



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CAMPUS DE ENGENHARIAS E DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
COORDENAÇÃO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

RENATA GUILHERME CÂNDIDO DA SILVA

**PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE BRIQUETES DE BIOMASSAS
LIGNOCELULÓSICAS EM DIFERENTES GRANULOMETRIAS**

RIO LARGO, AL

2020

RENATA GUILHERME CÂNDIDO DA SILVA

**PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE BRIQUETES DE BIOMASSAS
LIGNOCELULÓSICAS EM DIFERENTES GRANULOMETRIAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Florestal do Campus de Engenharias e de Ciências Agrárias – CECA, da Universidade Federal de Alagoas UFAL, como requisito para obtenção do Título de Engenheira Florestal.

Orientadora: Profa. Dra. Vânia Aparecida de Sá

Co-orientador: Pesquisador Dr. Anderson Carlos Marafon

RIO LARGO, AL
2020

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca do Campus de Engenharias e Ciências Agrárias
Bibliotecária Responsável: Myrtes Vieira do Nascimento

S586p Silva, Renata Guilherme Cândido da
Produção e caracterização de briquetes de biomassas lignocelulósicas em diferentes granulometrias. / Renata Guilherme Cândido da Silva – 2020. 45 f.; il.

Monografia de Graduação em Engenharia Florestal (Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade Federal de Alagoas, Campus de Engenharias e Ciências Agrárias. Rio Largo, 2020.

Orientação: Profa. Dra. Vânia Aparecida de Sá
Coorientação: Dr. Anderson Carlos Marafon

Inclui bibliografia

1. Briquetagem. 2. Biomassa residual. 3. Energia da biomassa. I. Título

CDU: 66.0

FOLHA DE APROVAÇÃO

RENATA GUILHERME CÂNDIDO DA SILVA

Produção e caracterização de briquetes de biomassas lignocelulósicas em diferentes granulometrias

Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Florestal, da Universidade Federal de Alagoas

Trabalho de conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Florestal do Campus de Engenharias e Ciências Agrárias - CECA, da Universidade Federal de Alagoas – UFAL, e aprovado em 18 de maio de 2020.



Prof.^a Dr.^a Vânia Aparecida de Sá, UFAL/CECA (Orientadora)

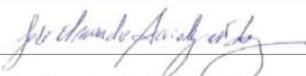
Banca Examinadora:



Prof.^a Dr.^a Vânia Aparecida de Sá – UFAL / CECA



Prof.^a Dr.^a Anna Carolina de Almeida Andrade – UFS/ CCAA



Prof. Dr. José Edmundo Accioly de Souza – UFAL / IQB

RESUMO

A busca por fontes alternativas de energia renovável aumenta anualmente em decorrência da expectativa de esgotamento dos recursos naturais. Nesse contexto, a utilização de biomassas para a produção de briquetes pode ser uma opção viável. A caracterização de biomassas para a produção de briquetes pode ser fundamental para a posterior diversificação da matriz energética de um local e ainda contribuir para o desenvolvimento de uma região. As características e qualidade dos briquetes podem ser influenciadas por variáveis relacionadas à matéria prima, como por exemplo granulometria. Sendo assim, os objetivos deste trabalho foram avaliar o potencial de utilização de diferentes resíduos da biomassa vegetal na produção de briquetes e a influência da granulometria no produto final. Foram avaliados os seguintes parâmetros das biomassas: umidade, densidade, composição química molecular, composição química elementar, teor de cinzas e poder calorífico. Referente aos briquetes, foram verificados umidade, densidade aparente e densidade energética. O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente ao acaso com arranjo fatorial 3x2, sendo os fatores biomassa e granulometria. Os dados foram submetidos à análise de variância e as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a um nível de 5% de probabilidade de erro ($p < 0.05$). Em relação à análise química molecular das biomassas, a casca de coco verde apresentou maiores teores de extrativos, lignina, poder calorífico superior e inferior. No entanto, de modo geral, as três biomassas apresentaram potencial para aproveitamento energético. Os briquetes confeccionados em granulometria de 2 milímetros apresentaram maior densidade aparente e energética quando comparados com os briquetes produzidos a partir de partículas de 8 milímetros. Os briquetes produzidos a partir da casca de coco verde apresentaram valores superiores de densidade aparente e densidade energética em comparação com as outras biomassas avaliadas.

Palavras-chave: briquetagem, biomassa residual, energia da biomassa.

ABSTRACT

The search for alternative sources of renewable energy increases annually due to the expectation of depletion of natural resources. In this context, the use of biomass for the production of briquettes may be a viable option. The characterization of biomass for the production of briquettes can be fundamental for the diversification of the energy matrix and also contribute to the development of a region. The characteristics and quality of the briquettes can be influenced by variables related to the raw material, such as granulometry. Thus, the aims of this work were to evaluate the potential of using different residues from plant biomass in the production of briquettes and the influence of granulometry on the final product. The following biomass parameters were evaluated: moisture, density, molecular chemical composition, elemental chemical composition, ash content and calorific value. Regarding briquettes, moisture, bulk density and energy density were checked. The experiment was carried out in a completely randomized design with a 3x2 factorial arrangement, being the biomass and granulometry factors. The data were subjected to analysis of variance and the means were compared using the Tukey test at a level of 5% probability of error ($p < 0.05$). Regarding the molecular chemical analysis of the biomasses, the green coconut shell showed higher levels of extracts, lignin, higher and lower calorific value. However, in general, the three biomasses showed potential for energy use. The briquettes made in 2 mm granulometry showed a higher apparent and energetic density when compared to the briquettes produced from 8 mm particles. The briquettes produced from the green coconut shell showed higher values of apparent density and energy density compared to the other biomasses evaluated.

Key words: briquetting, residual biomass, biomass energy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Procedimento de fervura da lignina em chapa aquecedora.....	22
Figura 2. Filtragem da celulose.....	23
Figura 3. Prensa manual.....	25
Figura 4. Determinação da altura dos briquetes por meio de paquímetro digital.....	27
Figura 5. Médias de teor de umidade para casca de coco verde, bagaço de cana-de-açúcar e capim-elefante.....	28
Figura 6. Médias de densidade para casca de coco verde, bagaço de cana-de-açúcar e capim-elefante.....	29
Figura 7. Poder calorífico superior e inferior médio para casca de coco verde, bagaço de cana-de-açúcar e capim-elefante.....	34
Figura 8. Teor médio de umidade dos briquetes de casca de coco verde, bagaço de cana-de-açúcar e capim-elefante em diferentes granulometrias.....	35
Figura 9. Densidade aparente média para os briquetes de casca de coco verde, bagaço de cana-de-açúcar e capim-elefante em diferentes granulometrias.....	36
Figura 10. Densidade energética média para os briquetes de casca de coco verde, bagaço de cana-de-açúcar e capim-elefante em diferentes granulometrias.....	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Análise elementar da casca de coco verde, bagaço de cana-de-açúcar e capim-elefante.....	30
Tabela 2. Valores de referência para a análise elementar.....	31
Tabela 3. Quadro de análise de variância para as propriedades químicas da casca de coco verde, bagaço de cana-de-açúcar e capim-elefante.....	31
Tabela 4. Médias de extrativos, lignina, celulose, cinzas e hemicelulose para casca de coco verde, o bagaço de cana-de-açúcar e o capim-elefante.....	32

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	10
2.	OBJETIVOS	13
3.	REVISÃO DE LITERATURA	14
3.1	Uso de biomassas lignocelulósicas para fins energéticos.....	14
3.2	Coco	15
3.3	Cana-de-açúcar	16
3.4	Capim-elefante.....	17
3.5	Briquetes	17
3.5.1	Conceitos preliminares	17
3.5.2	Principais diferenças entre briquetes e lenha	18
3.5.3	Briquetagem e fatores limitantes	19
4.	MATERIAL E MÉTODOS.....	20
4.1	Coleta e preparo do material.....	20
4.2	Análises físico-químicas e energéticas das biomassas	20
4.2.1	Umidade	20
4.2.2	Densidade básica	21
4.2.4	Teor de extrativos totais	21
4.2.5	Lignina	22
4.2.6	Teor de Celulose	23
4.2.7	Teor de cinzas	24
4.2.9	Poder calorífico superior (PCS) e inferior (PCI).....	24
4.3	Briquetagem.....	25
4.4	Avaliação dos briquetes	26
4.4.1	Teor de umidade.....	26
4.4.2	Densidade aparente.....	26
4.4.3	Densidade energética.....	27
4.5	Experimentação.....	27
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
5.1	Caracterização físico-química e energética das biomassas.....	28
5.1.1	Umidade	28
5.1.2	Densidade básica	29
5.1.4	Composição química molecular	31
5.1.5	Poder calorífico superior e inferior	33
5.2	Características dos briquetes	35
5.2.1	Umidade	35

5.2.2 Densidade aparente	36
5.2.3 Densidade energética.....	38
6. CONCLUSÕES	40
REFERÊNCIAS	41

1. INTRODUÇÃO

Segundo Goldemberg (2009), a produção de energia no século XX foi dominada por combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás) que representavam ainda no início do século 21, cerca de 80% de toda a energia produzida no mundo.

Os novos modelos de produção industrial e economia, bem como a evolução tecnológica, são responsáveis por grande parte da demanda mundial de energia contemporânea. Nesse contexto, a busca por fontes alternativas de energia renovável aumenta anualmente em decorrência da expectativa de esgotamento dos recursos naturais. Dentre as fontes de energia renováveis estão eólica, solar, hídrica, geotérmica e energia da biomassa.

Do ponto de vista energético, a biomassa é toda matéria orgânica, seja de origem animal ou vegetal, que pode ser utilizada na produção de energia (ANEEL, 2005). A utilização da biomassa tem como grandes vantagens seu aproveitamento direto por meio da combustão em fornos e caldeiras e também a redução de impactos socioambientais (CARDOSO, 2012). Desse modo, as biomassas podem ser utilizadas para geração de energia por meio da queima direta, pelletização e briquetagem. Logo, a crescente busca pela sustentabilidade vem impulsionando o aprimoramento de técnicas para o aproveitamento destes materiais.

Convencionalmente, a maior parte dos combustíveis sólidos utilizados pelas indústrias brasileiras é de origem florestal (pellets, briquetes, cavacos e carvão vegetal) . No entanto, as biomassas residuais (bagaço de cana-de-açúcar, palha de cana-de-açúcar, casca de coco, entre outras) e aquelas oriundas de cultivos de gramíneas (capim-elefante, cana-energia, sorgo biomassa, entre outras), têm ganhado espaço no cenário da geração de energia através do uso das biomassas, por conta de características favoráveis que as tornam fontes atrativas para o aproveitamento energético.

Por possuir vocação para a produção vegetal, o Brasil é um país com potencial para utilização de biomassas. O Brasil é um dos maiores produtores agrícolas e florestais do mundo. Isso faz com que as cadeias produtivas promovam grande geração de resíduos. Dias et al. (2012) afirmaram que tais resíduos podem ser aproveitados na forma de briquetes e as vantagens da compactação dos resíduos agrícolas e florestais são de cunho operacional, energético, logístico e ambiental.

A retirada de lenha de forma ilegal das florestas ainda é comum no Nordeste brasileiro e é uma das causas da degradação ambiental. Esta retirada se dá tanto para a produção de carvão quanto para uso *in natura* (lenha) na cocção de alimentos, exercendo pressão sobre as florestas (MMA, 2018). Nesse cenário, a utilização de briquetes se torna positiva, uma vez que eles

possuem maior eficiência energética que a lenha e ainda são sustentáveis, afinal, uma das vantagens da utilização de briquetes é que eles podem ser produzidos a partir de resíduos gerados em cadeias produtivas de indústrias e agroindústrias.

