

A secagem ao ar livre dos resíduos proporcionou redução bem acentuada do conteúdo de umidade das biomassas que passaram a apresentar em média 12% de

umidade. Valores próximos ao indicado para compactação de biomassas para a produção de briquetes e pellets recomendado por Obernberger e Thek (2010).

A densidade a granel dos resíduos foi também afetada pelo processo de secagem ao ar livre. Quando frescos, a densidade das biomassas era de 845,55 kg.m⁻³ para o caroço de açaí; 459,68 kg.m⁻³ casca do cacau; 583,14 kg.m⁻³ casca do coco, 471,43 kg.m⁻³ cacho de dendê e 183,36 kg.m⁻³ sabugo de milho. Após atingirem a umidade de equilíbrio do ambiente, os valores de densidade foram reduzidos cerca de 46%, 81%, 83%, 77% e 15%, respectivamente.

Com exceção do sabugo de milho, a venda de resíduo fresco pelo seu peso não seria uma opção viável para comercialização do material estudado, visto que o comprador estaria adquirindo um produto que mais da metade do peso seria representado por água, e isso iria encarecer o transporte e armazenamento do mesmo.

A DG_{seca} entre as biomassas variou bastante de acordo com o tipo de resíduo, onde, a casca do cacau (85,33 kg.m⁻³) e do coco (100,37 kg.m⁻³) e o cacho de dendê (109,18 kg.m⁻³) apresentaram os menores valores quando comparado ao caroço de açaí (452,65 kg.m⁻³) e sabugo de milho (155,38 kg.m⁻³). Além da umidade das biomassas (LAM et al., 2008) outro fator como o tamanho e o formato dos resíduos contribuiu para a diferença nos valores observados. Isso ocorre devido as partículas de menores dimensões reduzirem a quantidade de espaços vazios e conseqüentemente facilitam a acomodação do material no recipiente.

A densidade a granel de algumas biomassas como grama, palha e serragem comumente apresentam densidade abaixo de 150 kg.m⁻³, isso afeta a sua competitividade com outras fontes de energia (RYU et al., 2006), pois baixos valores de densidade a granel aumentam o custo com transporte, armazenamento e dificultam a manipulação da biomassa (EVARISTO et al., 2016; RYU et al., 2006; OBERNBERGER & THEK, 2004; WERTHER et al., 2000).

E no estado do Pará este custo de transporte é intensificado visto que apresenta grande deficiência logística. Segundo dados da Confederação Nacional de Transporte CNT (2017) o estado possui mais de 86% das suas vias, classificadas como péssimas, ruins e regulares. Inviabilizando-se assim o transporte a longa distância de resíduos como o de cacau, coco e dendê.

Os resultados obtidos da análise da densidade básica evidenciaram que houve diferença estatística entre os resíduos lignocelulósicos ao nível de 5% de significância (tabela 5). A biomassa que se destacou quanto a sua densidade foi o caroço de açaí,

apresentando valores próximos ao encontrado em madeira de eucalipto, que apresenta valores de 0,45 a 0,56 g.cm⁻³ (RIBEIRO; ZANI FILHO, 1993).

Tabela 5. Valores de média e desvio padrão das propriedades físicas e energética das biomassas.

Parâmetros	Unid	Caroço de açaí	Casca de cacau	Casca de coco	Cacho de dendê	Sabugo de milho
Db	kg.m ⁻³	703,33 ^{±0,01} a	91,00 ^{±0,01} e	266,00 ^{±0,01} b	206,00 ^{±0,01} c	165,56 ^{±0,01} d
PCS	MJ.kg ⁻¹	19,17 ^{±0,07} b	17,68 ^{±0,06} d	18,53 ^{±0,07} c	19,63 ^{±0,04} a	18,33 ^{±0,17} c
PCI	MJ.kg ⁻¹	17,86 ^{±0,07} a	16,49 ^{±0,06} c	17,29 ^{±0,07} b	18,14 ^{±0,04} a	17,01 ^{±0,17} b
PCU	MJ.kg ⁻¹	15,21 ^{±0,06}	13,83 ^{±0,05}	14,92 ^{±0,06}	16,08 ^{±0,04}	15,61 ^{±0,15}
	MJ.kg ⁻¹	9,06 ^{±0,10}	0,20 ^{±0,01}	1,62 ^{±0,01}	4,99 ^{±0,02}	15,36 ^{±0,06}
DE	GJ.m ⁻³	12,56 ^{±0,03}	1,50 ^{±0,00}	4,60 ^{±0,01}	3,74 ^{±0,00}	3,04 ^{±0,03}

Em que: Db- densidade básica; PCS- poder calorífico superior; PCI- poder calorífico inferior; PCU- poder calorífico útil; DE- densidade energética. Médias seguidas pelas mesmas letras na linha não diferiram entre si, a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Os valores de densidade apresentaram-se baixo para: a casca de cacau, sabugo de milho, cacho de dendê e casca de coco; e elevado para o caroço de açaí que por causa disso apresentou o valor de densidade energética expressivamente maior quando comparado aos outros tratamentos. Materiais mais densos armazenam maior quantidade de energia por metro cúbico e resistem mais tempo durante a combustão (VITAL; CARNEIRO; PEREIRA, 2013).

Houve diferença estatística também para a variável poder calorífico entre os tratamentos, sendo os maiores valores obtidos para o cacho de dendê e caroço de açaí. A variação observada no poder calorífico das biomassas estudadas pode estar associada aos diferentes tipos de tecidos vegetais e espécies que os originaram, pois, cada material apresentou constituintes químicos em proporções diferenciadas, e segundo reportado na literatura, este parâmetro é altamente correlacionado com a composição química das mesmas (SCATOLINO et al., 2017; PODDAR et al., 2014; VITAL; CARNEIRO; PEREIRA, 2013).

Protásio (2016) ao caracterizar o poder calorífico inferior de 14 clones de eucalipto, espécie tradicionalmente utilizada como matéria prima energética, encontrou valores entre 17,66-18,27 MJ.kg⁻¹. Valores próximos aos obtidos para os resíduos de açaí e dendê.

Houve diferença substancial entre o PCU calculado considerando a umidade quando recém coletadas e após o processo de secagem. Os resíduos após a secagem apresentaram aumento considerável na quantidade de energia que pode ser

disponibilizada por quilograma. Evidenciando assim a importância da secagem na utilização energética desses resíduos.

Em suma, o alto teor de umidade quando fresco aliado a baixa densidade básica e granel e conseqüentemente a baixa densidade energética dos resíduos do cacau, coco, dendê e milho, podem ser considerados um empecilho à utilização energética dos mesmos. Entre as alternativas que poderia ser adotada para tornar esses materiais mais competitivos, seria a adoção da secagem ao ar livre como pré-tratamento e a compactação para aumentar a quantidade de massa por volume.

2.3.3 Composição química dos resíduos

Na tabela 6 estão presentes os valores médios obtidos da composição elementar dos resíduos. Verificou-se através desta, que os elementos presentes em maior concentração foram: o carbono, o oxigênio e o hidrogênio, correspondendo juntos a um total de 93% da massa seca.

Tabela 6. Composição elementar dos resíduos de açaí, cacau, coco, dendê e milho.

Biomassa residual	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	S (%)
Caroço do açaí	48,47 ^{±0,32} a	5,80 ^{±0,07} b	43,03 ^{±0,4} b	1,18 ^{±0,03} c	0,10 ^{±0,0} ab
Casca do cacau	44,51 ^{±0,25} c	5,28 ^{±0,04} d	39,53 ^{±0,26} c	1,97 ^{±0,04} a	0,16 ^{±0,0} ab
Casca do coco	46,25 ^{±0,55} b	5,49 ^{±0,04} c	42,84 ^{±0,69} b	1,23 ^{±0,02} bc	0,22 ^{±0,11} a
Cacho do dendê	48,99 ^{±0,34} a	6,61 ^{±0,04} a	36,67 ^{±0,17} d	1,90 ^{±0,09} a	0,14 ^{±0,04} ab
Sabugo do milho	44,88 ^{±0,21} c	5,84 ^{±0,02} b	45,64 ^{±0,25} a	1,33 ^{±0,04} b	0,07 ^{±0,01} b

Médias seguidas da mesma letra na coluna, não diferiram entre si a 5% de significância pelo teste de Tukey, valores de média e desvio padrão.

O teor de carbono e hidrogênio presente nos resíduos de açaí e dendê foram estatisticamente superiores aos demais. Estes dois elementos, segundo literaturas da área, contribuem positivamente no poder calorífico (PROTÁSIO et al., 2011; VITAL; CARNEIRO; PEREIRA, 2013; DERMIBAS; DERMIBAS, 2004). Os resultados corroboram com essa afirmação dos autores.

Os teores de nitrogênio e enxofre foram pouco representativos na composição mássica dos resíduos. A casca de cacau e o cacho de dendê apresentaram os maiores valores de N e S. O enxofre foi o elemento que menos variou entre os resíduos, com valores entre 0,10- 0,22%.

No trabalho de Protásio et al. (2012) e Ramos e Paula et al (2011) foi observado

que os resíduos agrícolas apresentaram teores de N e S superiores aos obtidos em resíduos madeireiro. Esses autores encontraram teores que variaram 0,07% a 2,10% para o nitrogênio e de 0,01% a 0,04 para o enxofre (PROTÁSIO et al., 2012; RAMOS E PAULA et al., 2011). O intervalo de valores do presente trabalho está inserido dentro da faixa encontrada por esses autores.

É desejável a menor concentração desses elementos em combustíveis de biomassa, pois segundo Dermibas (2004) e Fernandes et al. (2013) podem gerar gases poluentes como o óxido de enxofre e de nitrogênio que podem levar a formação de chuva ácida e destruição da camada de ozônio. Comparado a combustíveis fósseis, a biomassa apresenta menor concentração desses elementos (REN et al., 2017; SAIT et al., 2012).

Na tabela 7 estão presentes os valores de média e desvio padrão da composição química molecular das biomassas. Os resíduos apresentaram composição química diversificada, onde, os constituintes de maior proporção foram representados pela holocelulose e lignina, que juntas corresponderam cerca de 82% do peso seco dos materiais em estudo.

Tabela 7. Composição química molecular dos resíduos

Biomassa	Extrativos		Holocelulose (%)	Celulose (%)	Hemicelulose (%)	Lignina total (%)	Cinzas (%)
	Acetona (%)	Água (%)					
Caroço do açaí	7,11 ^{±0,08} a	3,58 ^{±0,08} e	65,25 ^{±0,13}	32,80 ^{±0,84} a	32,45 ^{±0,84} b	22,63 ^{±0,9} c	1,42 ^{±0,04} e
Casca do cacau	2,05 ^{±0,21} d	18,02 ^{±0,31} a	41,88 ^{±0,87}	31,99 ^{±2,84} a	9,89 ^{±2,84} d	29,50 ^{±0,88} b	8,55 ^{±0,18} a
Casca do coco	2,64 ^{±0,12} c	7,93 ^{±0,17} c	53,87 ^{±0,64}	27,91 ^{±0,82} b	25,96 ^{±0,82} c	31,59 ^{±0,45} a	3,97 ^{±0,23} c
Cacho dendê	6,50 ^{±0,37} b	10,82 ^{±0,86} b	56,59 ^{±0,27}	32,74 ^{±0,9} a	23,85 ^{±0,9} c	20,42 ^{±0,22} d	5,68 ^{±0,18} b
Sabugo de milho	2,41 ^{±0,05} cd	5,43 ^{±0,19} d	68,80 ^{±1,06}	29,71 ^{±0,17} ab	39,08 ^{±0,17} a	21,13 ^{±0,27} d	2,24 ^{±0,10} d

Médias seguidas da mesma letra na coluna, não diferiram entre si a 5% de significância pelo teste de Tukey, valores de média e desvio padrão.

O teor de holocelulose variou bastante entre os resíduos, que apresentaram valores entre 41,88% (casca do cacau) a 68,80% (sabugo de milho). A celulose, foi o componente estrutural que apresentou menor variação entre as biomassas.

