



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA E AMBIENTAL
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL**

DEIBY ANNE UCHÔA BARROSO BIZERRA

**AVALIAÇÃO DA PALHA DE CARNAÚBA *IN NATURA* E CARBONIZADA PARA
PRODUÇÃO DE COMBUSTÍVEIS SÓLIDOS:**

Análise Imediata, Poder Calorífico e Densificação da Biomassa

FORTALEZA

2017

DEIBY ANNE UCHÔA BARROSO BIZERRA

AVALIAÇÃO DA PALHA DE CARNAÚBA *IN NATURA* E CARBONIZADA PARA
PRODUÇÃO DE COMBUSTÍVEIS SÓLIDOS: ANÁLISE IMEDIATA, PODER
CALORÍFICO E DENSIFICAÇÃO DA BIOMASSA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Ambiental do Departamento de Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientadora: Prof^a Dra. Maria Alexandra de Sousa Rios.

FORTALEZA

2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- B552a Bizerra, Deiby Anne Uchoa Barroso.
Avaliação da palha de carnaúba in natura e carbonizada para produção de combustíveis sólidos: : análise imediata, poder calorífico e densificação da biomassa / Deiby Anne Uchoa Barroso Bizerra. – 2017.
62 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Ambiental, Fortaleza, 2017.
Orientação: Profa. Dra. Maria Alessandra de Sousa Rios.
1. Biomassa. 2. Análise Imediata. 3. Poder Calorífico Superior. 4. Energia. I. Título.

CDD 628

DEIBY ANNE UCHÔA BARROSO BIZERRA

AVALIAÇÃO DA PALHA DE CARNAÚBA *IN NATURA* E CARBONIZADA PARA
PRODUÇÃO DE COMBUSTÍVEIS SÓLIDOS: ANÁLISE IMEDIATA, PODER
CALORÍFICO E DENSIFICAÇÃO DA BIOMASSA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia Ambiental do
Departamento de Hidráulica e Ambiental da
Universidade Federal do Ceará, como requisito
parcial para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Ambiental.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof^a Dra. Maria Alexandra de Sousa Rios (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof^a Dra. Yguatyara de Luna Machado
Centro Universitário Maurício de Nassau (UNINASSAU)

Prof^a Dra. Ada Amélia Sanders Lopes
Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)

A Deus.

Aos meus pais, Helena e Valdo.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo amor incondicional em todos os momentos da minha vida. Só posso render glórias, honra e louvor Àquele que é digno, pois sem Ele nada poderia fazer.

Aos meus pais, Helena e Valdo, por todo o amor a mim dedicado, pelo apoio, incentivo e encorajamento. A vocês todo o meu carinho e minha eterna gratidão. Amo vocês!

Ao meu irmão, Deibyson pelas chatices de sempre.

À Luska, pela doçura, amor e serenidade.

À minha orientadora Profa. Dra. Maria Alexandra de Sousa Rios, pela oportunidade, atenção e apoio para a realização deste trabalho.

Às professoras participantes da banca examinadora Yguatyara de Luna Machado e Ada Amélia Sanders Lopes pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

A cada um dos professores aos quais tive a oportunidade de ser aluna, em especial aos professores do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, pela dedicação e principalmente pelo conhecimento transmitido ao longo do curso, indispensáveis para a minha formação profissional.

Aos meus amigos de faculdade que tornaram essa caminhada mais leve. Em especial a Allan Clemente, Ana Paula Silva, Ariadne Ferreira, Claudia Wieser, Diego Coutinho, Guilherme Rúben, John Alef, Ingrid Carvalho, Karine Nunes, Leonardo Abreu, Letícia Viana, Petrucio Xenofonte, Sílvio Duarte, Suerda Santos, Valquíria Lima, Vanessa Maia, Vinícius Melo e Walter Jhameson.

Às minhas amigas do curso técnico de Segurança do Trabalho no IFCE, Lorena, Manu e Rayra por todas as risadas diárias, idas à praça da Gentilândia, estresses de trabalho em equipe (risadas).