Em regiões onde a produção florestal ainda é pouco representativa e o bagaço de cana já tem sua demanda comprometida, como em alguns estados do Nordeste do Brasil, o uso da biomassa residual (casca de coco, palha de cana-de-açúcar, entre outros) ou de cultivos dedicados (eucalipto, capim-elefante, cana-energia, sorgo biomassa, bambu, entre outros) pode servir de fonte alternativa de matéria-prima para a fabricação de briquetes (DIAS et al., 2012).

A caracterização de biomassas para a produção de briquetes pode ser fundamental para a posterior diversificação da matriz energética de um local e ainda contribuir para o desenvolvimento de uma região, uma vez que pode gerar emprego, renda e consequências positivas no que diz respeito ao meio ambiente.

Cada região deve, portanto, focar no estudo de materiais disponíveis. Desse modo, no que diz respeito ao estado de Alagoas, a cana-de-açúcar, por ser o carro-chefe da agricultura no estado, deixa o bagaço como o principal resíduo sólido oriundo de seu processamento. Uma fração do bagaço, todavia, é queimada em caldeiras nas próprias usinas para geração de energia. No entanto, isto ocorre sem tratamento prévio. A casca de coco verde, por outro lado, é resíduo do fruto cuja água e outros subprodutos são amplamente consumidos pela sociedade. Contudo, o consumo de coco *in natura* em cidades litorâneas como Maceió pode se tornar um problema ambiental por conta do descarte incorreto da casca. Estas biomassas podem, portanto, ser alternativas viáveis para o aproveitamento energético em Alagoas. Além delas, o capim-elefante, por apresentar, segundo Marafon et al. (2017), elevados rendimentos na produção de massa seca (acima de 40 t/ha/ano), permitindo pelo menos duas colheitas anuais, também pode ser utilizado para esta finalidade no estado. Segundo Barros (2012), a briquetagem é uma opção para resíduos de baixa densidade, como é o caso das biomassas citadas.

Devido à sua natureza heterogênea, as diferentes biomassas possuem densidades a granel inerentemente baixas, influenciando diretamente no custo da matéria-prima por afetar fatores como: transporte, armazenamento, dimensionamento do sistema e manuseio do material durante os processos termoquímicos subsequentes (McKendry, 2002). Dessa forma, os briquetes tornam-se uma alternativa para a utilização energética destes materiais, uma vez que a problemática da baixa densidade é minimizada em decorrência da compactação.

Os briquetes têm aplicação na cocção de alimentos, podendo ser utilizados em pizzarias, padarias, hotéis e também, conforme citado por Santos (2011), podem ser empregados na geração de calor para alimentar fornos e caldeiras na indústria ceramista.

De acordo com Furtado et al. (2010), as características e qualidade dos briquetes podem ser influenciadas por variáveis relacionadas à matéria prima, como por exemplo granulometria, composição química e umidade e ao processo de produção, como pressão e temperatura.

Silva et al. (2015) afirmaram que a granulometria do material pode interferir na sua compactação e conseqüentemente na qualidade do produto final. Como citado por Carneiro Junior (2017), a moagem do material é um dos fatores limitantes para o uso energético. Pensando no processo de briquetagem industrial, é importante que o preparo do material não se torne um contratempo, sendo necessário o estudo acerca de granulometrias viáveis industrialmente.

Diante do exposto, faz-se necessário o estudo mais aprofundado acerca da utilização de biomassas para a produção de briquetes, bem como da influência da granulometria na qualidade do produto final.

2. OBJETIVOS

Geral

- Avaliar o potencial de utilização de diferentes resíduos da biomassa vegetal na produção de briquetes.

Específicos

- Determinar as propriedades físico-químicas e energéticas da casca de coco verde, do bagaço de cana-de-açúcar e do capim-elefante;
- Produzir briquetes da casca de coco verde, do bagaço de cana-de-açúcar e do capim-elefante;
- Avaliar o efeito da granulometria das partículas na briquetagem das diferentes biomassas;
- Avaliar a qualidade e o desempenho energético dos briquetes das três biomassas.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Uso de biomassas lignocelulósicas para fins energéticos

No contexto da sustentabilidade, de acordo com Magalhães (2014), dentre as fontes de energia renovável, a biomassa se destaca em países tropicais, especialmente no Brasil, devido ao baixo custo e facilidade de ser encontrada.

Paiva (2017) atribuiu a busca por fontes alternativas de energia ao forte apelo de diversos órgãos ambientais para a redução do uso indiscriminado das reservas de petróleo e a emissão de poluentes. Conforme o mesmo autor, a biomassa, como fonte alternativa de geração de energia, vem ganhando cada vez mais espaço nos últimos anos.

De acordo com Moraes (2008), a partir das dificuldades que o uso da madeira com fins energéticos começou a apresentar no final dos anos 80, por questões ambientais e pela concorrência de usos mais nobres, como produção de pasta celulósica, mobiliária e uso na construção civil, alternativas à madeira para o uso energético passaram a serem observadas mais cuidadosamente. Nesse contexto da busca por biomassas vegetais que possuam potencial de uso energético, conforme Kauter et al. (2006), a biomassa de plantas que apresentam teor de fibras acima de 30% já pode ser adaptada para a produção de energia.

Segundo Santos et al. (2015), o conceito de biomassa é amplo, congregando todos e quaisquer organismos biológicos, capazes de serem aproveitados de forma alternativa como fontes de energia. A energia da biomassa vegetal, por sua vez, pode ser conceituada como a energia contida em espécies vegetais que poderá ser liberada mediante a aplicação de técnicas como a queima direta.

O Brasil tem todas as características necessárias para aumentar ainda mais sua produção comercial de biomassa energética, como já ocorre com etanol, carvão vegetal e lenha, através de plantações (MORAIS, 2008). Entre os materiais que podem ser aproveitados no setor de energia da biomassa estão os resíduos do processamento industrial da madeira como serragem, maravalhas e resíduos agroindustriais como a casca de coco verde, o bagaço da cana-de-açúcar e o capim-elefante.

Resíduos lignocelulósicos são resíduos vegetais que, como o próprio nome diz, apresentam em sua constituição lignina e celulose, juntamente com outros componentes, como as hemiceluloses e os extrativos (PAULA, 2010). De modo geral, os resíduos lignocelulósicos apresentam densidade de baixa a média e alto teor de umidade. Para Carneiro Junior et al. (2017), as propriedades inerentes à biomassa crua, como o alto teor de umidade, a baixa densidade energética, a degradação biológica, a alteração de propriedades físico-químicas

durante o armazenamento e a dificuldade de moagem, tendem a limitar sua utilização na indústria.

De acordo com Paula (2010), para afirmar e indicar determinado material como bom gerador de energia, é necessário caracterizá-lo por meio de análises químicas e da determinação de seu valor calórico. É de suma importância conhecer características como teor de umidade, densidade, teor de cinzas, teor de lignina, composição elementar que aponta os teores de carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio, enxofre e poder calorífico (superior e inferior), para que seja desenvolvida uma melhor estratégia de uso. É válido salientar que, para fins energéticos, são preferíveis materiais que possuam alto poder calórico, baixo teor de cinzas, alto teor de lignina e baixo teor de umidade, salientando que este último pode ser corrigido por meio de secagem artificial ou natural.

A utilização energética de resíduos de biomassa, segundo Quirino (2003), apresenta grandes vantagens, como diversificação na matriz energética, ampliação na geração de renda, diminuição dos gases de efeito estufa, diminuição dos volumes de resíduos depositados em aterros sanitários e, conseqüentemente, redução de custos.

3.2 Coco

O coqueiro é uma cultura tropical, disseminada ao longo da faixa costeira entre os trópicos de Câncer e Capricórnio, largamente distribuída na Ásia, África, América Latina e região do Pacífico. É cultivada em aproximadamente 11,6 milhões de hectares em 86 países (SIQUEIRA et al., 2002).

O *Cocos nucifera* L. é cultivado em cerca de 90 países que destinam o fruto, principalmente, para a produção de copra e óleo, principais derivados do coco comercializados no mercado internacional (BRAINER, 2018).

Consoante Brainer (2018), no Brasil, diferente do que ocorre nas maiores produções mundiais do coco, os principais produtos da cadeia da cococultura não são a copra e o óleo. Nacionalmente, todavia, os cultivos destinam-se à produção de coco seco in natura, coco ralado, leite de coco, óleo de coco e água de coco.

Em solo brasileiro, o coco se destaca comercialmente nas regiões litorâneas, onde a venda de sua água é intensa, gerando uma grande quantidade de resíduos após o consumo (PAZ et al., 2017).

Conforme Cabral et al. (2016), cerca de 85% do peso total do coco verde correspondem a resíduos sólidos (cascas), o qual o descarte não planejado pode gerar problemas ambientais, além de impactar negativamente na saúde pública.

Paz et al. (2017) ressaltaram que o aproveitamento dos resíduos do coco contribui para a preservação do meio ambiente, uma vez que sua decomposição na natureza leva cerca de 8 anos.

Em relação ao aproveitamento energético dos resíduos do coco, Esteves (2014) estudou para a produção de briquetes, abordando ainda a questão da viabilidade econômica da atividade. A casca do coco teve seu potencial para utilização energética estudado também por Lima Junior et al. (2014), que estudou algumas biomassas disponíveis no Nordeste para esta finalidade.

3.3 Cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) é uma gramínea perene que teve origem da ilha de Papua, Sudoeste Asiático, nas regiões concentradas entre a Nova Guiné e Indonésia (LOPES SOBRINHO et al., 2019).

Segundo Silva et al. (2014), a cana-de-açúcar é uma cultura que possui alto valor econômico tanto no Brasil quanto no mundo, sendo o seu uso destinado à produção de açúcar, energia elétrica e álcool.

A produção de cana-de-açúcar está estimada em 642,7 milhões de toneladas, apontando aumento de 3,6% a nível nacional em relação à safra passada (Companhia Nacional de Abastecimento, 2019).

De acordo com o Ministério da Agricultura e Abastecimento (2016), o Brasil é responsável por cerca de 61% das exportações mundiais de açúcar. Dias et al. (2012) afirmaram que, para cada tonelada de cana, tem-se cerca de 140 quilos de açúcar e 80 litros de etanol. Ainda nesse contexto, Santos et al. (2012) alegaram que uma tonelada de cana processada gera cerca de 140 kg de bagaço.

Ainda de conforme dados da Conab (2019), existe uma expectativa de aumento de produtividade de 9,8% para a cultura da cana no estado de Alagoas na safra de 2019/2020 em relação à última safra de 2018/2019 em decorrência dos investimentos realizados, bem como das condições climáticas favoráveis para o desenvolvimento da cana durante o ano de 2019.

O bagaço de cana-de-açúcar é o resíduo mais gerado no Brasil (157 milhões de toneladas), tendo uma participação significativa na matriz energética nacional (Empresa de Pesquisa Energética, 2019).

Em relação ao aproveitamento energético do resíduo sólido oriundo do processamento da cana-de-açúcar, ocorre a queima de uma fração do bagaço na usina. O subproduto é levado por uma esteira até a caldeira, que realiza a queima. Depois de passar pelas turbinas e geradores, o vapor produzido na queima gera a energia elétrica (DANTAS FILHO, 2008). Silva e Morais

(2008), por sua vez, estudaram o desempenho energético da biomassa em diferentes níveis de umidade e graus de compactação e Costa et al. (2019) avaliaram a produção de briquetes torreficados a partir do bagaço.

Considerando-se que a queima de bagaço em caldeiras das usinas ocorre sem nenhum tratamento prévio, a despeito do seu elevado teor de umidade (cerca de 50%), ainda que somente uma pequena proporção do bagaço de cana esteja disponível para a produção de briquetes, o aumento da eficiência deste material como combustível sólido pode justificar sua produção para uso nas usinas ou para comercialização externa (MORAES et al., 2017).