Dentre os constituintes químico de biomassas lignocelulósicas, a celulose e hemicelulose são os que apresentam maior instabilidade e menor resistência térmica (SANTOS et al., 2011). Para uso energético, segundo Bufalino et al (2012) é indicado que a biomassa apresente maior proporção de lignina do que holocelulose em sua constituição.

Os resultados obtidos na análise de lignina total, evidenciou que houve diferença significativa entre as biomassas, sendo os maiores valores encontrados na casca do coco

e do cacau. Além da quantidade, a composição e organização da lignina, varia de espécie para espécie (SANTOS et al., 2012).

Ao estudar diversas biomassas agrícolas e florestais para produção de pellets, Pereira (2014) encontrou valores de lignina que variaram de 20,50% para o bagaço de cana-de-açúcar e 30,35% para a madeira de Pinus. Esse intervalo de valores encontrado pela autora encontra-se muito próximo aos valores obtidos no presente trabalho, de 20,42%-31,59%.

Assim como o teor de extrativos, o teor de cinzas foi o componente de menor representatividade e que se apresentaram de forma bem heterogênia entre as biomassas.

O teor de cinzas foi mais baixo para o caroço de açaí (1,42%) e sabugo de milho (2,24%) e elevado para a casca de cacau (8,55%). Embora as biomassas estudadas tenham apresentado valores altos de cinzas, sua utilização na combustão direta ainda assim é uma opção viável, pois atualmente a casca de arroz é a segunda biomassa residual agrícola mais utilizada em usinas termelétricas no Brasil (BIG, 2017) e apresenta, segundo Werther et al (2000), uma faixa de variação de 18-25% de cinzas, valores muito acima do que foi encontrado nos materiais estudados.

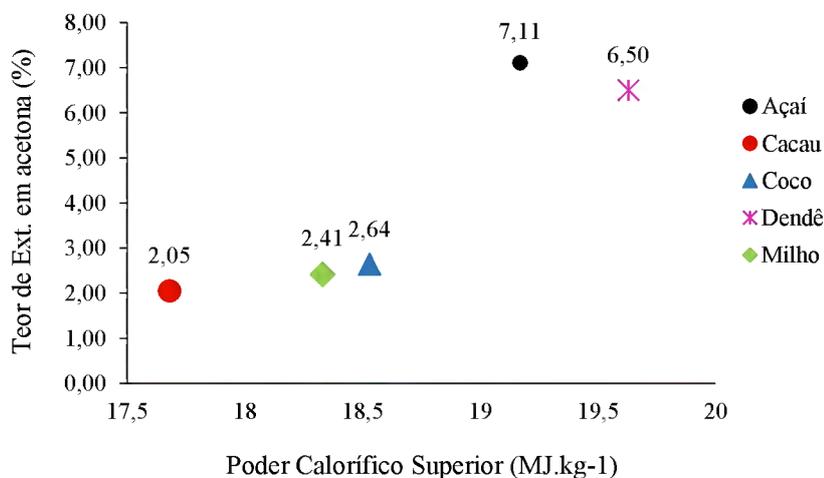
As biomassas que apresentaram maior conteúdo de extrativos foram: a casca de cacau (20,07%) e o cacho de dendê (17,31%). A presença de elevados teores de extrativos pode ser vantajoso para a produção de energia, devido a sua presença afetar positivamente o conteúdo energético das biomassas (CASTRO et al., 2013; DERMIBAS, 2002).

O teor de extrativos presentes em espécies madeireiras folhosas ocorrem entre 2-3% e em coníferas esse valor pode alcançar 10% (SARTO; SANSIGOLO, 2010). No presente estudo o valor médio encontrado de extrativos totais foi de 13%.

Os extrativos solúveis em água apresentaram-se em maior proporção do que os extraídos em acetona, com exceção do caroço de açaí que apresentou comportamento inverso. Oliveira et al. (2005) relata que os extrativos solúveis em água quente na sua maioria são representados por substância como a goma, taninos, açúcares, corantes e amidos. Já os que são extraídos em acetona são representados por graxas e ceras (SARTO; SANSIGOLO, 2010).

Segundo Browing (1963) citado por Santana (2009) a natureza dos componentes dos extrativos influenciam na contribuição energética. Foi observado que as biomassas que apresentaram maior poder calorífico foram aquelas que apresentaram maior teor de extrativo em acetona como pode ser visualizado na figura abaixo. Porém não foi observado o mesmo comportamento para o extrativo em água quente.

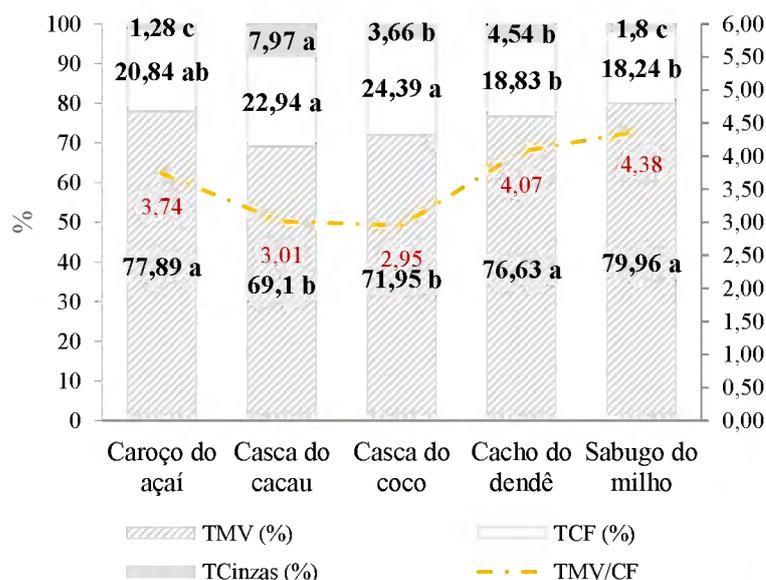
Figura 4. Relação entre o teor de extrativos em acetona e o poder calorífico superior das biomassas.



O gráfico nos evidencia que a presença de elevados teores de extrativos em acetona é uma característica vantajosa para a produção de energia, por afetar de forma positiva o poder calorífico. Protásio (2016) em sua pesquisa associou a presença de maiores concentrações de material extraído em acetona com a resistência a degradação térmica e prolongamento da combustão de madeira de eucalipto.

Na figura 5, estão presentes os valores médios da química imediata obtida para os resíduos estudados. A figura mostra que as biomassas residuais apresentaram diferença significativa nos teores de materiais voláteis (TMV), carbono fixo (TCF) e cinzas (TCz). Essas variáveis, de uma forma geral, dão uma ideia do comportamento das biomassas durante o processo de combustão.

Figura 5. Análise química imediata com valores médios de teor de materiais voláteis (TMV), carbono fixo (TCF), cinzas (TCz) dos resíduos.



Ao analisar o gráfico de barras, verifica-se que os resíduos se dividiram em dois grupos, o primeiro é quanto ao teor de materiais voláteis onde o açaí, o cacho de dendê e o sabugo de milho apresentaram os maiores valores e não diferiram entre si, e diferiram da casca de coco e do cacau que apresentaram as menores médias.

O teor de carbono fixo também apresentou dois grupos, sendo os maiores valores obtidos para o açaí, cacau e coco e os menores foram para o cacho de dendê e sabugo de milho. O teor de cinzas foi o que mais variou entre os resíduos.

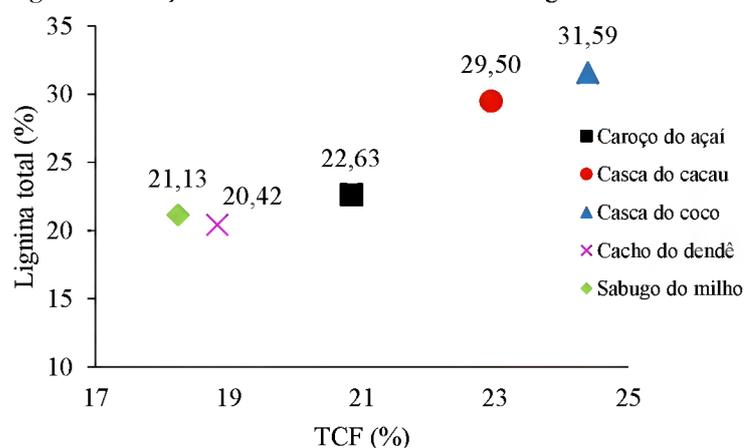
Ao comparar os resultados obtidos no presente trabalho com os resultados de outros autores, presentes no quadro 1, observa-se que, o teor de materiais voláteis dos resíduos agrícolas é, na maioria das vezes, menor do que o valores encontrado para madeira. Quanto ao teor de cinzas, por via de regra, os resíduos agrícolas podem gerar mais cinzas ao final da combustão.

O teor de carbono fixo apresentou-se de forma bem variada ao comparar os valores dos resíduos em estudo com os obtidos por outros autores. Porém os resíduos de cacau e coco foram superiores ao valor presente nos resíduos do quadro 1.

Quadro 1. Valores de referência para comparação dos resultados da análise imediata.

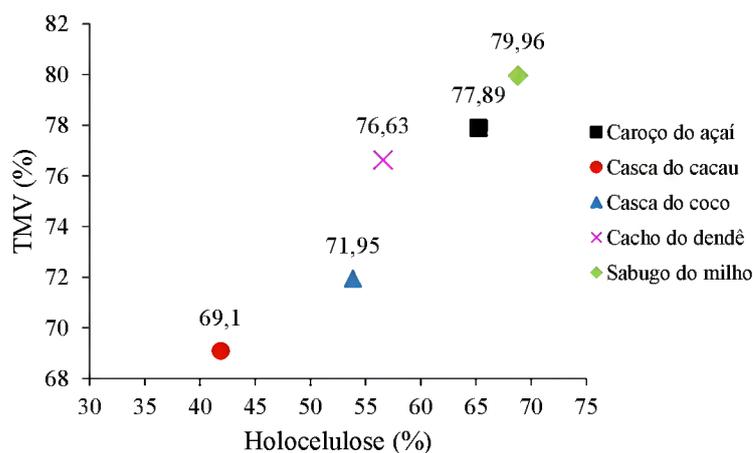
Autor	Biomassa	TMV (%)	TCF (%)	TCZ (%)
Resíduos estudados*	resíduo agrícola	69,1 – 79,9	18,24 – 24,4	1,28 – 7,9
Nones (2014)	resíduo de madeira	81,7 - 84,5	14,8 - 17,9	0,25 - 5,2
	resíduo agrícola	68 - 79,7	13 - 18,7	1,5 - 15,4
Nones et al (2014)	eucalipto em diferentes idades	81,5 - 82,7	16,8 - 18,3	0,25 - 0,43
Barbosa et al (2016)	madeiras	79,52 – 88,99	10,41 - 19,85	0,6 – 1,01
	resíduo agrícola	71,5 – 86,14	9,31 – 19,31	4,45 – 9,17
Ramos e Paula et al (2011)	resíduo de madeira	78,9 - 83	16,7 - 21	-
	resíduo agrícola	66,4 - 82	17,2 - 20,5	-
Protásio et al. (2013)	resíduo de madeira	85,7 - 86,7	12,9 - 14	0,3 - 0,4
	resíduo agrícola	68,3 - 86	13,1 - 18,6	0,9 - 16,8
Protásio (2016)	Clones de eucalipto	81,6 - 84	15,8 – 18,2	0,13 – 0,27

O teor de carbono fixo apresentou relação positiva com o teor de lignina, com isso, pôde-se inferir que a medida em que aumenta a concentração de lignina, maiores serão os rendimentos em carbono fixo. Este comportamento pode ser observado na figura 6. Collet (1955) citado por Brito e Barrichelo (1977), encontrou também uma ligação direta entre o rendimento em carbono fixo e o teor de lignina ao estudar uma série de espécies madeireiras.