Aos meus amigos técnicos-administrativo da Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação da UFC, Juliana, Lenilda, Narcelio, Rondinelly e Victor pelo apoio, aprendizado e momentos de descontração durante os meus dois anos de estágio.

Aos técnicos e amigos do Laboratório de Referência em Biocombustíveis, Chastriane Barros, Erick Felipe, Rosali Marques e Raul Paixão pela amizade e pelo auxílio na realização dos ensaios no laboratório.

À EMBRAPA, mais precisamente ao Laboratório de Tecnologia da Biomassa (LTB), pela colaboração na realização da Análise Elementar.

“Não temas, pois eu sou contigo.
Não tenha medo, eu sou o teu Deus.
Eu o fortalecerei e o ajudarei,
Eu o segurarei com minha mão vitoriosa.”

(Isaías 41:10)

RESUMO

A utilização da biomassa visando à produção de combustível sólido a partir da palha da carnaúba vem apresentando um potencial promissor no estado do Ceará, uma vez que esta região apresenta um destaque no extrativismo da carnaúba (*Copernicia prunifera*). Diante do exposto, este trabalho teve como objetivo caracterizar a biomassa residual proveniente da cultura da carnaúba, mais especificamente, a palha da carnaúba tanto *in natura* quanto na sua forma carbonizada. A caracterização do resíduo baseou-se segundo as técnicas de Análise Imediata (umidade, voláteis, cinzas e carbono fixo) e o Poder Calorífico Superior (PCS), os quais foram regidos, respectivamente, pelas normas ABNT NBR 8112 e 8633. A metodologia baseou-se em secar a biomassa *in natura* em estufa a 105 °C e, em seguida, carbonizá-la em forno mufla a diferentes temperaturas, 250 °C, 300 °C, 350 °C e 400 °C, conforme análise pretendida. Os resultados mostraram que a palha da carnaúba *in natura* apresentou 11,10 % de teor de umidade; 75,77 % de teor de voláteis; 9,76 % de teor de cinzas; 14,17 % de teor de carbono fixo e PCS de 17,26 MJ/kg. Após carbonização, a palha de carnaúba a 250 °C apresentou 2,38 % de teor de umidade; 49,27 % de teor de voláteis; 17,27 % de teor de cinzas; 31,10 % de teor de carbono fixo e PCS de 17,24 MJ/kg. Para a temperatura de 300 °C apresentou o melhor resultado dentre as demais: 4,54 % de teor de umidade; 44,05 % de teor de voláteis; 15,73 % de teor de cinzas; 35,68 % de teor de carbono fixo e PCS de 20,69 MJ/kg. Considerando a temperatura de 350 °C, obteve-se: 7,75 % de teor de umidade; 37,69 % de teor de voláteis; 19,85 % de teor de cinzas; 34,72 % de teor de carbono fixo e PCS de 17,62 MJ/kg. E à temperatura de 400 °C apresentou: 6,77 % de teor de umidade; 33,00 % de teor de voláteis; 27,10 % de teor de cinzas; 33,13 % de teor de carbono fixo e PCS de 15,60 MJ/kg. Diante disso, observou-se que, de acordo com a forma inicial da biomassa (*in natura* ou carbonizada), ela possui resultados diferentes, sendo necessária sua adequação ao grau de eficiência energética, ou seja, a quantidade de energia gerada.

Palavras-chave: Biomassa. Análise Imediata. Poder Calorífico Superior. Energia.