3.4 Capim-elefante

O capim-elefante, de nome científico *Pennisetum purpureum* Schum, é uma planta pertencente à família *Poaceae*. Originário da África, o capim-elefante, segundo Strezov et al. (2008), possui mais de duzentas variedades, algumas de alto rendimento e de boa qualidade para uso como fonte alternativa de energia.

O capim-elefante é uma forrageira com alto potencial para produção de matéria seca e de grande eficiência fotossintética (Silva et al., 2010) e, de acordo com Marafon et al. (2017), trata-se de uma gramínea forrageira de elevado potencial produtivo, adaptando-se muito bem às condições de clima e solo de praticamente todo o Brasil.

Segundo Vieira et al. (2017), o capim-elefante é amplamente utilizado para alimentação de gado leiteiro devido ao seu alto teor de proteína. Atualmente, esta biomassa tem sido estudada como uma fonte alternativa para a geração de energia. Moraes et al. (2009) afirmaram que a produtividade do capim-elefante, pode chegar a 45 ton/ha/ano, fazendo com que esta biomassa possa ser promissora como insumo energético.

O capim-elefante tem sido objeto de vários tipos de estudos relacionados ao aproveitamento energético. A exemplo disso, há a utilização de pellets, a partir da queima em caldeiras, para geração de bioeletricidade. Ainda em relação ao estudo do potencial energético do capim-elefante, Vieira et al. (2017) estudaram o uso da biomassa para a produção de carvão.

3.5 Briquetes

3.5.1 Conceitos preliminares

Fernandes (2012) afirmou que o processo de briquetagem teve início em 1848, sendo os briquetes empregados na indústria naval da época, todavia, a grande disponibilidade de petróleo, lenha e despreocupação com o meio ambiente, fizeram com que o uso do briquete não emplacasse no mercado.

De acordo com Rodrigues et al. (2002), briquete é o resíduo de biomassa densificado através da compactação. Ramos e Paula (2010) salientaram que a densificação proporcionada pelo processo de briquetagem é o responsável por produzir um combustível com maior concentração energética por unidade de volume.

Silva (2007) afirmou que briquetes são considerados lenha de qualidade, produzidos a partir da compactação de resíduos lignocelulósicos, utilizando pressão e temperatura. Consoante Caires (2010), por possuir excelentes propriedades caloríficas, o briquete, produzido a partir de resíduos lignocelulósicos, com tecnologia simples e investimentos relativamente baixos, é uma excelente fonte de energia, podendo, muitas vezes, substituir os combustíveis atualmente em uso com vantagens operacionais, logísticas, econômicas e ambientais.

Segundo Figueira (2015), os briquetes podem ser utilizados para suprir estabelecimentos e indústrias que possuam fornalhas, fornos, caldeiras, que utilizam lenha para gerar energia. Santos et al. (2015) afirmaram que os briquetes possuem tanto uso doméstico como em estabelecimentos comerciais, evitando indiretamente que considerável quantidade de lenha seja extraída. No mesmo contexto, Oshiro (2016) enfatizou que os briquetes podem ser usados em diferentes setores como o de produção de alimentos, que abrangem pizzarias e padarias, podem ser usados também em hotéis, olarias, agroindústrias, indústrias de modo geral, entre outras atividades que normalmente usam fornos, caldeiras e equipamentos afins.

3.5.2 Principais diferenças entre briquetes e lenha

Quirino (2000) reiterou que quando comparado com a lenha, o briquete apresenta muitas vantagens econômicas e uma resistência maior ao apodrecimento e fermentação, além de possuir um poder calorífico maior, o que conseqüentemente irá reduzir a quantidade necessária de matéria-prima, espaço para armazenamento e mão de obra necessária para o manejo.

Além disso, em relação à concentração de energia, Quirino (2002) declarou que, como a briquetagem tem por função concentrar a capacidade energética, ela possibilita que o briquete tenha a densidade energética maior que a lenha chegando, a ser até 3 vezes maior, pois 1 st de briquetes possui 3,11 vezes mais energia que 1 st de lenha.

Outra vantagem dos briquetes em relação à lenha é que como a lenha é vendida por m³ e os briquetes por unidade com peso certo definido, ocorre a perda por conta dos espaços vazios contidos no empilhamento da lenha. Ainda em comparação, os briquetes apresentam melhores condições de umidade.

3.5.3 Briquetagem e fatores limitantes

Segundo Alves Júnior et al. (2003), a briquetagem é um processo tecnológico que vai produzir briquete, o qual possui melhor potencial de geração de calor (energia) em relação aos seus resíduos naturais. Os mesmos autores realçaram que a briquetagem é uma das alternativas tecnológicas para o melhor aproveitamento dos resíduos de biomassa, consistindo num processo de trituração e compactação que utiliza elevadas pressões para transformar os referidos resíduos em blocos denominados de briquetes.

Quirino (2002) salientou que, para que a aglomeração tenha sucesso, é necessária uma quantidade de água variando de 8% a 12%; já Alves Júnior e Santos (2002) consideraram que a faixa de umidade recomendada para a produção dos briquetes vai de 8 a 15%.

O aumento da temperatura provocará a "plastificação" da lignina, substância que atua como elemento aglomerante das partículas (BARROS, 2012). Sendo assim, embora a briquetagem possa ocorrer na ausência de temperatura (em temperatura ambiente), no caso do processo em biomassa pura, sem a adição de aglutinantes, a temperatura é de suma importância para a formação do briquete, uma vez que a plastificação da lignina ajuda na junção das partículas.

No que diz respeito ao tamanho das partículas, para Silva et al. (2018) uma mistura de vários tamanhos pode melhorar a qualidade dos briquetes, sendo uma granulometria entre 5 e 10 mm considerada a faixa máxima para a matéria-prima ter uma compactação eficiente.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Coleta e preparo do material

Para este trabalho foram utilizadas as biomassas da casca de coco verde, bagaço de cana-de-açúcar e capim-elefante. A casca de coco verde foi oriunda do consumo do coco in natura em praias do município de Maceió. O bagaço de cana-de-açúcar foi proveniente da Usina Santa Clotilde, situada na fazenda Pau Amarelo, zona Rural, Rio Largo – AL. A forragem do capim-elefante foi obtida do clone Madeira, oriundo do Banco Ativo de Germoplasma de Capim-elefante (BAGCE145) cultivado em plantio experimental da Embrapa Tabuleiros Costeiros, no Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas, situado no município de Rio Largo – AL.

A priori, o bagaço de cana-de-açúcar e o capim-elefante foram submetidos ao processo de secagem em estufa a 60° C durante aproximadamente 72 horas, visto que foram adquiridos com umidade elevada. A casca de coco verde, por sua vez, foi cortada manualmente em pequenos pedaços (chips) com auxílio de facão e exposta ao sol por uma semana para a diminuição de sua umidade.

Para a caracterização físico-química e energética, todas as biomassas foram submetidas à trituração em moinho tipo Willey e peneiradas a 40 e 60 mesh para padronização da granulometria, sendo utilizado para as análises o montante que ficou retido na peneira de 60 mesh.

Para a confecção dos briquetes, uma porção das biomassas foi triturada em moinho tipo Willey, utilizando-se a peneira de 2mm acoplada ao equipamento, enquanto a outra porção foi triturada em moinho de facas utilizando-se uma peneira de 8mm de abertura, uma vez que granulometria foi uma das variáveis avaliadas pelo presente trabalho.

4.2 Análises físico-químicas e energéticas das biomassas

4.2.1 Umidade

O teor de umidade com base na massa seca foi determinado utilizando-se os métodos descritos na norma NBR 8112 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1982). Os cálculos foram feitos com base na equação 1:

$$T. U. (\%) = \frac{PU-PS}{PS} * 100 \quad (1)$$

Em que:

Pu = peso úmido (g) e Ps = peso seco (g).

4.2.2 Densidade básica

A densidade básica das biomassas foi determinada utilizando-se o método do máximo teor de umidade descrito na NBR 11941 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2003) e expressa em quilogramas por metro cúbico (Kg m^{-3}). Cada amostra foi posta em Kitasato e saturada com auxílio de bomba a vácuo, com duas aplicações de vácuo por dia, durante três dias. A massa verde (ou úmida) foi verificada em balança com 0,01 g de precisão após saturação completa das fibras. Para a obtenção da massa seca, as amostras foram secas em estufa a 105°C até obter massa constante. A densidade foi obtida por meio da equação 2:

$$D_b = \frac{1}{\frac{P_{mu}}{P_s - 0,346}}$$

(2)

Em que:

P_{mu} = peso massa úmida (ou verde) e P_s = peso massa seca.

4.2.3 Análise elementar

Foram utilizados, para cada biomassa, os resíduos que passaram pela peneira de 40 e ficaram retidos na de 60 mesh. Após a classificação em peneiras, os resíduos foram secos em estufa convencional à temperatura de $105 \pm 2^{\circ}\text{C}$.

As amostras foram analisadas em um analisador elementar Thermo Scientific CHNS Analyser. A análise elementar permitiu a determinação dos teores de carbono (C), hidrogênio (H) e nitrogênio (N). O oxigênio (O) foi calculado por diferença por meio da equação 3. Para o procedimento, foram necessários os gases hélio, que é o gás de arraste, e o oxigênio, gás de ignição.

$$O (\%) = 100 - (C + H + N) \quad (3)$$

Onde:

C= %Carbono; H= %Hidrogênio; N= %Nitrogênio.

4.2.4 Teor de extrativos totais

O teor de extrativos (Ext) seguiu a metodologia de extração em Tolueno-etanol de acordo com as especificações descritas na norma ABNT NBR 14853 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2010).

Para o cálculo dos extrativos, foi utilizada a equação 4:

$$\text{Ext} (\%) = \frac{M_i - M_f}{M_i} * 100 \quad (4)$$

Onde:

Mi = massa inicial de amostra seca e Mf = massa final da amostra seca após a extração.

4.2.5 Lignina

O ensaio de lignina seguiu o método de determinação de lignina insolúvel utilizado para espécies de folhosas, podendo ser aplicado também para biomassas lignocelulósicas. Para o ensaio, foram pesadas amostras de 1 grama de matéria seca. As amostras foram depositadas em recipientes de vidro (Beckers e Elermeyers). Para cada amostra foi utilizada a quantidade de 15mL de ácido sulfúrico (H₂SO₄) a 72% de concentração. As amostras permaneceram em banho-maria durante 2 horas entre 25 e 30°C, sendo maceradas com o auxílio de bastões de vidro periodicamente. Posteriormente, as amostras foram diluídas, individualmente, em 560mL de água destilada e submetidas à hidrólise. Para isto, as amostras permaneceram em chapa aquecedora (Figura 1) durante 4 horas.

Figura 1. Procedimento de fervura da lignina em chapa aquecedora.



Fonte: autora, 2020.

A filtragem da lignina ocorreu por meio de cadinhos de vidro sinterizado forrados com papel filtro após resfriamento por meio de bomba a vácuo, sendo os resíduos retirados com auxílio de água quente. Para o cálculo da lignina foi utilizada a equação 5:

$$\text{Lignina (\%)} = \frac{M_f}{M_i} * 100 \quad (5)$$

Em que:

Mi = massa inicial e Mf = massa final.

4.2.6 Teor de Celulose

A celulose foi quantificada utilizando-se a norma de determinação de teor de celulose por reação com ácido nítrico descrita por Abreu et al. (2006) no manual de Métodos de Análise Química em Madeira do Laboratório de Química da Madeira do Departamento de Produtos Florestais do Instituto de Florestas da UFRRJ.