Figura 6. Relação entre o teor de carbono fixo e lignina total.

Houve relação positiva também quanto aos teores de holocelulose e materiais voláteis, como mostra a figura 7. Este comportamento está associado a menor resistência térmica da celulose e hemicelulose que durante o processo de combustão contribuem na diminuição da temperatura da ignição e no aumento da taxa de decomposição (KAI et al., 2011).

Figura 7. Relação entre teor de materiais voláteis e holocelulose dos resíduos.



A relação TMV/TCF encontrado em combustíveis de biomassa, segundo reportado por Garcia et al. (2013) auxilia na compreensão da intensidade de combustão. Segundo este autor, materiais com alto TMV, tendem a apresentar ignição mais rápida. Com isso espera-se que o sabugo de milho e o cacho de dendê, que apresentaram os maiores valores de TMV/CF, entrem em ignição mais rapidamente e em temperaturas mais baixas, porém o tempo de combustão seria menor do que o da casca de cacau e do coco, que apresentaram maior concentração de carbono fixo.

Além de apresentarem diferença quanto aos valores percentuais das cinzas, na figura 8 pode ser observado que a coloração das mesmas variou de acordo com o tipo de biomassa. Segundo Holubcik, Jandacka e Malcho (2015) essa diferença pode estar relacionada com a composição química de cada material. As amostras apresentaram três tipos de coloração entre elas: cinza, branca e azulada. Da esquerda para direita caroço de açaí, casca de cacau, casca de coco, cacho de dendê e sabugo de milho.

No presente trabalho não foi determinado a composição das cinzas das biomassas, porém é de grande importância determinar seu conteúdo visto que, a alta concentração de metais alcalinos nas cinzas pode contribuir para formação de escórias, incrustações e aglomeração das cinzas nas caldeiras (FERNANDES et al., 2013; RYU et al., 2006; JENKINS et al., 1998).

Figura 8. Diferença na coloração das cinzas de acordo com o tipo de biomassa.

2.3.4 Estimativa do potencial energético

A distribuição do potencial energético das meso e microrregiões do estado do Pará, presentes na tabela 8 e figura 9, evidenciaram que houve variação substancial entre o potencial das mesmas, mostrando que além da quantidade total que pode ser gerada, os tipos de resíduos também variaram entre as localidades.

O estudo a nível de microrregião foi feito devido as biomassas em estudo terem apresentado baixos valores de densidade a granel, conseqüentemente, o transporte a longa distancias não seria uma opção viável para o aproveitamento dessa matéria prima como fonte energética. Dentre as 22 microrregiões do estado apenas 17 estão listadas na tabela abaixo, pois foram consideradas somente aquelas cujo estoque de energia estava acima de 500 TJ.ano⁻¹.

Tabela 8. Potencial energético dos resíduos de açaí, cacau, coco, dendê e milho no estado do Pará.

Mesorregião	Microrregião	Biomassa	Total (TJ/ano)	Soma (TJ/ano)
Baixo Amazonas	Santarém	casca de cacau	2.534	3.046
	Santarém	sabugo de milho	512	
Marajó	Portel	caroço de açaí	1.133	1.768
	Arari	caroço de açaí	635	
Nordeste	Cametá	caroço de açaí	8.487	17.893
	Tomé-Açu	cacho de dendê	5.057	
	Tomé-Açu	casca de coco	1.504	
	Tomé-Açu	sabugo de milho	1.052	
	Tomé-Açu	caroço de açaí	973	
Região Metropolitana de Belém	Bragantina	cacho de dendê	819	2.790
	Castanhal	caroço de açaí	1.450	
	Belém	caroço de açaí	793	
Sudeste	Castanhal	cacho de dendê	548	11.986
	Paragominas	sabugo de milho	5.085	
	São Félix do Xingu	sabugo de milho	1.795	
	Redenção	sabugo de milho	1.267	
	Parauapebas	sabugo de milho	1.232	
	Tucuruí	caroço de açaí	717	
	Tucuruí	sabugo de milho	666	
Conceição do Araguaia	sabugo de milho	628		

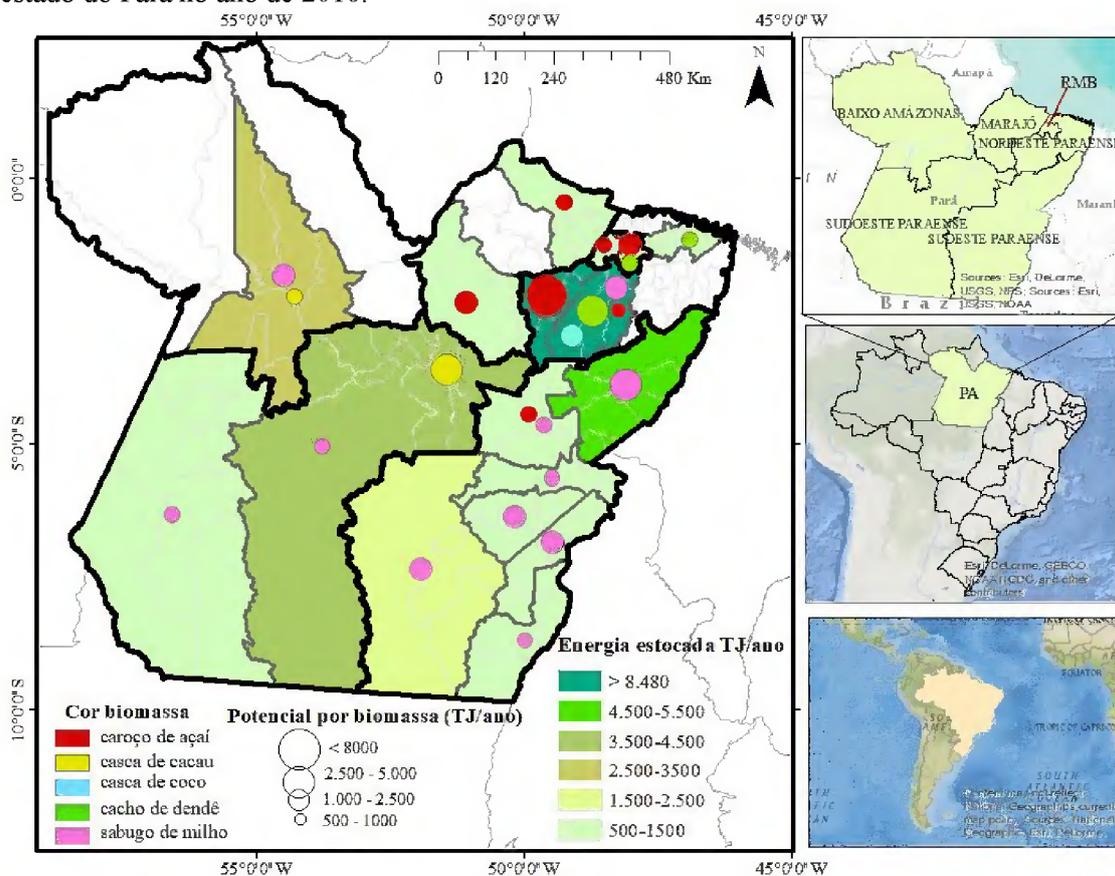
	Marabá	sabugo de milho	596	
	Altamira	casca de cacau	3.550	
Sudoeste	Altamira	sabugo de milho	587	4.681
	Itaituba	sabugo de milho	544	
	Total		42.165	

A estimativa do potencial energético total para o Estado foi em torno de 42 mil TJ no ano de 2016. Ao decompor esse valor, observou-se que a nível de mesorregião, o Nordeste e Sudeste paraense foram os que mais contribuíram para esse resultado. Em relação as biomassas, 38% do valor total é referente ao sabugo de milho, 34% ao caroço de açaí, 15% do cacho de dendê, 10% da casca de cacau e 4% referente a casca do coco.

No mapa de distribuição espacial do potencial energético dos resíduos (Figura 9), disponível por microrregião do Estado do Pará e os resíduos correspondentes, demonstrou que houve grande variação entre o potencial energético das microrregiões.

Foi constatado que cerca de 72% do total disponível é oriundo dos resíduos de milho e de açaí, essas culturas apresentaram-se de forma bem distribuída no mapa, ocorrendo nas 4 das 6 mesorregiões do estado. Enquanto que o coco e o dendê concentraram-se apenas nas microrregiões do Nordeste paraense e o cacau no Sudoeste e Baixo Amazonas.

Figura 9. Mapa de distribuição espacial dos resíduos de açaí, cacau, coco, dendê e milho no estado do Pará no ano de 2016.



As regiões destacadas de verde claro foram as que ocorreram em maior frequência, representando as microrregiões com potencial entre 500 a 1500 TJ.ano⁻¹, já as que apresentaram maior concentração energética, estão destacadas de coloração mais escura.

Os resultados apontaram que Cametá (8.487 TJ), Tomé-açu (8.586 TJ) e Paragominas (5.085 TJ) foram as regiões que concentraram maior quantidade de energia disponível. Sendo assim, indicados como locais mais propensos a serem desenvolvidos projetos de aproveitamento energético de biomassa residual.

Aumentar a participação de combustíveis de biomassa em termoeletricas no estado do Pará, através da inserção de novas matérias primas, poderia auxiliar na redução de utilização de combustíveis não renováveis que atualmente, segundo dados do Banco de Informação de Geração-BIG (Quadro 2), correspondem a cerca de 89% das termoeletricas em operação no Estado.

Quadro 2. Termelétrica instaladas no estado do Pará até março de 2018, por tipo de fonte.

Combustível	Tipo	Baixo Amazonas	Marajó	Nordeste	RMB	Sudeste	Sudoeste
Óleo combustível	não renovável	3	-	-	-	-	-
Óleo diesel	não renovável	17	10	4	24	12	8
Carvão mineral	não renovável	-	-	-	1	-	-
Gás de auto forno	não renovável	-	-	-	-	1	-
Bagaço de cana	renovável	-	-	-	-	1	-
Licor negro	renovável	1	-	-	-	-	-
Óleos vegetais	renovável	-	-	2	-	-	-
Resíduos florestais	renovável	-	1	-	4	1	-
Total		21	11	6	29	15	8

Fonte: BIG (2018)

2.4 CONCLUSÕES

- I. As mesorregiões do nordeste e sudeste paraense apresentam grande disponibilidade de resíduos gerados anualmente para os cultivos de açaí, cacau, coco, milho e dendê;
- II. Houve diferença entre as propriedades física e energética das biomassas residuais estudadas;
- III. O caroço de açaí, o sabugo de milho e o cacho de dendê, foram os que apresentaram maior potencial para utilização energética devido a sua disponibilidade e altos valores de poder calorífico.
- IV. Os resíduos apresentaram valores energéticos próximos ao encontrado para biomassas tradicionalmente utilizadas como combustíveis sólidos;
- V. Os resultados obtidos antevêm alguns problemas associados as propriedades físicas, que podem resultar em restrições técnicas que seria quanto ao seu elevado teor de umidade e a baixa densidade básica e em consequência disso, baixa densidade energética, inviabilizando-se assim o transporte a longas distâncias e a sua utilização direta sem a secagem prévia.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 6922: carvão vegetal: ensaios físicos de determinação da massa específica (densidade à granel). Rio de Janeiro; 1981.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 13999: Papel, cartão, pastas celulósicas e madeira – Determinação do resíduo (cinza) após a incineração a 525 °C. Rio de Janeiro; 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 7989: Pasta celulósica e madeira - Determinação de lignina insolúvel em ácido. São Paulo; 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 11941: madeira - Determinação da densidade básica. Rio de Janeiro; 2003. 6 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS - ASTM. ASTM D 1762-84: Standard method for chemical analyses of wood charcoal. Philadelphia: ASTM International, 2013. 2p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS - ASTM. ASTM E711-87: Standard Test Method for Gross Calorific Value of Refuse-Derived Fuel by the Bomb Calorimeter. Philadelphia: ASTM International, 2004. 8p

BARBOSA, I. R.; BARCELLOS, K. M.; SOUZA, J. E. A.; CAVALCANTI, C. A. S. H.; DANTA, L. P. M.; A. H. L. ALÉCIO. Caracterização do potencial energético de biomassas. In: XXI Congresso brasileiro de Engenharia Química, 2016, Fortaleza. **Anais do Congresso brasileiro de engenharia química**, 2016. Disponível em: < <https://proceedings.galao.com.br/cobeq/cobeq-2016/trabalhos/caracterizacao-do-potencial-energetico-de-biomassas/download?lang=pt-br>>, Acesso em: 30 de abril de 18.