ABSTRACT

The biomass use as a solid fuel from the carnauba straw has presented a promising potential in the state of Ceará, being this region highlighted in the extractivism of the carnauba (*Copernicia prunifera*). This scientific article aimed to characterize the residual biomass from the carnauba culture, more specifically, carnauba straw both in natura and carbonized. The characterization of the residue was due to the immediate analysis and the High Calorific Power (HCP), which were governed, respectively, by Brazilian standards ABNT NBR 8112 and 8633. The methodology was based on drying the raw biomass *in natura* in a greenhouse at 105°C and then burning it in a muffle oven at different temperatures, 250 °C, 300 °C, 350 °C e 400 °C. This procedure was also used to characterize the carbonized biomass, however, before the start of the process, the biomass *in natura* was carbonized in a muffle furnace at temperatures of 250 °C, 300 °C, 350 °C and 400 °C. By the analyzes it was noticed that the straw of the carnauba *in natura* presented 11,10% of moisture content; 75,77 % of volatile content; 9,76 % of ash content; 14,17 % of fixed carbon content and HCP of 17,26 MJ/kg. After the carbonization, the carnauba straw at 250 °C presented 2,38 % of moisture content; 49,27 % of volatile content; 17,27 % of ash content; 31,10 % of fixed carbon content and HCP of 18,74 MJ/kg. For the temperature of 300 °C the results were better than the others: 4,54 % of moisture content; 44,05 % of volatile content; 15,73 % of ash content; 35,68 % of fixed carbon content and HCP of 20,69 MJ/kg. Considering the temperature of 350 °C, it was obtained: 7,75 % of moisture content; 37,69 % of volatile content; 19,85 % of ash content; 34,72 % of fixed carbon content and HCP of 17,62 MJ/kg. And at 400 °C it presented: 6,77 % of moisture content; 33,00 % of volatile content; 27,10 % of ash content; 33,13 % of fixed carbon content and HCP of 15,60 MJ / kg. Therefore, it was observed that, according to the initial state of the biomass (*in natura* or carbonized), different results are possible, being necessary its adequacy to the degree of efficiency that is desired, that is, the amount of energy generated.

Keywords: Biomass. Immediate Analysis. High Calorific Power. Energy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Mapa de distribuição da carnaúba no Nordeste brasileiro	23
Figura 2	– Diagrama de Van Krevelen para combustíveis sólidos.....	26
Figura 3	– Acondicionamento da palha de carnaúba	33
Figura 4	– Palha de carnaúba após o processo de trituração.....	33
Figura 5	– Analisador elementar.....	34
Figura 6	– Etapas de realização do teste do PCS.....	37
Figura 7	– Carbonização da palha de carnaúba (250 °C, 300 °C, 350 °C e 400 °C).....	39
Figura 8	– Prensa hidráulica a frio.....	40
Figura 9	– Molde utilizado para a confecção dos briquetes.....	40
Figura 10	– Briquete de palha de carnaúba <i>in natura</i>	41
Figura 11	– Briquete de palha de carnaúba carbonizada a 300 °C.....	53
Figura 12	– Briquete formado pela palha de carnaúba carbonizada 300 °C e torta residual de amêndoa de babaçu após extração do óleo.....	53

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Participação de energias renováveis na matriz energética brasileira.....	20
Gráfico 2 – Composição percentual da análise imediata no processo de carbonização ...	48
Gráfico 3 – PCS para a palha de carnaúba carbonizada nas temperaturas (250 °C, 300 °C, 350 °C e 400 °C).....	49
Gráfico 4 – Comparativo da análise imediata da palha de carnaúba e carbonizada a 300 °C.....	50
Gráfico 5 – Comparativo do PCS da palha de carnaúba <i>in natura</i> e carbonizada a 300°C.....	50
Gráfico 6 – Composição da análise imediata do briquete da palha de carnaúba <i>in natura</i>	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Normas técnicas utilizadas como referência para a caracterização da palha de carnaúba.....	32
Tabela 2 – Composição Química Elementar da palha de carnaúba <i>in natura</i>	43
Tabela 3 – Composição Química Elementar da palha de carnaúba na literatura.....	44
Tabela 4 – Resultado da análise imediata e do poder calorífico superior da biomassa <i>in natura</i>	44
Tabela 5 – Resultado da análise imediata e do poder calorífico superior da biomassa carbonizada a 250 °C, 300 °C, 350 °C e 400 °C	47
Tabela 6 – PCS do briquete de palha de carnaúba <i>in natura</i>	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BEM	Balanco Energético Nacional
C	Carbono
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
CQE	Composição Química Elementar
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
kcal	Quilocalorias
kg	Quilogramas
LARBIO	Laboratório de Referência em Biocombustíveis Professor Expedito José de Sá Parente
LTB	Laboratório de Tecnologia de Biomassa
M	Massa Inicial da Biomassa Úmida
M ₂	Massa Seca
M ₃	Massa Final do Teste de Voláteis
M _f	Massa do Cadinho mais resíduo no final do Teste de Cinzas
M _{cad}	Massa do Cadinho
Ma	Massa da amostra inicial
MJ	Megajoule
N	Nitrogênio
NBR	Norma Brasileira
O	Oxigênio
OIE	Oferta Interna de Energia
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCS	Poder Calorífico Superior
T _{cf}	Teor de Carbono Fixo
TC	Teor de Cinzas
TU	Teor de Umidade