Foram pesadas amostras de 5g das biomassas em triplicata, posteriormente as amostras foram submetidas a refluxo em solução aquosa de ácido nítrico a 25% durante 1 hora em aparelho Soxhlet. A filtragem das amostras ocorreu por meio de bomba a vácuo, funil de Büchner e papel filtro previamente tarado (Figura 2). No ato da filtragem, foi utilizada água quente durante 30 minutos, em seguida foi utilizada solução de hidróxido de sódio (NaOH) a 4% de concentração durante 40 minutos. Adiante, foi passada água quente novamente, solução aquosa de ácido acético a 1% e água quente mais uma vez.

Figura 2. Filtragem da celulose.



Fonte: autora, 2020.

As amostras seguiram para a estufa de 105° C até obtenção de massa constante. O teor de celulose foi calculado segundo a equação 6:

$$\text{Celulose (\%)} = \frac{M_f}{M_i} * 100 \quad (6)$$

Onde:

Mi = massa inicial e Mf = massa final.

4.2.7 Teor de cinzas

A avaliação do teor de minerais (cinzas) seguiu a metodologia descrita na norma ABNT NBR 13999 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2017). Para a determinação do teor de cinzas, foram pesadas amostras de 2g (dois gramas) isentas de umidade, em triplicatas, utilizando cadinhos de porcelana calcinados. As amostras foram postas numa mufla, onde permaneceram durante 6 horas e meia com um aumento de 50°C a cada meia hora e temperatura final de 650°C. Após serem retiradas da mufla, as amostras permaneceram em dessecador para resfriamento e posterior pesagem. Para o cálculo das cinzas foi utilizada a equação 7:

$$\text{Cinzas (\%)} = \frac{M_c}{M_i} * 100 \quad (7)$$

Onde:

C = teor de cinzas, Mc = massa das cinzas e Mi = massa inicial (amostra seca).

4.2.8 Hemiceluloses

O teor de hemiceluloses foi calculado através da equação 8:

$$\text{Hemiceluloses (\%)} = 100 - \% \text{Ext} - \% \text{Lig} - \% \text{Cel} - \% \text{Cinzas} \quad (8)$$

Em que:

%Ext = teor de extrativos;

%Lig = lignina;

%Cel = celulose; e

%Cinzas = teor de cinzas.

4.2.9 Poder calorífico superior (PCS) e inferior (PCI)

As análises para determinação do PCS foram realizadas em um Calorímetro modelo C 2000 (IKA®), de acordo com a norma MB-2850 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1990) e os valores expressos em quilocalorias por quilograma (Kcal Kg⁻¹).

As amostras moídas foram pesadas, pastilhadas (originando pequenos blocos em formato de pastilhas) e colocadas em cadinhos e levadas à estufa convencional à temperatura de 105±2°C até obter massa constante. Em seguida, foram postas, uma a uma, no equipamento. O procedimento foi realizado em duplicata.

A partir do poder calorífico superior foi descontada a energia gasta para a evaporação do hidrogênio constituinte do material para a obtenção do poder calorífico inferior. O poder calorífico inferior foi calculado utilizando-se a equação 9, preconizada por Brant (2008):

$$PCI = PCS - 5,72*(9H + U) \quad (9)$$

Onde:

PCS = Poder calorífico superior, H = hidrogênio (%) e U = umidade (%).

Assim como no Poder Calorífico Superior, o procedimento de cálculo ocorreu em duplicata.

4.3 Briquetagem

A produção dos briquetes ocorreu por meio de prensa hidráulica manual (Figura 3), na qual ao molde da prensa hidráulica foi acoplada uma manta aquecedora junto a um termostato para controle da temperatura. Foi utilizada de pressão de 10 toneladas (509 kgf cm⁻²) e temperatura de 125 graus Celsius.

Figura 3. Prensa manual.



Fonte: autora, 2020.

Todos os briquetes foram confeccionados com teor de umidade do material in natura variando de 13 a 15%. A massa pré-definida foi de 150 gramas de biomassa para cada briquete, independente do tipo de biomassa ou da granulometria. As dimensões finais dos briquetes foram de 7 cm de diâmetro e altura variável.

Para cada briquete, foram utilizados os tempos de: 5 minutos para aquecimento do material sem aplicação de pressão, 3 minutos de residência na prensa hidráulica com pressão e 20 minutos de resfriamento para a retirada do briquete da prensa.

4.4 Avaliação dos briquetes

4.4.1 Teor de umidade

A umidade foi determinada utilizando-se os procedimentos descritos na norma analítica da ASTM D-4442 (ASTM, 2003).

4.4.2 Densidade aparente

Para determinar a densidade aparente (D_a) dos briquetes foi utilizada a equação 10:

$$D_a = \frac{m}{v} \quad (10)$$

Sendo $v = (\pi * r^2) * h$.

Em que:

D_a = densidade aparente (g cm^{-3}); m = massa (g); v = volume (cm^3); r = raio (cm); h = altura (cm).

A massa foi obtida em balança semi-analítica (0,1 de precisão), e a altura foi determinada com auxílio de um paquímetro digital (Figura 4), já o diâmetro foi considerado constante (7cm) em decorrência do uso da mesma forma para a confecção de todos os briquetes. O procedimento feito em triplicata para todos os tratamentos.

Figura 4. Determinação da altura dos briquetes por meio de paquímetro digital.



Fonte: autora, 2020.

4.4.3 Densidade energética

A densidade energética (D_e) dos briquetes foi obtida a partir do produto entre a densidade aparente (D_a) de cada briquete e o poder calorífico superior (PCS) médio de cada biomassa, sendo expressa em Gigacalorias por metro cúbico (Gcal.m^{-3}).

4.5 Experimentação

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente ao acaso (DIC) com arranjo fatorial 3×2 , sendo os fatores as biomassas (casca de coco verde, bagaço de cana-de-açúcar e capim-elefante) e granulometria (2 mm e 8 mm).

Os dados foram submetidos à análise de variância e as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a um nível de 5% de probabilidade de erro ($p < 0.05$) com auxílio do software estatístico Sisvar.

Partiu-se do princípio de que a hipótese de nulidade é a de que não há interação entre os fatores biomassa e granulometria e diferença significativa entre os tratamentos.

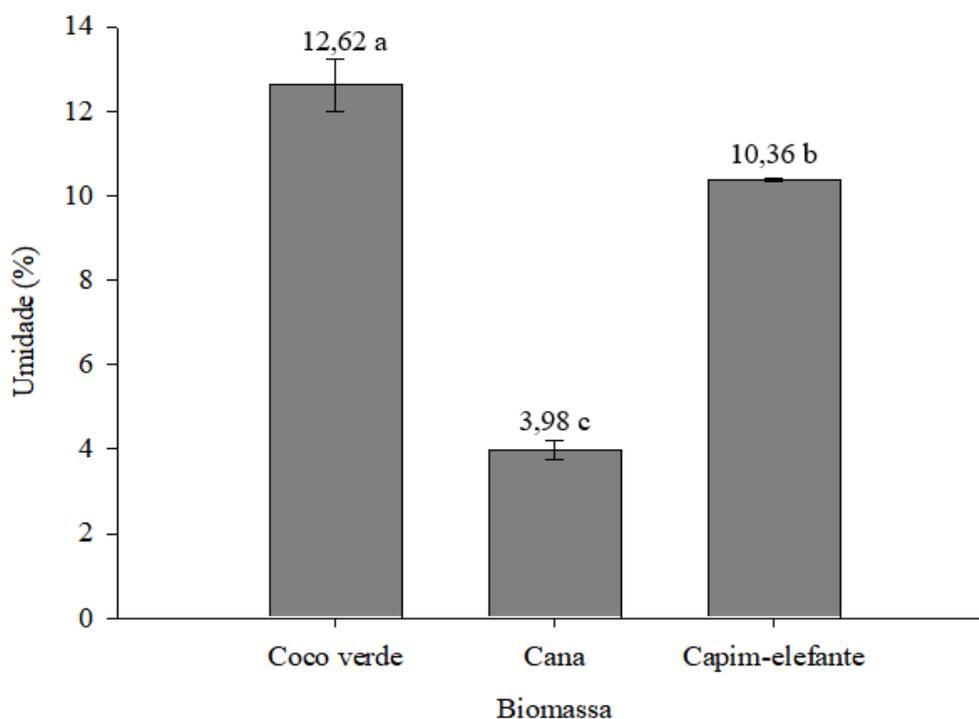
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização físico-química e energética das biomassas

5.1.1 Umidade

A figura 5 apresenta as médias de teor de umidade para casca de coco verde, bagaço de cana-de-açúcar e capim elefante. Ocorreu diferença estatística entre o teor de umidade das biomassas.

Figura 5. Médias de teor de umidade para casca de coco verde, bagaço de cana-de-açúcar e capim-elefante.



Fonte: autora, 2020.

Os materiais que apresentaram o maior e o menor teor de umidade foram, respectivamente, a casca de coco verde e o bagaço de cana-de-açúcar, com 12,62% e 3,98%. No entanto, vale salientar que todas as biomassas passaram por processo prévio de secagem em decorrência da inviabilidade de utilização de materiais com alto teor de umidade no moinho, uma vez que a moagem pode se tornar mais onerosa e o equipamento pode ser danificado.

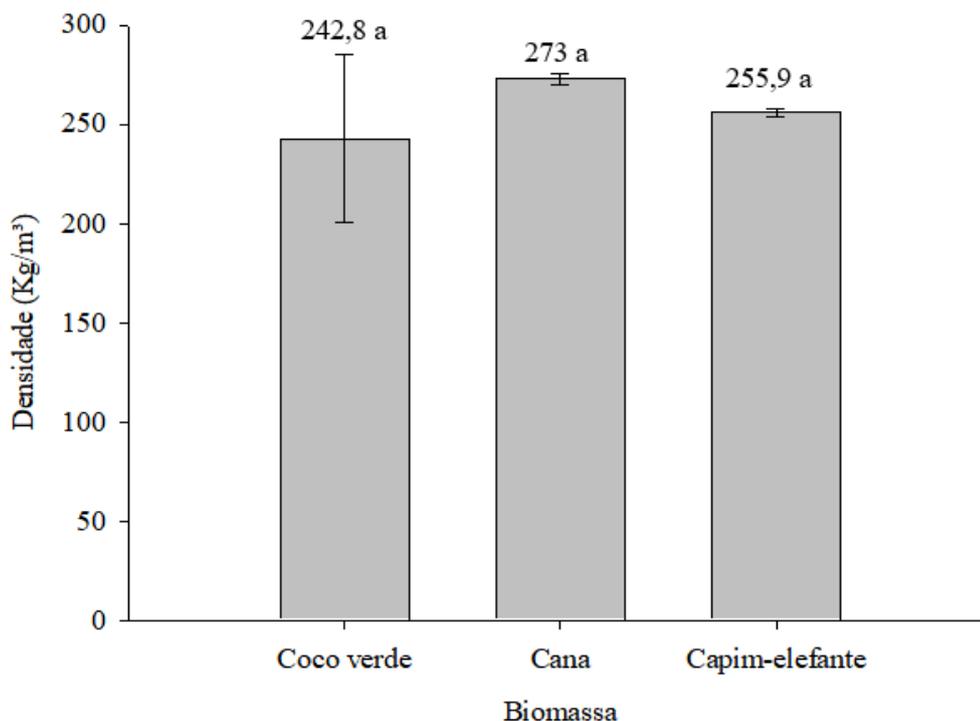
Antes da secagem prévia, a casca de coco verde, o bagaço de cana-de-açúcar e o capim-elefante possuíam umidade variando de 60 a 80%. De acordo com Paula (2010), as biomassas vegetais, quando in natura, apresentam um alto teor de umidade. Segundo Rosa et al. (2001), o alto teor de umidade presente na casca do coco verde dificulta seu aproveitamento direto,

necessitando de uma etapa de secagem para a sua utilização posterior. Considerando o aproveitamento energético, essa afirmação se estende para outras biomassas.

5.1.2 Densidade básica

A análise de variância apontou que não ocorreu diferença estatística de densidade entre as biomassas estudadas. A figura 6 apresenta as médias de densidade para cada biomassa.