BUFALINO, L.; PROTÁSIO, T. P.; COUTO, A. M.; NASSUR, O. A. C.; SÁ, V. A.; TRUGILHO, P. F.; MENDES, L. M. Caracterização química e energética para aproveitamento da madeira de costaneira e desbaste de cedro australiano. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 32, n. 70, p. 129. 2012.

BRITO, J. O. O uso energético da madeira. **Estudos avançados**, v. 21, n. 59, p. 185-193. 2007.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Correlações entre características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão vegetal: I. densidade e teor de lignina da madeira de eucalipto. **IPEF**, Piracicaba, v. 14, p. 9-20. 1977.

BROWNING, B. L. The chemistry of wood. Interscience Publisher. New York, 1963.

CNT- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTE. **Pesquisa CNT de rodovias 2017**. Disponível em: <http://pesquisarodovias.cnt.org.br/Pagina/relatorio_por_unidade_federativa> Acesso em: 11 dez. 2017

CARDOEN, D.; JOSHI, P.; DIELS, L.; SARMA, P. M.; PANT, D. Agriculture biomass in India: Part 1. Estimation and characterization. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 102, p. 39-48. 2015.

CASTRO, A. F. N. M.; CASTRO, R. V. O.; CARNEIRO, A. D. C. O.; LIMA, J. E.; SANTOS, R. C.; PEREIRA, B. L. C.; ALVES, I. C. N. Análise multivariada para seleção de clones de eucalipto destinados à produção de carvão vegetal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, n. 6, p. 627-635. 2013.

COLLET, F. Estudo comparativo, em escala de laboratório, de diversas madeiras utilizadas na fabricação de carvão vegetal. **Boletim da Associação Brasileira de Metais**, v. 42, n. 12, p. 5-14. 1955.

DERMIBAS, A. Combustion characteristics of different biomass fuels. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 30, p. 219-230. 2004.

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.

DIAS, J. M. S.; SANTOS, D. T.; BRAGA, M.; ONOYAMA, M. M.; MIRANDA, C. H.; BARBOSA, P. F.; ROCHA, J. D. **Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais**. Brasília, DF: Embrapa Agroenergia, 2012.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco energético nacional 2016**: ano base 2015. Rio de Janeiro, 62 p. 2016.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Plano Nacional de Energia 2030**. Rio de Janeiro, 408p. 2007.

EVARISTO, A. B.; GROSSI, J. A. S.; CARNEIRO, A. C. O.; PIMENTEL, L. D.; MOTOIKE, S. Y.; KUKI, K. N. Actual and putative potentials of macaúba palm as feedstock for solid biofuel production from residues. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 85, p. 18-24. 2016.

FERNANDES, E. R. K.; MARANGONI, C.; SOUZA, O.; SELLIN, N. Thermochemical characterization of banana leaves as a potential energy source. **Energy conversion and management**, v. 75, p. 603-608. 2013.

FURLAN JÚNIOR, J.; DE OLIVEIRA, R. F.; TEIXEIRA, L. B. **Compostagem de engaços de dendê em processo de revolvimento mecanizado**. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2006. 3p. (Embrapa Amazônia Oriental. Comunicado Técnico, 156).

GOLDSCHMID, O. Ultraviolet spectra. In: SARKANEN, K. V.; LUDWIG, C. H. Ed. Lignins. New York: Wiley-Interscience, 1971. p. 241-266.

GOLDEMBERG, José. Energia e desenvolvimento. **Estudos Avançados**, v. 12, n. 33, p. 7-15. 1998.

GOMIDE, J. L.; DEMUNER, B. J. Determinação do teor de lignina em material lenhoso: Método Klason modificado. *O Papel*, São Paulo, v. 47, n. 8, p. 36-38, 1986.

HOLUBCIK, M.; JANDACKA, J.; MALCHO, M. Ash melting temperature prediction from chemical composition of biomass ash. **The holistic approach to environment**, v. 5, n. 3, p. 119-125. 2015.

IBGE. Sistema IBGE de Recuperação Automática: SIDRA. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/home/pms/brasil>> Acesso em: 11 dez 2017.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ. **Relatório Anual 2016**. São Paulo, 2016. 100 p.

JENKINS, B.; BAXTER, L. L.; MILES JR, T. R.; MILES, T. R. Combustion properties of biomass. **Fuel processing technology**, v. 54, n. 1-3, p. 17-46. 1998.

JUNIOR, D. S. C. **Qualidade de briquetes produzidos a partir de resíduos de bambu e serragem de madeira**. 2015. 65 f. Dissertação (Mestrado em Ciências florestais) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Macaíba, 2015.

KENNEDY, F.; PHILLIPS, G. O.; WILLIAMS, P. A. Wood and cellulose: industrial utilization, biotechnology, structure and properties, Ellis Horwood: Chichester. 1987.

LAM, P. S.; SOKHANSANJ, S.; BI, X.; LIM, C. J.; NAIMI, L. J.; HOQUE, M.; YE, X. P. Bulk density of wet and dry wheat straw and switchgrass particles. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 24, n. 3, p. 351-358. 2008.

LEITE, E. R. S.; PROTÁSIO, T. P.; ROSADO, S. C. S.; TRUGILHO, P. F.; TONOLI, G. H. D.; BUFALINO, L. Avaliação da qualidade da madeira de Coffea arabica L. como fonte de bioenergia. **Cerne**, Lavras, v. 20, n. 4, p. 541-549, dez. 2014.

LIMA, E. A.; ABDALA, E. M.; WENZEL, A. A. Influência da umidade no poder calorífico superior da madeira. **Comunicado Técnico**, n. 220, EMBRAPA Florestas, Colombo-PR, 2008.

MCKENDRY, P. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. **Bioresource Technology**, Essex, v. 83, p. 37-46. 2002.

NONES, D. L. **Cadeia produtiva de pellets e briquetes de biomassa residual para geração de energia em Santa Catarina**. 2014. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia florestal) - Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2014.

NONES, D. L.; BRAND, M. A.; CUNHA, A. B.; CARVALHO, A. F.; WEISE, S. M. K. Determinação das propriedades energéticas da madeira e do carvão vegetal produzido a partir de *Eucalyptus benthamii*. **Floresta**, v. 45, n. 1, p. 57-64. 2014.

NONES, D. L.; BRAND, M. A.; AMPESSAN, C. G. M.; FRIEDERICHS, G. Biomassa residual agrícola e florestal na produção de compactados para geração de energia. **Ciências Agroveterinárias**, Lages, v.16, n.2, 2017.

OBERNBERGER, I.; THEK, G. Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behaviour. **Biomass and bioenergy**, v. 27, n. 6, p. 653-669. 2004.

OLIVEIRA, J. T. S.; SOUZA, L. C.; DELLA LUCIA, R. M.; SOUZA JÚNIOR, W. P. Influência dos extrativos na resistência ao apodrecimento de seis espécies de madeira. **Revista Árvore**, v. 29, n. 5. 2005.

PARÁ (Estado). Lei Estadual nº 7.093, de 16 de Janeiro de 2008. Institui o Programa de Aceleração do Crescimento e Consolidação da Cacaucultura no Estado do Pará - PAC CACAU-PA e cria o Fundo de Apoio a Cacaucultura do Estado do Pará. **Diário Oficial [do] Estado do Pará**, Belém, PA, 18 Jan. 2008.

PEREIRA, B. L. C. **Propriedades de pellets: biomassas, aditivos e tratamento térmico**. 2014. 74 f. Tese (Doutorado em Ciência florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014.

PODDAR, S.; KAMRUZZAMAN, M.; SUJAN, S.M.A.; HOSSAIN, M., JAMAL, M.S.; GAFUR, M.A.; KHANAM, M. Effect of compression pressure on lignocellulosic biomass pellet to improve fuel properties: higher heating value. **Fuel**, London, v. 131, p. 43-48. 2014.

PROTÁSIO, T. P. **Biomassa residual do coco babaçu: potencial de uso bioenergético nas regiões norte e nordeste do Brasil**. 2014. 173 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014.

PROTÁSIO, T. P.; BUFALINO, L.; TONOLI, G. H. D.; JUNIOR, M. G.; TRUGILHO, P. F., & MENDES, L. M. Brazilian lignocellulosic wastes for bioenergy production: characterization and comparison with fossil fuels. **BioResources**, v. 8, n. 1, p. 1166-1185. 2013.

PROTÁSIO, T. P.; TONOLI, G. H. D.; JÚNIOR, M. G.; BUFALINO, L.; COUTO, A. M.; TRUGILHO, P. F. Correlações canônicas entre as características químicas e energéticas de resíduos lignocelulósicos. **Cerne**, v. 18, n. 3, p. 433-439. 2012.

PROTÁSIO, T. P.; BUFALINO, L.; TONOLI, G. H. D.; COUTO, A. M.; TRUGILHO, P. F.; JÚNIOR, M. G. Relação entre o poder calorífico superior e os componentes elementares e minerais da biomassa vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 31, n. 66, p. 113. 2011.

QUAAK, P.; KNOEF, H.; STASSEN, H. E. **Energy from biomass: a review of combustion and gasification technologies**. World Bank Publications, 1999. <http://documents.worldbank.org/curated/en/936651468740985551/pdf/multi-page.pdf> 2017.

QUEIROZ, M. B.; FERREIRA, M. M. C.; RAMBO, M. K. D. Correlação entre o poder calorífico e a composição química de biomassas lignocelulósicas. In: 37^a Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Química (RASBQ), 2014, Natal. 37^a Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Química (RASBQ), 2014. Disponível em: < <http://www.s bq.org.br/37ra/cdrom/resumos/T0870-1.pdf> > Acesso em: 30 de março de 2018.

QUIRINO, W. F.; VALE, A. T.; ANDRADE, A. D.; ABREU, V. L. S.; AZEVEDO, A. D. S. Poder calorífico da madeira e de resíduos lignocelulósicos. **Biomassa & Energia**, v. 1, n. 2, p. 173-182. 2004.

R Development Core Team. R: A language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing; 2014.

RAMOS e PAULA, L. E. D.; TRUGILHO, P. F.; NAPOLI, A.; BIANCHI, M. L. Characterization of residues from plant biomass for use in energy generation. **Cerne**, v. 17, n. 2, p. 237-246. 2011.

REN, X.; MENG, X.; VOROBIEV, N.; SCHIEMANN, M.; LEVENDIS, Y. Carbon, sulfur and nitrogen oxide emissions from combustion of pulverized raw and torrefied biomass. **Fuel**, v. 188, p. 310-323. 2017.

RIBEIRO, E. A. S. **Sistemas produtivos, disponibilidade de biomassa e atributos energéticos de caroço de açaí e resíduos de serrarias familiares, em várzea estuarina do Rio Amazonas**. 2017. 94f. Dissertação (Mestrado em Biodiversidade Tropical) – Universidade Federal do Amapá, Macapá, 2017.

RIBEIRO, F. de A.; ZANI FILHO, J. Variação da densidade básica da madeira em espécies/procedências de Eucalyptus spp. **IPEF**, Piracicaba, v. 46, p. 76-85. 1993.

RYU, C.; YANG, Y. B.; KHOR, A.; YATES, N. E.; SHARIFI, V. N.; SWITENBANK, J. Effect of fuel properties on biomass combustion: Part I. Experiments—fuel type, equivalence ratio and particle size. **Fuel**, v. 85, n. 7-8, p. 1039-1046. 2006.

SAENGER, M.; HARTGE, E. U.; WERTHER, J.; OGADA, T.; SIAGI, Z. Combustion of coffee husks. **Renewable Energy**, Oxford, v. 23, p. 103-121. 2001.

SAIDUR, R.; ABDELAZIZ, E. A.; DEMIRBAS, A.; HOSSAIN, M. S.; MEKHILEF, S. A review on biomass as a fuel for boilers. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 15, n. 5, p. 2262-2289. 2011.

SAIT, Hani H. et al. Pyrolysis and combustion kinetics of date palm biomass using thermogravimetric analysis. **Bioresource Technology**, v. 118, p. 382-389. 2012.

SANTOS, F. A.; QUEIRÓZ, J. D.; COLODETTE, J. L.; FERNANDES, S. A.; GUIMARÃES, V. M.; REZENDE, S. T. Potencial da palha de cana-de-açúcar para

produção de etanol. **Química Nova**, v. 35, n. 5, p. 1004-1010. 2012.

SANTANA, W. M. S. **Crescimento, produção e propriedades da madeira de um clone de *Eucalyptus grandis* e *E. urophylla* com enfoque energético**. 2009. 104 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e tecnologia da madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

SARTO, C.; SANSIGOLO, C. A. Cinética da remoção dos extrativos da madeira de *Eucalyptus grandis* durante polpação Kraft. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 32, n. 3. 2010.

SCATOLINO, M. V.; NETO, L. F. C.; PROTÁSIO, T. P.; CARNEIRO, A. C. O.; ANDRADE, C. R.; JÚNIOR, J. B. G.; MENDES, L. M. Options for generation of sustainable energy: production of pellets based on combinations between lignocellulosic biomasses. **Waste and Biomass Valorization**, p. 1-11. 2017.

SILVA NETO, P. J.; MATOS, P. G. G.; MARTINS, A. C. S.; SILVA, A. P. Sistema de produção para a Amazônia brasileira. Belém: CEPLAC, 2001.

SOARES, V. C. et al. Correlações entre as propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto. *Revista Árvore*, v. 38, n. 3, 2014.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY-TAPPI. Tappi T207 cm-99 standard – Water solubility of wood and pulp. USA: TAPPI Press. 1999.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY-TAPPI. Tappi T280 pm-99 standard – Acetone extractives of wood and pulp. USA: TAPPI Press. 2000.

VALE, A. T.; MENDES, R. M.; AMORIM, M. R. S.; DANTAS, V. F. S. Potencial energético da biomassa e carvão vegetal do epicarpo e da torta de pinhão manso (*Jatropha curcas*). **Cerne**, v. 17, n. 2. 2011.

VITAL, B. R.; CARNEIRO, A. C. O.; PEREIRA, B. L. C. Qualidade da madeira para fins energéticos. In: SANTOS, F.; COLODETTE, J.; QUEIROZ, J. H. (Org.). **Bioenergia & Biorrefinaria: Cana-de-açúcar & espécies florestais**. 1. ed. Visconde do Rio Branco: Suprema, 2013. p. 321-354.

WERTHER, J.; SAENGER, M.; HARTGE, E. U.; OGADA, T.; SIAGI, Z. Combustion

of agricultural residues. **Progress in energy and combustion science**, v. 26, n. 1, p. 1-27. 2000.

3 ESTUDO DA DEGRADAÇÃO TÉRMICA DE RESÍDUOS AGRÍCOLAS POR MEIO DE ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA

RESUMO

O objetivo deste estudo foi investigar o comportamento de diferentes resíduos de origem agroindustrial submetidos a análise térmica TGA e DTG, para verificar o seu potencial para uso energético. Foram selecionados cinco tipos de resíduos: caroço de açaí, casca de cacau, casca de coco, cacho de dendê e sabugo de milho. Os resíduos foram coletados logo após o seu beneficiamento e levados ao laboratório para realizar análises termogravimétricas. As análises térmicas foram realizadas em atmosfera de oxigênio. O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado com três repetições por tratamento. Foram determinadas as temperaturas de ignição e final da combustão, tempo de ignição, taxas de máxima perda de massa, tempo correspondente a máxima taxa de combustão, índice característico da combustão e o índice de ignição. Os dados foram submetidos a análise de variância e as médias de cada tratamento foram comparadas pelo teste de Tukey. Pela curva DTG foi observado que, embora os resíduos tenham apresentado o mesmo número de estágio de perda de massa, as taxas de perda de massa ocorreram em temperatura e intensidades diferentes. Dentre os resíduos estudados, o sabugo de milho, a casca de coco e o cacho de dendê apresentaram-se como os mais reativos. O caroço de açaí foi a biomassa que apresentou maior resistência térmica e regularidade na liberação da energia. Ao associar a composição química dos resíduos com o comportamento térmico inferiu-se que a presença de elevados teores de extrativos e holocelulose nas biomassas, acarretaram em picos de liberação de calor em temperaturas mais baixas.

Palavras-chave: Combustão; ignição; reatividade.

ABSTRACT

The objective of this study was to investigate the behavior of different agroindustrial residues submitted to TGA and DTG thermal analysis to verify their potential for energy use. Five types of residues were selected: açai fruit seed, cocoa shell, coconut shell, palm bunch and corn cob. The residues were collected soon after their processing and taken to the laboratory for thermogravimetric analysis. The thermal analyzes were carried out under an oxygen atmosphere. The experiment was conducted in a completely randomized design with three replicates per treatment. Ignition and final combustion temperatures, ignition time, maximum mass loss rates, time corresponding to maximum combustion rate, characteristic burn rate and ignition index were determined. Data were submitted to analysis of variance and the means of each treatment were compared by the Tukey test. From the DTG curve, it was observed that the combustion of the residues occurred in three stages. Although the residues showed similar behavior, the rates of mass loss occurred at different temperatures and intensities. Among the residues studied, corn cob, coconut shell and palm bunch were the most reactive. The açai fruit seed was the biomass that presented greater thermal resistance and regularity in the release of the energy. By associating the chemical composition of the residues with the thermal behavior, it was

inferred that the presence of high levels of extractives and holocellulose in the biomasses, resulted in peaks of heat release at lower temperatures.

Keywords: Combustion; ignition; reactivity.

3.1 INTRODUÇÃO

A biomassa é um dos recursos naturais que vem sendo amplamente estudada para uso energético no Brasil e no mundo. Considerada como a principal alternativa para a diversificação da matriz energética e substituta direta de combustíveis de origem fóssil (BORGES et al., 2017; KAN; STREZOV; EVANS, 2016; DERMIBAS, 2000).

A importância da biomassa para a geração de energia se deve, dentre outros fatores, por ser um material bastante versátil, podendo ser utilizada como combustível sólido ou transformada em combustível líquido ou gasoso (MCKENDRY, 2002). Em vista disso, torna-se necessário a escolha do processo de conversão mais adequado, que pode variar de acordo com o tipo de biomassa, a escala, forma desejada de energia, a qualidade e a condição econômica dos projetos (GOLDEMBERG, 2009; MCKENDRY, 2002). A combustão, liquefação, fermentação, biodigestão, gaseificação e pirólise são as principais rotas de conversão de biomassa (GUEDES et al., 2010).

Nos diversos processos de conversão, pode-se observar um comportamento térmico intrínseco derivado da natureza da biomassa utilizada, o qual irá servir de parâmetro de qualidade, e dessa forma, direcionar ou não o uso da mesma como fonte de energia viável. Para isso, são utilizadas análises termoanalíticas, que são consideradas como ferramentas importantes para avaliar o comportamento durante a degradação térmica de um dado material (DENARI; CAVALHEIRO, 2012; GHETTI; RICCA; ANGELINI, 1996).

Dentre as análises termoanalíticas mais utilizadas estão: a análise termogravimétrica (TG), a termogravimetria derivada (DTG) e a análise térmica diferencial (DTA) (PEREIRA, 2013; GHETTI; RICCA; ANGELINI, 1996). Estas técnicas vêm sendo amplamente utilizadas para avaliar a qualidade da biomassa para geração direta de calor ou produção de carvão vegetal (VITAL; CARNEIRO; PEREIRA, 2013; SAHU et al, 2010).

As curvas geradas de TGA, DTG e DTA são capazes de fornecer informações gerais sobre as reações de absorção e liberação de energia, temperaturas de ignição e final da combustão, os picos de máxima perda de massa e o tempo da combustão (OLIVEIRA,

2014; XIONG et al, 2014; MAGDIARZ; WILK, 2013). Com base nessas informações é possível tomar decisões mais apropriadas sobre as escolhas das espécies mais adequadas e design dos equipamentos para obter o máximo de rendimento em energia (WERTHER et al, 2000).

Desta forma, objetivou-se investigar o comportamento de diferentes resíduos agrícolas submetidos à análise térmica de TGA e DTA, em condições de atmosfera oxidante, de forma, a se verificar a potencialidade dessas biomassas para uso energético.

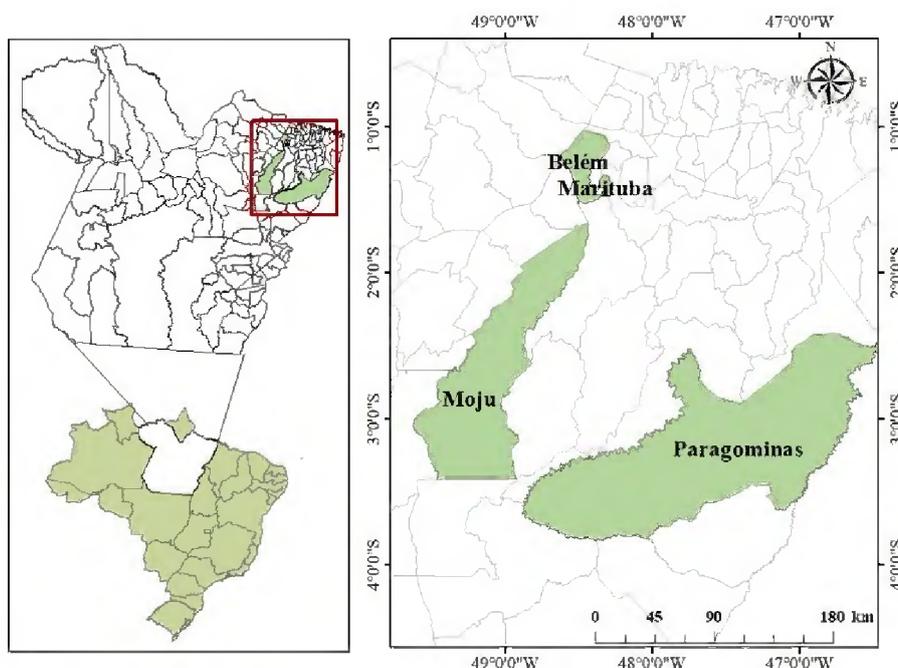
3.2 MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1 Coleta e preparo das amostras

Os resíduos lignocelulósicos selecionado para estudo foram: o caroço de açaí (CA), a casca do cacau (CCA), casca do coco (CCO), cacho de dendê (CD) e o sabugo de milho (SM). Esses materiais foram coletados nos locais de beneficiamento ainda frescos, embalados e levados ao Laboratório de Energia de Biomassas da Universidade Federal Rural da Amazônia/Pa.

Os locais das coletas estão representados na figura 10. No município de Marituba foram coletados os resíduos de cacau e coco, em Belém foi coletado o caroço de açaí, em Moju o cacho de dendê e em Paragominas o sabugo de milho.

Figura 10. Mapa de localização dos municípios de coleta dos resíduos.



De cada cultivo foram feitas amostras compostas para as análises térmicas, na qual, previamente passaram pelo processo de secagem ao ar livre, depois foram secas em estufas à $103 \pm 2^\circ\text{C}$ até atingirem peso constante. As amostras foram moídas utilizando-se um moinho de laboratório tipo Wiley e sendo utilizado o material que passou pela peneira de 200 mesh. As análises térmicas foram realizadas no Laboratório Multiusuário de Biomateriais (LBM) da Universidade Federal de Lavras/MG.