Figura 6. Médias de densidade básica para casca de coco verde, bagaço de cana-de-açúcar e capim-elefante.



Fonte: autora, 2020.

A densidade das biomassas variou de 242,8 a 273 Kg/m³, sendo a menor referente à casca de coco verde e a maior ao bagaço da cana-de-açúcar. De modo geral, as três biomassas apresentaram baixa densidade.

Para a geração de energia, a densidade é uma característica de suma importância, pois está diretamente ligada ao volume necessário de material para a produção de determinada quantidade de energia. No caso da produção de briquetes, a compactação de biomassas tem, entre os objetivos, o adensamento do material, fazendo assim com que haja uma maior quantidade de energia armazenada em um menor volume.

A densidade da casca de coco verde (242,8 Kg/m³) foi superior ao valor de 130 Kg/m³ encontrado por Cardoso e Gonzalez (2016). Tal diferença pode ter ocorrido porque no presente

trabalho foi utilizada a casca inteira e no referido trabalho retirou-se o endocarpo e o albúmen sólido, sendo avaliada apenas a parte mais fibrosa (mesocarpo + epicarpo) do material.

Para o bagaço de cana, o valor médio de 273 Kg/m³ é superior ao encontrado por Pego et al. (2019). A diferença pode ter ocorrido devido aos métodos de determinação utilizados. O capim-elefante apresentou densidade similar ao valor de 284,6 encontrada por Paiva (2017).

5.1.3 Composição elementar

Na Tabela 1 são apresentados os resultados obtidos na análise elementar das biomassas avaliados.

Tabela 1. Análise elementar da casca de coco verde, bagaço de cana-de-açúcar e capim-elefante.

Material	Composição elementar (%)					
	C	H	N	O	C/H	C/N
Casca de coco verde	44,66	5,83	1,22	48,29	7,66	36,61
Bagaço de cana-de-açúcar	44,10	6,07	0,46	49,40	7,27	95,87
Capim-elefante	43,90	5,77	0,66	49,60	7,61	66,52

Fonte: elaborado pela autora.

A partir da tabela, pode-se observar que a casca de coco verde apresentou maior teor de C e N e a maior relação C/H. O bagaço de cana-de-açúcar apresentou o maior teor de H, a menor quantidade de N e a maior relação C/N. Já o capim-elefante apresentou as menores quantidades de C e H e a maior porcentagem de O.

Para o aproveitamento energético de biomassas por meio de processos termoquímicos, uma baixa quantidade de hidrogênio e uma alta C/H são fatores negativos, uma vez que o hidrogênio está ligado à produção de energia. Protasio et al. (2011) afirmaram que pequenos acréscimos no teor de hidrogênio promovem elevado ganho no valor calórico dos combustíveis de biomassa. Ainda de acordo com os mesmos autores, a quantidade de carbono do material também está diretamente ligada à produção de energia. Sendo assim, são preferíveis materiais que possuam alto teor de carbono e hidrogênio e baixa relação C/H.

O nitrogênio, por sua vez, pode causar problemas ambientais em processos de queima, pois trata-se de um elemento que forma os óxidos de nitrogênio, gases tóxicos. Nesse contexto, biomassas com menor teor de nitrogênio e alta relação C/N são desejáveis para que o processo de queima seja menos poluente ao ambiente. Segundo Campos (2008), quanto menor for a relação C/N, mais rápida será a liberação de CO₂ para a atmosfera durante a combustão. Este fato é indesejável do ponto de vista ambiental, pois trata-se de um dos gases responsáveis pelo efeito estufa.

A tabela 2 mostra os valores de referência para a análise elementar dos resíduos estudados.

Tabela 2. Valores de referência para a análise elementar.

Material	Composição elementar (%)				Referência
	C	H	N	O	
Casca de coco verde	44,03	4,85	0,51	50,61	Marcelino, Melo e Torres (2018)
Bagaço de cana-de-açúcar	45,3	6,8	0,5	47,1	Paula (2010)
Capim-elefante	44,5	6,11	0,54	44,9	Paiva (2017)

Os valores de análise elementar para o bagaço de cana-de-açúcar corroboram com valores encontrados por Paula (2010), os valores encontrados para a casca de coco verde estão próximos aos encontrados por Marcelino, Melo e Torres (2018) e a análise elementar do capim-elefante mostrou valores parecidos aos encontrados por Paiva (2017).

5.1.4 Composição química molecular

As análises de variância indicaram diferenças estatísticas significativas para os teores de extrativos, lignina, celulose, cinzas e hemiceluloses. A tabela 3 apresenta o quadro de análise de variância para as propriedades químicas das biomassas.

Tabela 3. Quadro de análise de variância para as propriedades químicas da casca de coco verde, bagaço de cana-de-açúcar e capim-elefante.

Fonte de variação	GL	QM				
		Extrativos	Lignina	Celulose (%)	Cinzas	Hemiceluloses
Biomassa	2	239,80*	88,91*	350,54*	15,95*	342,87*
Resíduo	6	0,16	1,08	1,27	0,01	1,01
Total	8					
CV (%)		2,09	4,24	3,12	2,29	6,77
Média		19,31	24,5	36,11	5,25	14,84

GL: Graus de liberdade; QM: quadrados médios; CV (%): Coeficiente de variação; *: Significativo a 0,05 de probabilidade de erro ($p < 0,05$).

Todas as variáveis analisadas apresentaram coeficiente de variação abaixo de 10%, variando de 2,09 a 6,77%. Isto indica uma alta precisão experimental e baixa variabilidade entre os dados.

A tabela 4 apresenta as médias de extrativos, lignina, celulose, cinzas e hemiceluloses para as três biomassas estudadas.

Tabela 4. Médias de extrativos, lignina, celulose, cinzas e hemiceluloses para casca de coco verde, o bagaço de cana-de-açúcar e o capim-elefante.

Biomassa	Extrativos	Lignina	Celulose (%)	Cinzas	Hemiceluloses
Casca de coco verde	29,05a	30,75a	25,00c	7,27a	7,94b
Bagaço de cana-de-açúcar	11,47b	21,93b	36,71b	2,73c	27,15a
Capim-elefante	17,41c	20,82b	46,59a	5,75b	9,43b

Médias seguidas da mesma letra na vertical não diferem entre si, estatisticamente, pelo teste de Tukey a um nível de 5% de probabilidade de erro.

As médias de teor de extrativos totais das biomassas variaram de 11,47 a 29,05%, sendo o maior valor referente à casca do coco verde. Os extrativos são importantes pois, de acordo com Frederico (2009), uma maior porcentagem de extrativos poderá colaborar para o aumento no poder calorífico, dado que tais compostos, de modo geral, tendem a possuir alto teor de carbono.

O valor encontrado para a casca de coco verde é um pouco inferior aos 33,68% citados por Cardoso e Gonzalez (2016), no entanto ainda é considerado alto quando comparado à madeira, por exemplo. Isso se dá porque, segundo Van Dam et al. (2004), o tecido parenquimático que envolve as fibras no mesocarpo possui uma quantidade de extrativos substancialmente maior que as fibras. Desse modo, trabalhos que utilizam apenas a fibra do coco tendem a apresentar um menor teor de extrativos. O valor médio de extrativos totais encontrado para o bagaço da cana-de-açúcar (11,47%) está próximo ao valor de 12,81 encontrado por Pego et al. (2019).

O teor de lignina médio variou de 11,47 a 29,05%, correspondendo, respectivamente, ao bagaço da cana-de-açúcar e à casca de coco verde. A lignina é um composto favorável quando se trata de aproveitamento energético porque, além de possuir, de acordo com Santos et al. (2016), porcentagens consideráveis de carbono elementar em sua composição, está diretamente ligada ao poder calorífico do material. Sendo assim, para esta finalidade, são preferíveis materiais com maior teor de lignina.

Para a casca de coco verde, o valor médio encontrado foi superior ao valor de 19,47% obtido por Cardoso e Gonzalez (2016). O valor pode ter sido superior em decorrência da utilização da casca inteira do coco verde, enquanto o trabalho citado utilizou apenas a parte mais fibrosa da casca. Para o bagaço de cana-de-açúcar, o valor médio encontrado no presente trabalho corrobora com o valor de 21,93% encontrado por Paula (2010).

O capim-elefante apresentou o maior valor médio de celulose, com 46,59%, seguido do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de coco verde, com 36,71 e 25,00%, na devida ordem. No

processo de queima, a celulose e as hemiceluloses são moléculas que sofrem degradação em temperaturas mais baixas quando comparadas à lignina. Por isso, tratam-se de compostos que contribuem para a degradação do material.

O valor médio de celulose encontrado para o bagaço da cana-de-açúcar foi inferior ao valor de 43,43% encontrado por Pego et al. (2019), no entanto, a soma de celulose e hemiceluloses (holocelulose) é similar nos dois trabalhos. O teor de celulose da casca de coco verde encontrado está de acordo com os 24,70% encontrados por Cabral et al. (2017). Silva et al. (2016), ao estudar a composição química de cinco variedades de capim-elefante, encontraram valor médio de 41,51% de celulose, valor inferior ao do presente trabalho.

A biomassa que apresentou resultado mais satisfatório no que diz respeito ao teor de cinzas para uso através da queima foi o bagaço de cana-de-açúcar, com o valor médio de 2,73%. O capim-elefante e a casca de coco verde apresentaram, respectivamente, 5,75 e 7,27% de média para esta variável.

O alto teor de cinzas é uma característica desfavorável para a utilização energética de biomassas visto que está ligado ao poder calorífico do material de forma inversa e, quando elevado, pode causar danos em equipamentos de queima, a exemplo de caldeiras onde os minerais podem possibilitar a criação de uma crosta indesejável na superfície, diminuindo a sua vida útil. Portanto, são preferíveis os materiais que apresentam um baixo teor de cinzas.

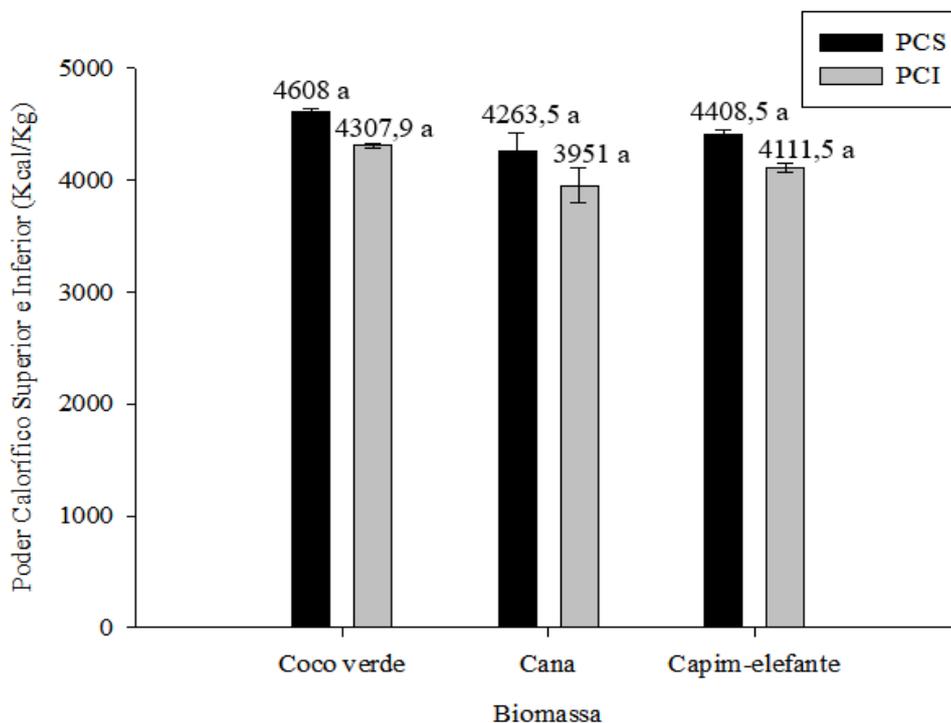
O valor encontrado para a casca do coco é superior ao valor de 2,56% citado por Cabral et al. (2017) e inferior aos 13,24% encontrados por Marcelino, Melo e Torres (2018). O percentual de cinzas do bagaço da cana-de-açúcar foi inferior ao encontrado por Padilla et al. (2016). As cinzas encontradas para o capim-elefante estão acima do que foi encontrado por Paiva (2017).