A caracterização da composição química imediata e molecular dos resíduos, presentes na tabela 9, foi realizada de acordo com as diretrizes das seguintes normas: D1762/84 (ASTM, 2013); TAPPI T280 PM-99 (TAPPI, 2000); TAPPI 207 cm-99 (TAPPI, 1999); (NBR 7989 ABNT, 2010); (GOMIDE; DEMUNER, 1986); (BROWNING, 1963); (KENNEDY; PHILLIPS; WILLIANS, 1987) e NBR 13999 (ABNT, 2003), para a determinação da química imediata, extrativos solúveis em acetona, extrativos solúveis em água quente, lignina solúvel, lignina insolúvel, holocelulose, celulose e cinzas, respectivamente.

Tabela 9. Resumo da caracterização química imediata e molecular dos resíduos utilizados na análise térmica.

Parâmetros (%)	CA	CCA	CCO	CD	SM
<i>Química imediata (m.s%)*</i>					
TMV	77,89	69,1	71,95	76,63	79,96
TCF	20,84	22,94	24,39	18,83	18,24
TCz	1,28	7,97	3,66	4,54	1,8
<i>Química molecular (m.s%)*</i>					
Ext. acetona	7,11	2,05	2,64	6,5	2,41
Ext. água	3,58	18,02	7,93	10,82	5,43
Ext. totais	10,69	20,07	10,57	17,32	7,84
Cinzas	1,42	8,55	3,97	5,68	2,24
Celulose	32,8	31,99	27,91	32,74	29,71
Hemicelulose	32,45	9,89	25,96	23,85	39,08
Lignina total	22,63	29,5	31,59	20,42	21,13

Onde: *Base massa seca; CA= caroço de açaí; CCA: casca de cacau; CCO: casca de coco; CD: cacho de dendê e SM: sabugo de milho.

3.2.2 Análise térmica

A análise termogravimétrica das biomassas foi realizada utilizando o aparelho DTG-60H da marca SHIMADZU. A análise foi feita sob atmosfera oxidante com fluxo de ar de $50\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$, utilizando-se aproximadamente 5 mg de cada biomassa que foram

pesadas em capsula aberta de alumina, submetidas a variação de temperatura entre 30°C a 600° C. Como amostra padrão foi utilizado um recipiente vazio.

A partir dos termogramas gerados com base nos dados de perda de massa em função da temperatura, foi determinada a primeira derivada da curva TGA, para cálculos dos parâmetros de combustão dos resíduos agrícolas. Sendo eles: temperatura de ignição (T_i); temperatura final da combustão (T_f); taxa máxima de combustão $[(dm/dt)_{máx}]$; taxa média de combustão $[(dm/dt)_{médio}]$; tempo de ignição (t_{ig}); tempo correspondente à máxima taxa de combustão (t_p); índice característico da combustão (S); índice de ignição (D_i); Temperatura referente ao 2° pico da curva DTG ($2T_{max}$) e temperatura referente ao 3° pico da curva DTG ($3T_{max}$).

As temperaturas de ignição e final da combustão foram determinadas de acordo com o sugerido por Wang et al (2011) e Moon et al (2013). O índice característico da combustão foi calculado através da equação 7 e o índice de ignição pela equação 8 ambos propostos por Moon et al (2013).

$$S = \frac{\left(\frac{dm}{dt}\right)_{máx} \left(\frac{dm}{dt}\right)_{médio}}{T_i^2 \times T_f} \quad \text{Equação 7}$$

Onde: S = índice característico da combustão; $(dm/dt)_{máx}$ = taxa máxima de combustão, em $\% \cdot \text{min}^{-1}$; $(dm/dt)_{médio}$ = taxa média de combustão, em $\% \cdot \text{min}^{-1}$; T_i = temperatura de ignição, em °C; e T_f = temperatura final de combustão, em °C.

$$D_i = \frac{\left(\frac{dm}{dt}\right)_{máx}}{t_p \times t_{ig}} \quad \text{Equação 8}$$

Onde: D_i = índice de ignição; $(dm/dt)_{máx}$ = taxa máxima de combustão, em $\% \cdot \text{min}^{-1}$; t_p = tempo correspondente a máxima taxa de combustão, em min; e t_{ig} = tempo de ignição, em min.

Para a elaboração dos gráficos no da curva TG, DTG e DTA, foi selecionando a repetição que se apresentou mais próxima dos valores médios dos parâmetros da combustão.

3.2.3 Delineamento experimental e análise dos dados

O delineamento adotado no trabalho foi o inteiramente casualizado, com 5 tratamentos (casca do coco, cacau, cacho de dendê, sabugo do milho, caroço do açaí) e 3 repetições para cada análise, totalizando 15 unidades amostrais, considerando como fator de variação os tipos de biomassas.

Para verificar as pressuposições da análise de variância, os dados foram submetidos aos testes de normalidade de Shapiro-Wilk e homogeneidade de variância de Levene, ambos à 95% de probabilidade. Em seguida, procedeu-se à análise de variância pelo teste F de Snedecor e as médias foram comparadas pelo teste de Tukey.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na figura 11 estão presentes as curvas termogravimétricas dos resíduos em atmosfera de oxigênio e na figura 12 a sua derivada primeira. Ao comparar o comportamento térmico dos resíduos pela curva DTG, observou-se que a combustão ocorreu em três estágios.

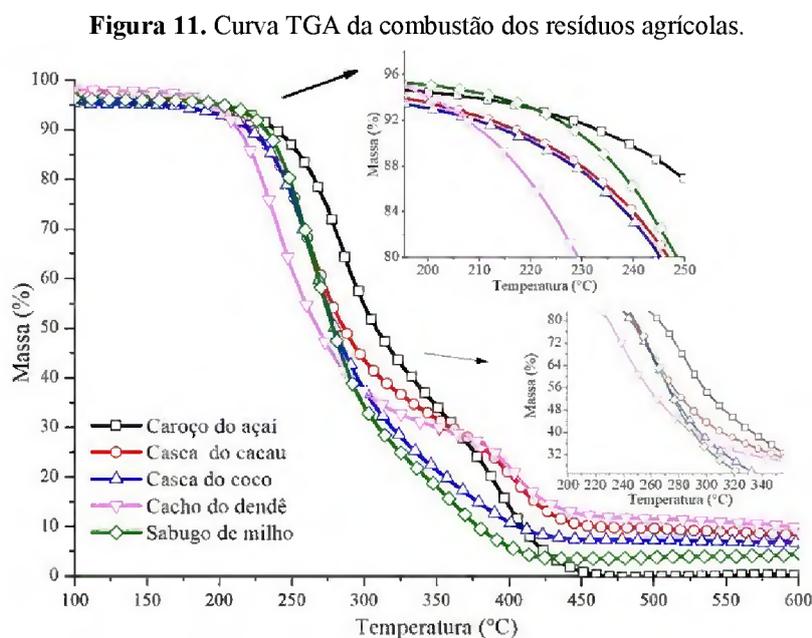
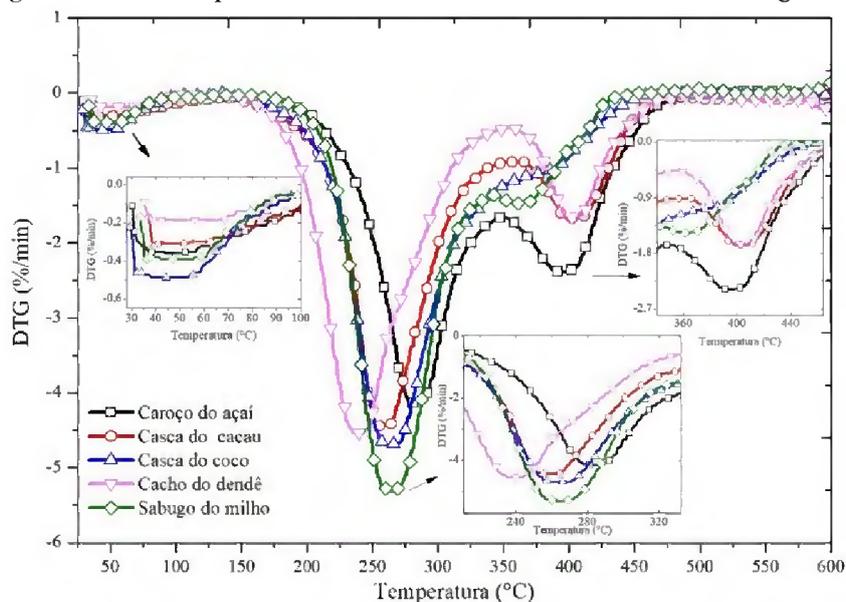


Figura 12. Derivada primeira da curva TGA da combustão dos resíduos agrícolas.



O primeiro estágio ocorreu entre 30 a 100 °C, correspondente a secagem da biomassa e se apresentou de forma similar entre os resíduos. Segundo Evaristo et al (2016) nessa fase não há interferência da característica física e química dos materiais, essa diferença será marcante apenas nos estágios posteriores.

O segundo estágio ocorreu de 165°C a 330° C, essa faixa compreende com a fase do desprendimento dos compostos voláteis, decorrente da decomposição da celulose, hemicelulose e parte da lignina (FERNANDES et al., 2013). A perda de massa e intensidade da chama que pode ser gerada nesta fase vai depender da quantidade de voláteis presente nos combustíveis (CARNEIRO; SANTOS; OLIVEIRA; PEREIRA, 2013).

O terceiro estágio que ocorreu entre 350-475°C, é correspondente a queima do carvão gerado após a etapa anterior (CARNEIRO; SANTOS; OLIVEIRA; PEREIRA, 2013; WERTHER et al, 2000). De acordo com López-González et al (2013) e Brito e Barrichelo (1977), a lignina é o principal responsável pela formação do carvão, sendo uma das biomoléculas com o comportamento mais estável quando comparado com a celulose e hemicelulose e que se apresenta em grande quantidade nesta terceira etapa.

Observa-se pelos perfis de degradação térmica que apesar das biomassas terem apresentado o mesmo número de estágios de combustão, as taxas de perda de massa ocorreram em diferentes temperaturas e intensidades. Os resultados do quadro 3 reforçam essa afirmação ao demonstrar pelos parâmetros de combustão e pela porcentagem de perda

de massa nos picos de degradação do estágio 2 e 3, que os resíduos apresentaram diferença estatística entre todas as variáveis analisadas.

Quadro 3. Parâmetros da combustão dos resíduos em estudo.

Parâmetros	Unidade	Caroço de açaí	Casca de cacau	Casca de coco	Cacho de dendê	Sabugo de milho
t_{ig}	(min)	41,3 ^{±0,6} a	36,5 ^{±0,8} b	37,4 ^{±0,9} b	33,0 ^{±0,7} c	37,8 ^{±0,7} b
T_i	(°C)	234,1 ^{±1,8} a	218,4 ^{±2,0} bc	216,1 ^{±1,0} c	196,8 ^{±1,8} d	221,3 ^{±1,7} b
2° TMáx	(°C)	283,3 ^{±1,0} a	258,7 ^{±0,6} c	264,1 ^{±0,2} b	240,1 ^{±0,6} d	265,4 ^{±0,3} b
Perda de massa	(%)	33,3 ^{±1,3} b	29,3 ^{±0,7} c	36,8 ^{±1,7} a	29,8 ^{±0,5} c	36,0 ^{±0,9} ab
T_f	(°C)	430,2 ^{±3,4} a	426,6 ^{±4,4} ab	388,4 ^{±1,3} c	421,3 ^{±3,3} b	388,9 ^{±0,8} c
3° Tmáx	(°C)	394,2 ^{±0,9} b	403,6 ^{±1,3} a	382,9 ^{±0,7} c	402,5 ^{±1,4} a	364,4 ^{±1,6} d
Perda de massa	(%)	83,3 ^{±0,6} b	78,5 ^{±0,6} c	86,6 ^{±1,0} a	79,3 ^{±0,1} c	85,7 ^{±1,1} a
$(dm/dt)_{max}$	(%.min ⁻¹)	4,27 ^{±0,1} d	4,43 ^{±0,1} cd	4,87 ^{±0,2} b	4,61 ^{±0,1} bc	5,36 ^{±0,1} a
$S \times 10^7$	(% ² /min ⁻² °C ⁻³)	1,61 ^{±0,1} b	1,78 ^{±0,1} b	2,26 ^{±0,0} a	2,3 ^{±0,1} a	2,45 ^{±0,1} a
$Di \times 10^3$	(%.min ⁻³)	2,0 ^{±0,0} c	2,7 ^{±0,1} b	2,8 ^{±0,2} b	3,4 ^{±0,1} a	3,1 ^{±0,1} ab

Onde: T_i = temperatura de ignição; T_f = temperatura final da combustão; t_{ig} = tempo de ignição; $(dm/dt)_{max}$ = taxa de máxima perda de massa; S= índice de combustão e D_i = índice de ignição. Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferiram entre si a 5% de significância pelo teste de Tukey.

A temperatura de ignição variou bastante entre os resíduos, o cacho de dendê (196°C) e o caroço do açaí (234°C), respectivamente, apresentaram o menor e o maior valor de temperatura.

O tempo correspondente a ignição também diferiu entre os resíduos. O cacho de dendê apresentou o menor tempo de ignição, seguido pelos resíduos de cacau, coco e milho que não apresentaram diferença estatística. A diferença entre temperatura do menor para o maior foi cerca de 8 minutos.

De acordo com Werther et al (2000), os resíduos agrícolas apresentam a desvolatilização em temperaturas mais baixas quando comparada a outros combustíveis como o carvão mineral. Valores mais baixos de temperatura de ignição, final da combustão e de máxima perda de massa, indicam que os materiais apresentam maior facilidade de queima e fornecem uma ideia sobre do tempo de permanência e a temperatura que pode ser alcançada pelos resíduos em uma fomalha (XIONG et al., 2014; IDRIS et al., 2012; MIRANDA et al., 2008).

A casca do cacau e o cacho de dendê alcançaram a máxima taxa de perda de massa em temperaturas mais baixas (240,1°C e 258,7°C), respectivamente. Nessa temperatura as duas biomassas apresentaram uma redução de cerca de 30% da massa inicial. Este resultado pode estar atribuído ao teor de extrativos totais desses resíduos, que foi superior ao das outras biomassas (20% e 17%). Que segundo reportado na literatura, os extrativos

contribuem com a diminuição da temperatura de ignição das biomassas e com o aumento do poder calorífico (PROTÁSIO et al., 2013; GUO et al., 2010).

Protásio (2016) em sua pesquisa inferiu que a holocelulose também contribui de forma positiva com a ignição em temperaturas mais baixas devido a sua participação na formação de voláteis.

A temperatura referente ao final da combustão dos resíduos variou entre 389-430°C. Comparando entre os resíduos estudados o cacho de dendê e a casca de cacau foram os materiais que apresentaram os menores valores na maioria dos parâmetros acima citados.

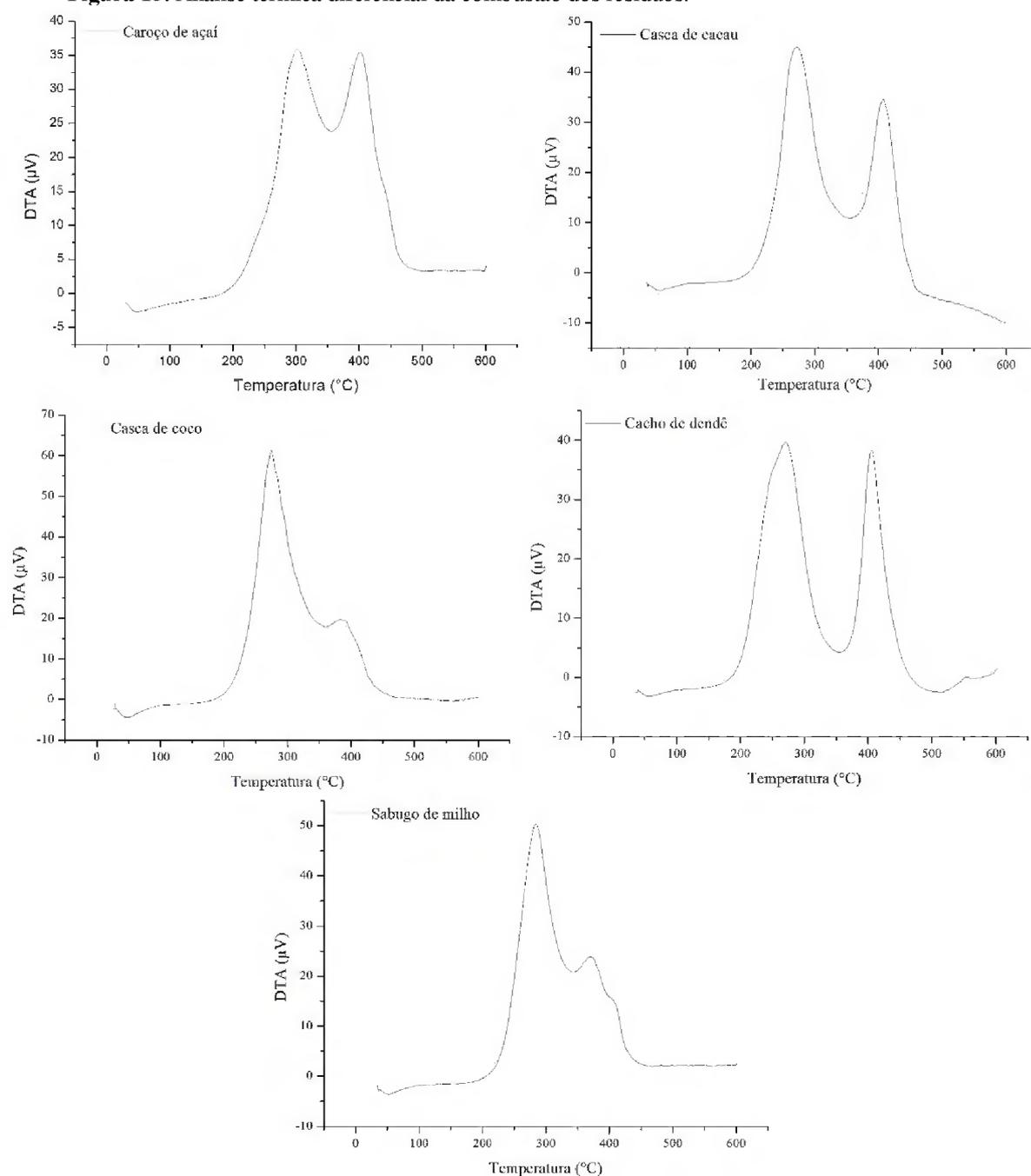
Protásio et al (2017) ao avaliar a combustão da casca do babaçu, encontrou os seguintes valores: temperatura de ignição (240,35°C); tempo de ignição (22,8 minutos) e temperatura final (433°C). Enquanto que Protásio (2016), em uma pesquisa com 14 clones de eucalipto, encontrou os seguintes parâmetros de combustão: T_i (234-237°C); T_f (433-445°C); tempo de ignição (38-41 minutos).

Ao comparar os resultados referentes ao tempo e temperatura de ignição e temperatura final da combustão com os obtidos pelos autores acima, verificou-se que os resíduos estudados apresentaram valores próximos nesses parâmetros.

Os índices de ignição e o característico da combustão representa, respectivamente, o indicativo de performa-se durante a ignição e a reatividade de um material combustível, quanto maiores forem os valores obtidos para esses índices melhor será o desempenho durante o processo de combustão da biomassa (RIBEIRO, 2017; XIONG et al., 2014; SAHU et al., 2010). Dentre os resíduos estudado, o sabugo de milho, a casca de coco e o cacho de dendê apresentaram-se como os mais reativos.

Ao avaliar as etapas e parâmetros de combustão verificou-se que o caroço de açaí foi a biomassa que apresentou maior resistência térmica. Em situação de operação, embora ele demorasse um pouco mais para entrar em ignição, o seu tempo dentro dos equipamentos seria maior e com isso a frequência de reposição seria menor, quando comparado aos outros materiais.

Na figura 13 e tabela 10 podem ser visualizados os resultados da análise térmica diferencial dos resíduos em atmosfera de oxigênio. A figura aponta que abaixo de 150°C todas as biomassas apresentaram um pico correspondente a absorção de energia para a evaporação da água, caracterizando-a como uma fase endotérmica. Acima desta temperatura foram observados dois picos exotérmicos para a maioria dos resíduos. O milho foi a única biomassa que apresentou três picos.

Figura 13. Análise térmica diferencial da combustão dos resíduos.**Tabela 10.** Temperaturas máximas dos estágios da combustão obtido pela análise térmica diferencial (DTA).

Biomassa	Pico endotérmico ($^{\circ}\text{C}$)	Início exotérmico ($^{\circ}\text{C}$)	1 $^{\circ}$ Pico exotérmico ($^{\circ}\text{C}$)	2 $^{\circ}$ Pico exotérmico ($^{\circ}\text{C}$)	3 $^{\circ}$ Pico exotérmico ($^{\circ}\text{C}$)
Carvão de açai	$45,3^{\pm 1,2}\text{c}$	$184,1^{\pm 2,6}\text{b}$	$300,7^{\pm 1,3}\text{a}$	$399,1^{\pm 2,1}\text{b}$	-
Casca de cacau	$58,2^{\pm 1,5}\text{a}$	$163,8^{\pm 2,0}\text{c}$	$270,1^{\pm 2,3}\text{d}$	$406,1^{\pm 2,1}\text{a}$	-
Casca de coco	$47,3^{\pm 0,6}\text{c}$	$186,6^{\pm 1,7}\text{b}$	$274,7^{\pm 1,3}\text{c}$	$390,4^{\pm 2,0}\text{c}$	-
Cacho de dendê	$54,6^{\pm 0,5}\text{b}$	$184,0^{\pm 1,2}\text{b}$	$267,0^{\pm 1,0}\text{d}$	$403,6^{\pm 1,8}\text{ab}$	-
Sabugo de milho	$53,8^{\pm 1,1}\text{b}$	$208,2^{\pm 2,0}\text{a}$	$283,5^{\pm 1,4}\text{b}$	$372,1^{\pm 0,5}\text{d}$	$408,2^{\pm 0,8}$

CV	10,19	8,49	4,84	3,49	-
----	-------	------	------	------	---

Médias seguidas pelas mesmas letras na coluna não diferiram entre si, a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

As reações passaram a ser exotérmicas em diferentes temperaturas entre os resíduos, na qual, a casca de cacau apresentou o menor valor (164°C) seguida pelo cacho de dendê, caroço de açaí e casca de coco que não apresentaram diferença estatística entre os valores médios de temperatura e por fim o sabugo de milho em 208°C.

A partir da fase exotérmica, observa-se pelo gráfico a formação de dois estágios de liberação de energia, onde o primeiro ocorreu de forma mais intensa e em um intervalo de temperatura superior ao do segundo estágio. Nessa fase ocorre a liberação de energia em decorrência da combustão da matéria orgânica (PROTÁSIO, 2014; FERNANDES et al., 2013).

O primeiro estágio ocorreu entre 150-350°C e o segundo entre 350-480°C. Ao sobrepor o gráfico de DTG com o DTA, observou-se que os picos referentes a máxima perda de massa ocorreram em uma mesma faixa de temperatura que os picos de máxima liberação de calor do DTA. Com isso, associa-se que o primeiro pico de liberação de calor seja atribuído a degradação da celulose, hemicelulose e parte da lignina e o segundo seja referente a combustão do carbono fixo resultante da fase anterior.

Wang et al (2009) ao realizarem o estudo térmico da combustão de palha de trigo e de serragem de madeira também observaram a formação de dois picos de degradação térmica dos resíduos e associaram o primeiro a queima dos voláteis e o segundo a queima do carvão.