É válido frisar que as características químicas de uma espécie vegetal podem ser afetadas por fatores como material genético (podendo diferir ainda dentro da mesma espécie), local de plantio, tipo de solo e adubação, entre outros.

5.1.5 Poder calorífico superior e inferior

Não houve diferença estatística entre as três biomassas para as variáveis poder calorífico superior e inferior. A figura 7 apresenta as médias de poder calorífico superior e inferior para cada biomassa.

Figura 7. Poder calorífico superior (PCS) e inferior (PCI) médio para casca de coco verde, bagaço de cana-de-açúcar e capim-elefante.



Fonte: autora, 2020.

O poder calorífico superior variou de 4.263 a 4.608 Kcal/Kg, já o poder calorífico inferior variou de 3.951 a 4.307 Kcal/Kg. A biomassa que apresentou maiores valores de poder calorífico superior e inferior foi a casca de coco verde. As menores médias de poder calorífico superior e inferior pertencem ao bagaço de cana.

Referente aos resíduos da casca do coco, Esteves (2014) encontrou um poder calorífico de 4418.65 Kcal/Kg (18,5 MJ/m³) que é inferior ao valor de 4.608 Kcal/Kg encontrado no presente trabalho. Paula (2010) encontrou 4274,48 e 3855,78 Kcal/Kg para o bagaço de cana de açúcar, valores similares aos encontrados neste trabalho. O poder calorífico médio do capim-elefante foi um pouco superior ao valor de 4308 Kcal/Kg encontrado por Paiva (2017).

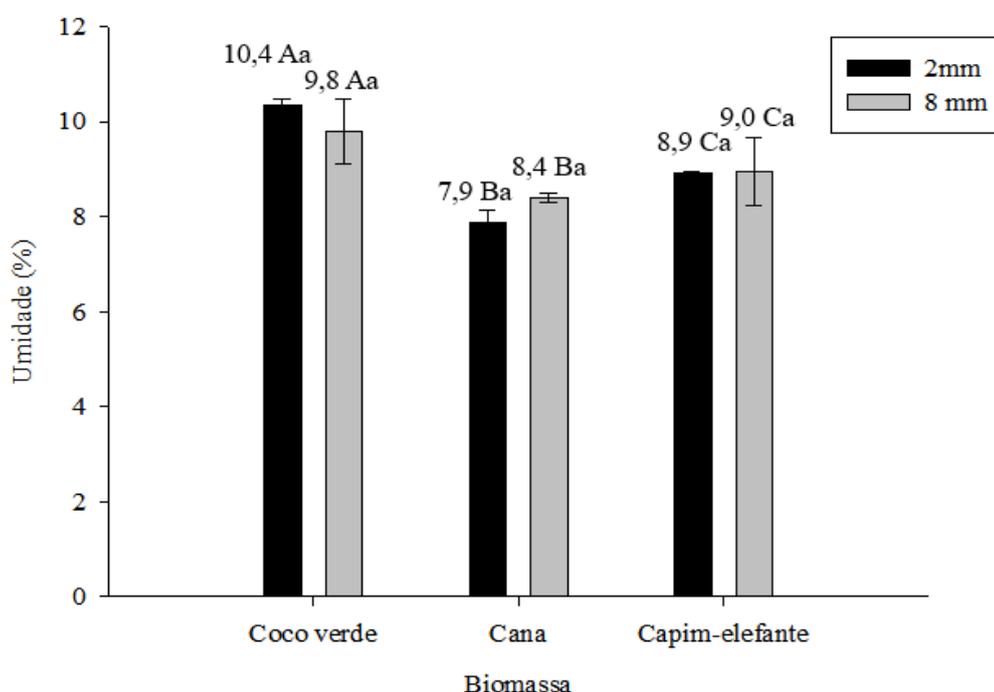
No que diz respeito ao aproveitamento energético de biomassas, o poder calorífico é uma característica de suma importância, podendo ser afetado pelos teores de cinzas e de lignina, quantidade de carbono e hidrogênio do material, bem como sendo influenciado pela umidade. Biomassas com alto poder calorífico são as mais indicadas para a utilização em energia.

5.2 Características dos briquetes

5.2.1 Umidade

Para o teor de umidade, a interação entre biomassa e granulometria não foi estatisticamente significativa. Desse modo, os fatores foram analisados separadamente. A figura 8 apresenta as médias do teor de umidade para cada biomassa dentro de cada granulometria.

Figura 8. Teor médio de umidade dos briquetes de casca de coco verde, bagaço de cana-de-açúcar e capim-elefante em diferentes granulometrias.



Letras maiúsculas e minúsculas correspondem, respectivamente, aos fatores biomassa e granulometria. Médias seguidas das mesmas letras não diferem entre si a um nível de 5% de probabilidade de erro pelo teste de Tukey.

Em relação às biomassas, ocorreu diferença estatística. Os briquetes de capim-elefante e casca de coco verde apresentaram, respectivamente, o menor e o maior teor de umidade. O teor de umidade dos briquetes variou de 7,9 a 10,4%.

Na geração de energia a partir da biomassa, um parâmetro que deve ser controlado é o teor de umidade no produto final (DIAS et al., 2012). Uma baixa umidade de equilíbrio é importante para uma melhor eficiência energética, visto que a presença de água no material tende a diminuir a energia gerada na combustão. Barros (2012) obteve briquetes com teor de umidade de 9,3% similar ao da casca do coco.

Os valores de umidade para os briquetes das três biomassas, permaneceram na margem predita em literatura (8 a 15%) como a mais viável para a produção dos mesmos. No entanto,

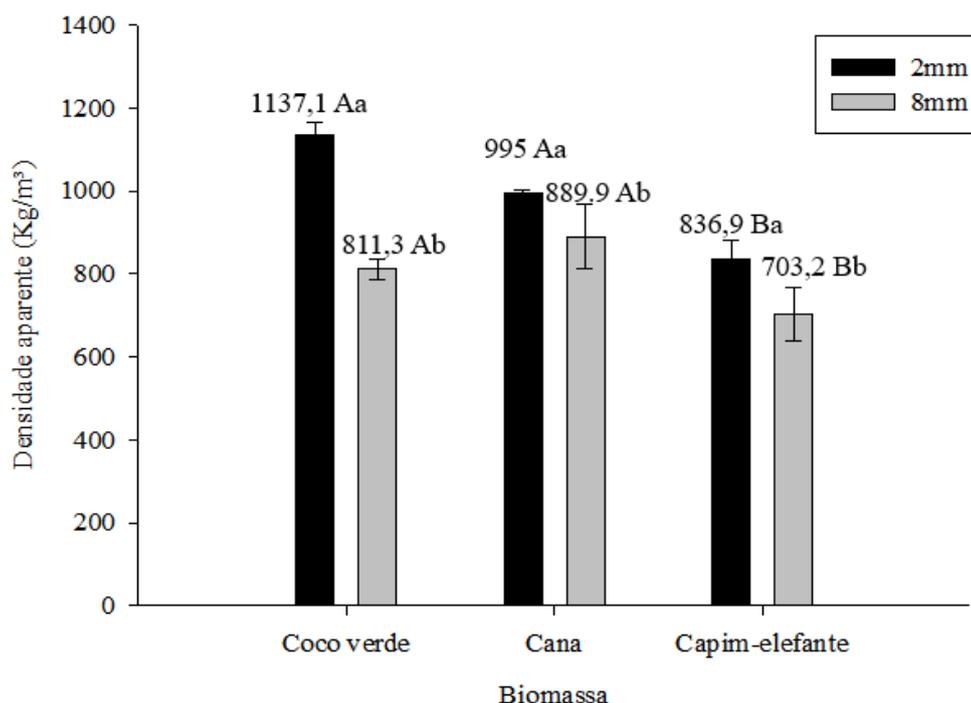
após a estabilização de massa, dentre os briquetes produzidos, apenas os de casca de coco verde permaneceram, em média, dentro da margem de umidade com a qual foram produzidos (12 a 14%), ficando os briquetes de bagaço de cana-de-açúcar e capim-elefante com menos umidade após a estabilização.

Não ocorreu diferença estatística entre as granulometrias para a variável umidade. A variação entre o teor de umidade dos briquetes nas duas granulometrias foi baixa. O baixo teor de umidade pode ser considerado uma característica positiva, visto que o aumento do teor de água no material tende a afetar o seu poder calórico e conseqüentemente sua eficiência energética.

5.2.2 Densidade aparente

A interação entre os fatores biomassa e granulometria foi estatisticamente significativa para a densidade aparente. A figura 9 mostra as médias desta variável para cada tratamento.

Figura 9. Densidade aparente média para os briquetes de casca de coco verde, bagaço de cana-de-açúcar e capim-elefante em diferentes granulometrias.



Fonte: autora, 2020.

A densidade aparente variou de 703,23 a 1137,12 Kg/m³, corroborando com Dias et al. (2012) que afirmaram que, em geral, a densidade aparente de briquetes varia entre 500 e 1200 Kg/m³.

Quanto ao fator biomassa, para a variável densidade, os briquetes de casca de coco verde não diferiram estatisticamente dos de bagaço de cana-açúcar, havendo diferença estatística apenas em relação aos briquetes de capim-elefante. Os briquetes que apresentaram menor densidade aparente média, por sua vez, foram os de capim-elefante.

Os briquetes de casca de coco verde produzidos a partir da biomassa classificada em granulometria de 2 milímetros apresentaram maior média de densidade aparente em comparação aos demais tratamentos avaliados, já os briquetes de capim-elefante produzidos em granulometria de 8 milímetros tiveram menor média de densidade aparente.

Os valores de densidade aparente de 995,01 e 889,89 Kg/m³ dos briquetes de bagaço de cana nas granulometrias de 2 e 8 milímetros, respectivamente, foram superiores ao valor de 606 Kg/m³ encontrados por Paula (2010) para briquetes do mesmo tipo de material, entretanto, a densidade aparente foi mais próxima à densidade de 841 Kg/m³ encontrada pela mesma autora para briquetes de palha de cana-de-açúcar.

A densidade dos briquetes de casca de coco verde produzidos com partículas de 2 milímetros foi similar ao valor de 1177,2 Kg/m³ encontrado por Barros (2012) para o mesmo tipo de biomassa. Os resultados obtidos neste estudo para a densidade aparente dos briquetes de casca de coco verde com granulometria de 8mm (811,3 Kg m⁻³) é similar ao valor encontrado por Nones et al. (2017), os quais verificaram um valor médio de 897 Kg m⁻³.

As médias de densidade aparente dos briquetes de capim-elefante nas duas granulometrias foram inferiores aos 956,9 Kg/m³ encontrados por Nakashima et al (2014).

De modo geral, a granulometria de 2 milímetros propiciou briquetes de maior densidade, quando comparada à granulometria de 8 milímetros. Tal fato pode ter ocorrido porque menores partículas tendem a criar uma maior superfície de contato para a ligação entre elas, fazendo com que elas se ligassem mais e diminuísse a existência de espaços vazios no interior dos briquetes após a retirada da pressão. Além disso, a plastificação da lignina pode ocorrer com maior facilidade em partículas menores, considerando que neste caso, foi aplicada temperatura (125°C) para a confecção dos briquetes.

Dentro da granulometria de 8 milímetros, a biomassa que propiciou a produção de briquetes com maior densidade foi o bagaço da cana-de-açúcar, todavia, todos os briquetes confeccionados com partículas nesta granulometria apresentaram rachaduras. A presença de rachaduras pode ter ligação com a retirada de pressão na prensa manual uma vez que não existiu um modelo mais adequado para a retirada dos briquetes do interior do equipamento.

Silva et al. (2018) constataram mostram que é possível a produção de briquetes de boa qualidade empregando-se capim-elefante como matéria-prima, sendo que, quanto menor a granulometria do material maior a compactação e densidade energética do briquete produzido. Estes autores verificaram que briquetes de capim-elefante com granulometria mais fina apresentaram menor taxa de expansão e maior resistência mecânica quando comparados com briquetes de maior granulometria, confirmando a influência do tamanho das partículas no processo de briquetagem, como resultado do aumento da área superfície de contato. Estes autores verificaram que os valores da densidade aparente dos briquetes de capim-elefante oscilaram entre 797,22 e 825,95 kg m⁻³.

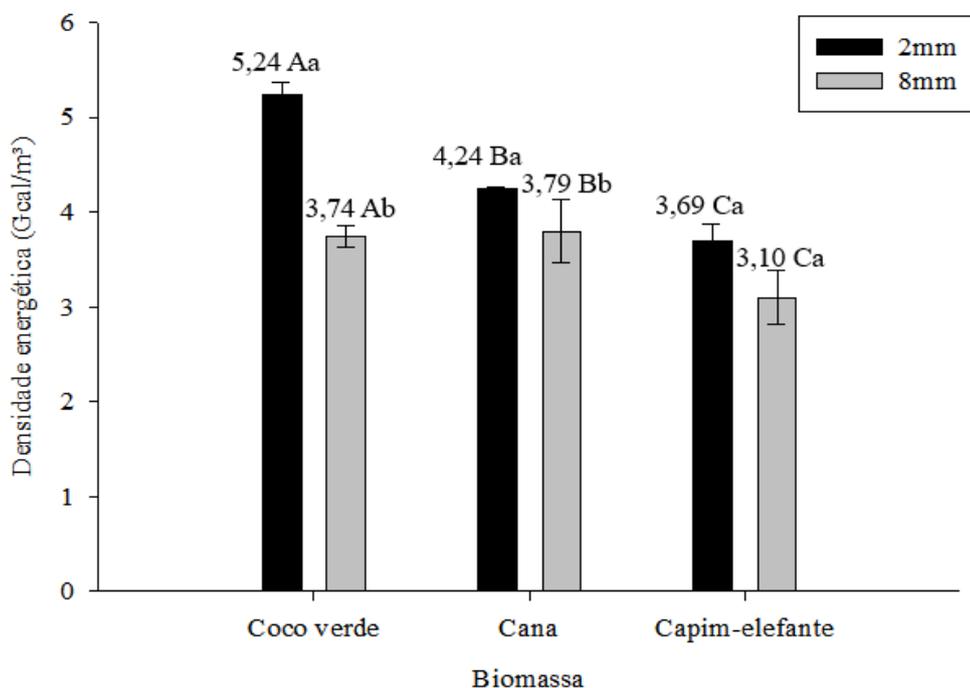
A densidade dos briquetes está diretamente ligada à quantidade de energia contida por volume ocupado, por isso são preferíveis os briquetes de elevada densidade aparente, já que quanto mais denso o briquete, um menor volume é necessário para armazenar determinada quantidade de energia. Tal variável tem importância não só para queima, mas também para armazenamento e transporte.

5.2.3 Densidade energética

A interação entre biomassa e granulometria foi significativa para a densidade energética. A figura 10 apresenta as médias de densidade energética para cada tratamento.

Assim como na densidade aparente, a casca de coco verde na granulometria de 2 mm apresentou melhores resultados em relação à densidade energética, com média de 5,24 Gcal/m³. A densidade energética dos briquetes de casca de coco verde foi superior à encontrada por Barros (2012) para briquetes da mesma biomassa em granulometria de 40 mesh. O tratamento que apresentou menor densidade energética foi o capim-elefante na granulometria de 8 milímetros, com densidade energética de 3,10 Gcal/m³.

Figura 10. Densidade energética média para os briquetes de casca de coco verde, bagaço de cana-de-açúcar e capim-elefante em diferentes granulometrias.



Fonte: autora, 2020.

No que tange às biomassas, a casca de coco verde apresentou briquetes com maior densidade energética. No que se refere às granulometrias, os briquetes confeccionados em granulometria de 2 milímetros demonstraram maiores valores de densidade energética.

A densidade energética é uma característica de suma importância para avaliar a qualidade dos briquetes, uma vez que é o resultado das duas características de maior interesse: a densidade e ao poder calorífico.

O valor de 5,24 Gcal/m³ encontrado para a casca de coco verde foi superior aos 2,25 Gcal/m³ (valor convertido de 9.435 MJ/m³) encontrados por Esteves (2014) para a biomassa do coco verde. O aumento considerável na densidade energética pode ter ocorrido porque a densidade aparente média dos briquetes do referido trabalho foi inferior ao valor médio encontrado no presente trabalho.

Souza e Vale (2016) encontraram valores de densidade energética de briquetes de bagaço de cana-de-açúcar variando de 3,95 a 4,27 Gcal/m³, respaldando o valor de 4,24 Gcal/m³ determinado no presente trabalho.

6. CONCLUSÕES

A casca de coco verde, o bagaço da cana-de-açúcar e o capim-elefante apresentaram características favoráveis ao aproveitamento energético, com destaque para a casca de coco, devido à sua composição química e características energéticas.

Os briquetes confeccionados em granulometria de 2 mm apresentam melhores características para a utilização.

No estado de Alagoas, as três biomassas estudadas podem ser viáveis para a produção de briquetes. A produção e comercialização de briquetes como lenha ecológica pode possibilitar que haja a diversificação, ainda que em pequena escala, na matriz energética local.

São necessários estudos complementares para que haja a otimização do processo de produção de briquetes das biomassas avaliadas neste trabalho, tais como estudos referentes à umidade, temperatura e granulometria ideais para a confecção de produtos de alto desempenho energético, logístico e comercial.

REFERÊNCIAS

- ABREU, H. S. et al. Métodos para análise química em madeira. **Floresta e ambiente**. Série técnica. p.01-20, Jan/2006.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 2. Ed. Brasília, 2005. Disponível em: <http://www3.aneel.gov.br/atlas/atlas_2edicao/index.html> Acesso em 18 dez. 2019.
- ALVES JUNIOR, F.T.; GUIMARÃES, J.L.S.; SANTOS, G.A.; LEITE, A.M.F.; BARROS, G.D.T. **Utilização de biomassa para briquetagem como fonte de energia alternativa e a disponibilidade deste recurso na região do Cariri-CE**. XXIII Encontro Nac. de Eng. de Produção - Ouro Preto, MG, Brasil, 21 a 24 de out de 2003.
- ALVES JÚNIOR, F.T.; SANTOS, G.A. **Potencial de geração de biomassa para briquetagem e o perfil do mercado consumidor deste insumo na região do Cariri-CE**. In: Congresso iberoamericano de pesquisa e desenvolvimento de produtos florestais, 2.; Seminário em tecnologia da madeiras e produtos florestais não-madeiráveis, 1., 2002, Curitiba. Anais... Curitiba: FUPEF, 2002. 1 CD-ROM.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11941**. Madeira: determinação da densidade. Rio de Janeiro, 2003. 3 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13999**. Papel, cartão, pastas celulósicas e madeira — Determinação do resíduo (cinza) após a incineração a 525 °C. Rio de Janeiro, 2017. 5 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14853**. Determinação do material solúvel em etanol-tolueno e em diclorometano e em acetona. Rio de Janeiro, 2010. 3 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 2850** Coque: determinação do poder calorífico superior. Rio de Janeiro, 1990. 6 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8112**: carvão vegetal: análise imediata. Rio de Janeiro, 1983. 6 p.
- BARROS, L. O. **Densidade energética de briquetes produzidos a partir de resíduos agrícolas**. 2012. 46f. Trabalho de conclusão de curso - Universidade de Brasília, Distrito Federal, 2012.
- BRAINER, M. S. C. P. Produção de coco: o Nordeste é destaque nacional. **Caderno setorial da Empresa transmissora de energia do Nordeste – Banco do Nordeste**. Ano 3. nº 61. Dezembro, 2018.
- CABRAL, M. M. S.; SOUZA, A. K. A.; SANTOS, M. S. R. R.; ALMEIDA, R. M. R. G., GOMES, M. A. Composição da fibra da casca de coco verde in natura e após pré-tratamentos químicos. **Engevista**. v. 19, n. 1, p. 99-108, 2017.

CABRAL, M.M.S.; ABUD, A.K.S.; SILVA, C.E.F.; ALMEIDA, R.M.R.G. Bioethanol production from coconut husk fiber. Santa Maria: **Ciência Rural**, v.46, n.10, p.1872-1877, 2016.

CAIRES, R.R. **Briquetagem - Biomassa**. 2010. Trabalho de conclusão de curso Universidade de Campinas, Campinas, 2010.

CAMPOS, A. C. M. **Carvão de *Eucalyptus*: efeito dos parâmetros da pirólise sobre a madeira e seus componentes químicos e predição da qualidade pela espectroscopia NIR**. 2008. 118 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

CARDOSO B. M. **Uso da Biomassa como Alternativa Energética**. 2012. 98 f. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal do Rio de Janeiro – Escola Politécnica. Rio de Janeiro, 2012.

CARDOSO, M. S.; GONÇALEZ, J. C. Aproveitamento da casca do coco-verde (*Cocos nucifera* L.) para produção de polpa celulósica. **Ciência Florestal**, v. 26, n. 1, p. 321-330, 2016. Santa Maria, RS.

CARNEIRO JUNIOR, J. A. M.; ALVES, C. T.; TORRES, E. A. Biomassa torrefeita: um novo combustível para a indústria. **Bahia Análise & Dados**, v. 27, n. 1, p. 204-228, 2018. Companhia Nacional de Abastecimento. **Boletim Companhia Nacional de Abastecimento**. Disponível em: < <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana/boletim-da-safra-de-cana-de-acucar> >. Acesso em: 16 jan. 2020.

Costa, E. V. S.; Pereira, M. P. D. C. F.; Silva, C. M. S.; Pereira, B. L. C.; Rocha, M. F. V.; Carneiro, A. C. O. BRIQUETES TORRIFICADOS DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR E EUCALIPTO. **Revista Árvore**, v. 43, n. 1, 2019.

DANTAS FILHO, P. L. **Análise da viabilidade econômica financeira de um projeto de cogeração de energia através do bagaço de cana-de-açúcar**. In: SIMPÓSIO DE GESTÃO E ESTRATÉGIA EM NEGÓCIOS DA UFRuralRJ, 6., 2008, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: Seropédica, 2008. p. 1-11.

DIAS, J.M.C.S.; SOUZA, D.T.; BRAGA, M.; ONOYAMA, M.M.; MIRANDA, C.H.B.; BARBOSA, P.F.D.; ROCHA, J.D. Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais. Brasília, DF: Embrapa Agroenergia, 2012. 130 p. (**Documentos**, 13).

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Brazilian Energy Balance 2019 Year 2018**. Rio de Janeiro: EPE. 2019. 292 p.

ESTEVES, M. R. L. **Estudo do potencial energético e aproveitamento das cascas de coco verde para a produção de briquete em Maceió-AL**. Dissertação – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2014.

FERNANDES, C. R. P. **PRODUÇÃO DE BRIQUETE INDUSTRIAL: ENERGIA LIMPA E SUSTENTÁVEL**. In: III Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental Goiânia/GO,

2012. Disponível em: <<http://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2012/X-007.pdf>>. Acesso em: 14 de Jan. de 2020.