O primeiro pico exotérmico foi o que apresentou o maior fluxo de liberação de calor, as únicas biomassas que obtiveram altura proporcional dos picos foram: o caroço de açaí e o cacho de dendê. Este comportamento sugere que essas biomassas conseguem liberar quantidades similares de energia durante a queima dos voláteis e durante a queima do carbono fixo e de uma forma mais constante.

Este resultado pode ser atribuído ao elevado conteúdo de extrativos em acetona e ao elevado teor de carbono fixo que essa biomassa apresentou em sua composição imediata e molecular. Protásio (2016), em sua pesquisa com análise térmica de clones de eucalipto associou a presença substâncias extraíveis em acetona com a resistência a degradação térmica e ao prolongamento da combustão.

Os resíduos que apresentaram os maiores teores de extrativos em água quente e maiores teores de holocelulose obtiveram o pico térmico do primeiro estágio em menores

temperaturas. Sugere-se que esses componentes moleculares contribuam para este resultado.

Já a temperatura do segundo pico térmico apresentou relação negativa com o teor de holocelulose e com o teor de oxigênio. A celulose e as xilanas são componentes moleculares que apresentam em sua estrutura maiores quantidades de oxigênio (em torno de 52%) enquanto que a lignina contem cerca de 35% (VITAL; CARNEIRO; PEREIRA, 2013). Como já mencionado, a lignina é o componente estrutural de maior concentração nesta segunda etapa pois boa parte da celulose e hemicelulose foi degradada na fase de desvolatilização.

3.4 CONCLUSÕES

- I. A combustão dos resíduos ocorreu em três estágios;
- II. Os resíduos apresentaram diferença entre os parâmetros de combustão;
- III. O caroço de açaí foi o resíduo que apresentou maior resistência térmica;
- IV. O primeiro estágio de degradação térmica foi o que mais contribuiu com a liberação de energia.
- V. O caroço de açaí e o cacho de dendê foram as únicas biomassas que obtiveram altura proporcional entre os picos de liberação de energia.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 13999: Papel, cartão, pastas celulósicas e madeira – Determinação do resíduo (cinza) após a incineração a 525 °C. Rio de Janeiro; 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 7989: Pasta celulósica e madeira - Determinação de lignina insolúvel em ácido. São Paulo; 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS - ASTM. ASTM D 1762-84: Standard method for chemical analyses of wood charcoal. Philadelphia: ASTM International, 2013. 2p.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Correlações entre características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão vegetal: I. densidade e teor de lignina da madeira de eucalipto. **IPEF**, Piracicaba, v. 14, p. 9-20. 1977.

BORGES, A. C. P.; SILVA, M. S.; ALVES, C. T.; TORRES, E. A. Energias Renováveis: uma contextualização da biomassa como fonte de energia. Renewable energy: a contextualization of the biomass as power supply. **REDE-Revista Eletrônica do PRODEMA**, v. 10, n. 2. 2017.

BROWNING, B. L. The chemistry of wood. Interscience Publisher. New York, 1963.

CARNEIRO, A. C. O.; SANTOS, R. C.; OLIVEIRA, A. C.; PEREIRA, B. L. C. Conversão direta da madeira em calor e energia. In: SANTOS, F.; COLODETTE, J.; QUEIROZ, J. H. (Org.). **Bioenergia & Biorrefinaria: Cana-de-açúcar & espécies florestais**. 1. ed. Visconde do Rio Branco: Suprema, 2013. p. 355-378.

DENARI, G.B; CAVALHEIRO, E.T.G. **Princípios e Aplicação de análise térmica**. São Carlos: IQSC, 2012, 40p.

DEMIRBAŞ, A. Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals. **Energy conversion and Management**, v. 42, n. 11, p. 1357-1378. 2000.

EVARISTO, A. B.; MARTINO, D. C.; FERRAREZ, A. H.; DONATO, D. B.; CARNEIRO, A. D. C. O.; GROSSI, J. A. S. Energy potential of the macaw palm fruit residues and their use in charcoal production. **Ciência Florestal**, v. 26, n. 2, p. 571-577. 2016.

FERNANDES, E. R. K.; MARANGONI, C.; SOUZA, O.; SELLIN, N. Thermochemical characterization of banana leaves as a potential energy source. **Energy conversion and management**, v. 75, p. 603-608. 2013.

GOMIDE, J. L.; DEMUNER, B. J. Determinação do teor de lignina em material lenhoso: Método Klason modificado. *O Papel*, São Paulo, v. 47, n. 8, p. 36-38, 1986.

GUEDES, C. L. B. et al. Avaliação de biocombustível derivado do bio-óleo obtido por pirólise rápida de biomassa lignocelulósica como aditivo para gasolina. *Química Nova*, São Paulo, v. 33, n. 4, p. 781-786, 2010.

GHETTI, P.; RICCA, L.; ANGELINI, L. Thermal analysis of biomass and corresponding pyrolysis products. **Fuel**, v. 75, n. 5, p. 565-573, 1996.

GOLDEMBERG, José. Biomass and energy. **Química nova**, v. 32, n. 3, p. 582-587. 2009.

GUO, X. J., WANG, S. R., WANG, K. G., QIAN, L. I. U., & LUO, Z. Y. et al. Influence of extractives on mechanism of biomass pyrolysis. **Journal of fuel Chemistry and Technology**, v. 38, n. 1, p. 42-46. 2010.

IDRIS, S. S.; RAHMAN, N. A.; ISMAIL, K. Combustion characteristics of Malaysian oil palm biomass, sub-bituminous coal and their respective blends via thermogravimetric analysis (TGA). **Bioresource technology**, v. 123, p. 581-591. 2012.

IDRIS, S. S.; RAHMAN, N. A.; ISMAIL, K.; ALIAS, A. B.; RASHID, Z. A.; ARIS, M. J. Investigation on thermochemical behaviour of low rank Malaysian coal, oil palm biomass and their blends during pyrolysis via thermogravimetric analysis (TGA). **Bioresource technology**, v. 101, n. 12, p. 4584-4592. 2010.

KAN, T.; STREZOV, V.; EVANS, T. J. Lignocellulosic biomass pyrolysis: A review of product properties and effects of pyrolysis parameters. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 57, p. 1126-1140. 2016.

KENNEDY, F.; PHILLIPS, G. O.; WILLIAMS, P. A. Wood and cellulose: industrial utilization, biotechnology, structure and properties, Ellis Horwood: Chichester. 1987.

LÓPEZ-GONZÁLEZ, D.; FERNANDEZ-LOPEZ, M.; VALVERDE, J. L.; SANCHEZ-SILVA, L. Thermogravimetric-mass spectrometric analysis on combustion of lignocellulosic biomass. **Bioresource technology**, v. 143, p. 562-574, 2013.

MAGDZIARZ, A.; WILK, M. Thermal characteristics of the combustion process of biomass and sewage sludge. **Journal of thermal analysis and calorimetry**, v. 114, n. 2, p. 519-529. 2013.

MCKENDRY, P. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. **Bioresource Technology**, Essex, v. 83, p. 37-46. 2002.

MIRANDA, T.; ESTEBAN, A.; ROJAS, S.; MONTERO, I.; RUIZ, A. Combustion analysis of different olive residues. **International journal of molecular sciences**, v. 9, n. 4, p. 512-525. 2008.

MOON, C.; SUNG, Y.; AHN, S.; KIM, T.; CHOI, G.; KIM, D. Effect of blending ratio on combustion performance in blends of biomass and coals of different ranks. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 47, p. 232-240. 2013.

OLIVEIRA, S. F. A. **Avaliação energética da biomassa do bagaço da cana-de-açúcar em diferentes indústrias sucroenergéticas**. 2014. 81 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Produção) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos. 2014.

PEREIRA, T. M. M. **Caracterização térmica (TG/DTG, DTA, DSC, DSC-fotovisual) de hormônios bioidênticos (estriol e estradiol)**. 2013. 104 f. Dissertação (Mestrado em Ciências farmacêuticas) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. 2013.

PROTÁSIO, T. P.; BUFALINO, L.; TONOLI, G. H. D.; JUNIOR, M. G.; TRUGILHO, P. F., & MENDES, L. M. Brazilian lignocellulosic wastes for bioenergy production: characterization and comparison with fossil fuels. **BioResources**, v. 8, n. 1, p. 1166-1185. 2013.

PROTÁSIO, T. P. **Biomassa residual do coco babaçu: potencial de uso bioenergético nas regiões norte e nordeste do Brasil**. 2014. 173 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014.

PROTÁSIO, T. P. **Características de crescimento, madeira e carvão para a classificação de clones de Eucalyptus spp. visando o uso energético**. 2016. 163 f. Tese (Doutorado em Ciência e tecnologia da madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2016.

SAIT, H. H.; HUSSAIN, A.; SALEMA, A. A.; ANI, F. N. Pyrolysis and combustion kinetics of date palm biomass using thermogravimetric analysis. **Bioresourc Technology**, v. 118, p. 382-389, 2012.

SAHU, S.; GOPAL SARKAR, P.; CHAKRABORTY, N.; ADAK, A. K. Thermogravimetric assessment of combustion characteristics of blends of a coal with different biomass chars. **Fuel Processing Technology**, v. 91, n. 3, p. 369-378. 2010.

SOARES, V. C. **Comportamento térmico, químico e físico da madeira e do carvão de Eucalyptus urophylla X Eucalyptus grandis em diferentes idades**. 2011. 109 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY-TAPPI. Tappi T207 cm-99 standard – Water solubility of wood and pulp. USA: TAPPI Press. 1999.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY-TAPPI. Tappi T280 pm-99 standard – Acetone extractives of wood and pulp. USA: TAPPI Press. 2000.

VITAL, B. R.; CARNEIRO, A. C. O.; PEREIRA, B. L. C. Qualidade da madeira para fins energéticos. In: SANTOS, F.; COLODETTE, J.; QUEIROZ, J. H. (Org.). **Bioenergia & Biorrefinaria: Cana-de-açúcar & espécies florestais**. 1. ed. Visconde do Rio Branco: Suprema, 2013. p. 321-354.

WANG, C.; WANG, F.; YANG, Q.; LIANG, R. Thermogravimetric studies of the behavior of wheat straw with added coal during combustion. **Biomass and Bioenergy**, v. 33, n. 1, p. 50-56. 2009.

WANG, C. A.; LIU, Y.; ZHANG, X.; CHE, D. A study on coal properties and combustion characteristics of blended coals in Northwestern China. **Energy & Fuels**, v. 25, n. 8, p. 3634-3645, 2011.

WERTHER, J.; SAENGER, M.; HARTGE, E. U.; OGADA, T.; SIAGI, Z. Combustion of agricultural residues. **Progress in energy and combustion science**, v. 26, n. 1, p. 1-27. 2000.

XIONG, S.; ZHANG, S.; WU, Q.; GUO, X.; DONG, A.; CHEN, C. Investigation on cotton stalk and bamboo sawdust carbonization for barbecue charcoal preparation. **Bioresource technology**, v. 152, p. 86-92. 2014.

CONCLUSÕES GERAIS

Os resultados obtidos com a pesquisa, apontaram que há uma grande disponibilidade dos resíduos que são gerados atualmente no Estado do Pará que estão concentrados nas microrregiões de Cametá, Tomé-açu e Paragominas. Esses locais estão propensos a desenvolverem projetos de aproveitamento energético de resíduos de biomassa.

O teor de umidade e a densidade básica foram as propriedades mais limitantes ao uso direto e transporte a longa distâncias dos resíduos. A secagem ao ar livre proporcionou redução bem acentuada na umidade e aumento considerável no poder calorífico útil das biomassas.

O caroço de açaí apresentou os melhores resultados quanto ao poder calorífico, densidade energética e maior resistência térmica e regularidade na liberação da energia. Sendo apontado neste trabalho como o resíduo que apresentou os resultados mais favoráveis para utilização energética.