FIGUEIRA, F.V.; MARTINAZZO, A.P.; TEODORO, C.E.S. Estimativa da viabilidade econômica da produção de briquetes a partir de resíduos de grãos beneficiados. **ENGEVISTA**. Univ. Federal Fluminense, Niterói-RJ. v.17, n.1, p.95–104, 2015.

FREDERICO, P. G. U. **Efeito da região e da madeira de eucalipto nas propriedades do carvão vegetal**. 2009. 86 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.

FURTADO, T.S.; VALIN, M.; BRAND, M. A.; BELLOTE, A.F.J. Variáveis do processo de briquetagem e qualidade de briquetes de biomassa florestal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, vol. 30, n. 62, p. 101-106. 2010.

GARCIA, D. P. As indústrias de pellets no Brasil: o Brasil tem tudo para ser líder mundial neste segmento. **Revista da Madeira**, 133. ed., 2012.

GOLDEMBERG, J. Biomassa e energia. **Quim. Nova**, Vol. 32, No. 3, 582-587, 2009. International Energy Agency. Data and statistics. Disponível em: < <https://www.iea.org/data-and-statistics> > Acessado em: 21 dez. 2019.

Lima Júnior, C.; Sampaio, E. V. D. S. B., Lima, R. L. F. A.; Menezes, R. S. C. Potencial de aproveitamento energético de fontes de biomassa no Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 7, p. 207-221, 2014.

LOPES SOBRINHO, O. P.; SILVA, G. S.; PEREIRA, A. I. S.; SOUSA, A. B.; CASTRO JÚNIOR, W. L.; SANTOS, L. N. S. A cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) e o manejo de irrigação. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**. v. 12, n.4, p. 1605-1625, out./dez. 2019.

MAGALHÃES, M. A. **Produção Caracterização de Pellets de Capim elefante** (*Pennisetum purpureum Schum*). 2014. 35f. Trabalho (Conclusão de curso- Engenharia Florestal)- Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2014.

MAPA - MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. 2016. **Relação das unidades produtoras cadastradas no departamento da cana-de-açúcar e agroenergia**. Brasília: MAPA. Disponível em: . Acesso em: 9 abr. 2016.

MARAFON, A. C., SANTIAGO, A. D., MACHADO, J. C., GUIMARÃES, V. S.; PAIVA, H. L. (2017). **Produção de Biomassa em Gramíneas Tropicais com Potencial Energético**. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Sergipe. 2017.

MARAFON, A.C.; NUNES, M.U.C.; AMARAL, A.F.C.; SANTOS, J.P. **Aproveitamento de cascas de coco para geração de energia térmica: potencialidades e desafios**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2019. 22p. (Documentos, 234).

MARCELINO, M. M.; MELO, S. A. B. V.; TORRES, E. A. Caracterização da biomassa da casca de coco para obtenção de energia. **Bahia Análise & Dados**, v. 27, n. 1, p. 336-355, 2018.

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

MMA - Ministério do Meio Ambiente. **Biomassa para energia no Nordeste: atualidade e perspectivas**. Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento. Brasília, DF: MMA, 2018. 161 p.

MORAES, S. L.; MASSOLA, C. P.; SACCOCCIO, E. M.; DA SILVA, D. P.; GUIMARÃES, Y. B. T. Cenário brasileiro da geração e uso de biomassa adensada. **Revista IPT - Tecnologia e Inovação**, v.1, n.4, abr., 2017.

MORAIS, R. F. D. **Potencial produtivo e eficiência da fixação biológica de nitrogênio de cinco genótipos de capim elefante (*Pennisetum purpureum Schum.*), para uso como fonte alternativa de energia**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. 2008. Seropédica, RJ. 2008.

NAKASHIMA, G. T.; MARTINS, M. P.; SILVA, D. A.; CHRISOSTOMO, W.; YAMAJI, F. M. Aproveitamento de resíduos vegetais para a produção de briquetes. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais (Online)**, (34), 22-29, 2014.

NONES, D.L.; BRAND, M.A.M.; ANDRADE, E.; OLIVEIRA, J.; MARTINS, S.A. Uso potencial da casca de coco verde para produção de briquetes. In: III Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira, UDESC: Florianópolis, 2017.

OSHIRO, T. L. **Produção e caracterização de briquetes produzidos com resíduos lignocelulósicos**. 2016. 78 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2016.

PADILLA, Elias Ricardo D. et al. Produção e caracterização físico-mecânica de briquetes de fibra de coco e palha de cana-de-açúcar. **Revista Virtual de Química**, v. 8, n. 5, 2016.

PAIVA, H. L. **Secagem ao sol do capim-elefante visando o aumento da eficiência do processo de conversão térmica**. Trabalho de Conclusão de Curso. 2017. 35f. Universidade Federal de Alagoas – Centro de Ciências Agrárias. Rio Largo, 2017.

PAULA, Luana Elis de Ramos. **Produção e avaliação de briquetes de resíduos lignocelulósicos**. 2010. 83 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.

PAZ, E. D. C. S.; PEDROZA, M. M.; OLIVEIRA, L. R. A. Alternativa de exploração sustentável dos resíduos do coco verde para a produção de energia. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v.6, n.2, p. 318 – 345, 2017.

PEGO, M. F.; BIANCHI, M. L.; VEIGA, T. R. L. A. Avaliação das propriedades do bagaço de cana e bambu para produção de celulose e papel. **Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, 62. 2019.

PROTÁSIO, T. P.; BUFALINO, L.; TONOLI, G. H. D.; COUTO, A. M.; TRUGILHO, P. F.; GUIMARÃES JÚNIOR, M. Relação entre o poder calorífico superior e os componentes elementares e minerais da biomassa vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 66, p. 122-133, 2011. DOI: 10.4336/2011.pfb.31.66.113.

QUIRINO, W. F. **Utilização energética de resíduos vegetais**. IBAMA, Laboratório de Produtos Florestais, 2002.

QUIRINO, W. F. **Utilização energética de resíduos vegetais**. Laboratório de Produtos Florestais LPF/IBAMA. Módulo do Curso “Capacitação de agentes multiplicadores em valorização de madeira e dos resíduos vegetais”, 2000.

QUIRINO, W.F. **Utilização energética de resíduos vegetais**. Brasília: LPF/IBAMA, 2003. 14p.

RAMOS E PAULA, L. E. **Produção e avaliação de briquetes de resíduos lignocelulósicos**. 2010. 83f. Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.

REIS, A. A.; PROTÁSIO, T. P.; MELO, I. C. N. A.; TRUGILHO, P. F.; CARNEIRO, A. C. O. Composição da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus urophylla* em diferentes locais de plantio. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 32, n. 71, p. 277, 2012.

RODRIGUES, L. D.; SILVA, I. T.; ROCHA, B. R. P.; SILVA, I. M. O. **Uso de briquetes compostos para produção de energia no estado do Pará** In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 2002, Campinas.

ROSA, M. D. F.; SANTOS, F. D. S.; MONTENEGRO, A. A. T.; ABREU, F. D.; CORREIA, D.; ARAÚJO, F. D.; NORÕES, E. D. V. Caracterização do pó da casca de coco verde usado como substrato agrícola. Embrapa Agroindústria Tropical-Comunicado Técnico (INFOTECA-E). 2001.

SANTOS, F. A.; QUEIRÓZ, J. H. 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, 1004-1010, 2012.

SANTOS, J. O.; SANTOS, R. M. S.; COSTA, L. M.; MEDEIROS, A. C.; COELHO, D. C.; MARACAJÁ, P. B. Produção e utilização de briquetes no Brasil. **Revista Brasileira de Agrotecnologia**. v. 5, n. 1, p. 36 - 40, Jan-Dez, 2015.

SANTOS, L. R. O. **Análise da eficiência energética das biomassas utilizadas em fornos cerâmicos na região de Tatuí-SP**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São Carlos, 2015.

SANTOS, R. C. D.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; CASTRO, R. V. O.; VIDAURRE, G. B., TRUGILHO, P. F.; CASTRO, A. F. N. M. Influência das propriedades químicas e da relação siringil/guaiacil da madeira de eucalipto na produção de carvão vegetal. **Ciência Florestal**, v. 26, n. 2, p. 657-669, 2016.

SENHORAS, E. M. **Estratégias de uma agenda para a cadeia agroindustrial do coco: transformando a ameaça dos resíduos em oportunidades eco-eficientes**. Trabalho de

conclusão de curso - Instituto de Economia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

SILVA, A. L. C.; SANTOS, M. V. F.; DUBEUX JÚNIOR, J. C. B.; LIRA, M. A.; FERREIRA, R. L. C.; FREITAS, E. V.; CUNHA, M. V.; SILVA, M. C. Variabilidade e herdabilidade de caracteres morfológicos em clones de capim-elefante na Zona da Mata de Pernambuco. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.39, n.1, p.2132-2140, 2010. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1590/S1516-35982010001000005> >. Acesso em: 25 de janeiro de 2020.

SILVA, C. A. L.; CAMPANHA, R. B.; MACHADO, J. C.; OLIVEIRA, P. A. **Análise da composição química de cinco variedades de capim-elefante por métodos diferentes.** In *Embrapa Agroenergia-Artigo em anais de congresso (ALICE)*. In: ENCONTRO DE PESQUISA E INOVAÇÃO DA EMBRAPA AGROENERGIA, 3., 2016, Brasília, DF. Anais... Brasília, DF: Embrapa, 2016.

SILVA, C.A. **Estudo técnico-econômico da compactação de resíduos madeiros para fins energéticos.** 68p. Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica - Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2007.

SILVA, D. A.; ALESI, L. S.; RÓZ, A. L.; SANTOS, L. R. O.; QUADROS, T. M. C.; YAMAJI, F. M. Efeito da Granulometria na Compactação da Biomassa de Capim Elefante. **Revista Virtual de Química**. vol. 10, nº 2, pag. 323-333. Março-Abril, 2018.

SILVA, D. A.; NAKASHIMA, G. T.; BARROS, J. L.; ROZ, A. L.; YAMAJI, F. M. Caracterização de biomassas para a briquetagem. **Floresta**, v. 45, n. 4, p. 713-722, 2015.

SILVA, R. G. C.; MARINHO, M. S. S.; COLA, R. E.; NOBRE, S. C. M.; SÁ, V. A. **Caracterização de diferentes resíduos lignocelulósicos para a geração de energia.** V CONGRESSO NORDESTINO DE ENGENHARIA FLORESTAL. Bom Jesus, Piauí. 2016.

SIQUEIRA, L. A.; ARAGÃO, W. M.; TUPINAMBÁ, E. A. **A introdução do coqueiro no Brasil, importância histórica e agrônômica.** Aracaju. EMBRAPA Tabuleiros Costeiros. 2002. 24p.

SOUZA, F.; VALE, A. T. Densidade energética de briquetes de biomassa lignocelulósica e sua relação com os parâmetros de briquetagem. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 36, n. 88, p. 405-413, 2016.

STREZOV, V.; EVANS, T. J.; HAYMAN, C. Thermal conversion of elephant grass (*Pennisetum Purpureum* Schum) to bio-gas, bio-oil and charcoal. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 17, p. 8394-8399, 2008.

VAN DAM, J.E.G., VAN DEN OEVER, M.J.A., KEIJSERS, E.R.P. Production process for high density high performance binderless boards from whole coconut husk. **Industrial Crops Products**, 20, p 97-101. 2004.

VIEIRA, S. M. M.; VIEIRA, F. S.; CARVALHO, C. C.; TRINDADE, L. C.; FRANÇA, A. B. (2017). PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL A PARTIR DA CARBONIZAÇÃO DE CAPIM ELEFANTE (*Pennisetum purpureum* Schum). **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, 3(8), 1114-1117.