TV

Teor de Voláteis

LISTA DE SÍMBOLOS

- % Porcentagem
- °C Grau Celsius
- ® Marca Registrada

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
2 OBJETIVOS	19
2.1 Objetivo Geral	19
2.2 Objetivos Específicos	19
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
3.1 Biomassa como fonte de energia	20
3.2 Aspectos gerais da carnaúba	22
3.3 Caracterização e transformação da biomassa	25
3.3.1 Análise elementar	25
3.3.2 Análise Imediata	26
3.3.2.1 Teor de Umidade	27
3.3.2.2 Teor de Voláteis	27
3.3.2.3 Teor de Cinzas	28
3.3.2.4 Teor de Carbono Fixo	28
3.3.3 Poder Calorífico	29
3.3.4 Processo de densificação	29
3.3.5 Carbonização da biomassa	30
4. MATERIAIS E MÉTODOS	32
4.1 Determinação da Análise Elementar da Biomassa in natura	33
4.2 Determinação da Análise Imediata da Biomassa in natura	34
4.2.1 Determinação do Teor de Umidade	34
4.2.2 Determinação do Teor de Voláteis	35
4.2.3 Determinação do Teor de Cinzas	36
4.2.4 Determinação do Teor de Carbono Fixo	36

4.3 Determinação do Poder Calorífico da Biomassa in natura	36
4.3.1 Poder Calorífico Superior (PCS)	37
4.3.2 Poder Calorífico Inferior (PCI)	37
4.4 Processo de carbonização	38
4.4.1 Análise imediata da biomassa carbonizada	39
4.4.2 Determinação do PCS da biomassa carbonizada	39
4.5 Produção do briquete da biomassa in natura	39
4.5.1 Análise imediata do briquete in natura	41
4.5.2 Determinação do PCS do briquete in natura	41
4.6 Produção dos briquetes carbonizado à 300°C	41
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
5.1 Primeira Seção	43
5.1.1 Análise elementar da biomassa in natura	43
5.1.2 Análise imediata e PCS da biomassa in natura	44
5.1.2.1 Teor de Umidade	44
5.1.2.2 Teor de Voláteis	45
5.1.2.3 Teor de Cinzas	45
5.1.2.4 Teor de Carbono Fixo	46
5.1.2.5 Poder Calorífico	46
5.2 Segunda Seção	46
5.2.1 Análise imediata e PCS da biomassa carbonizada	47
5.3 Terceira Seção	49
5.3.1 Comparação entre a análise imediata e PCS da biomassa in natura e carbonizada a 300 °C	49
5.4 Quarta Seção	51
5.4.1 Briquete in natura	51
5.5 Quinta Seção	52
5.5.1 Briquete Carbonizado à temperatura de 300 °C	52

7. CONCLUSÕES.....	54
8. RECOMENDAÇÕES.....	55
REFERÊNCIAS.....	56

1 INTRODUÇÃO

A biomassa é considerada como uma das fontes de energia renovável com maior potencial de desenvolvimento, e uma das principais opções para diversificar a matriz energética tanto no mercado internacional quanto no interno, bem como reduzir a dependência dos combustíveis derivados do petróleo (ANEEL, 2016).

No ano de 2016, segundo dados do Balanço Energético Nacional (2017), a matriz energética brasileira concentrou o uso em mais de 36,5 % nas fontes derivadas do petróleo, 12,3 % de gás natural, 5,5 % provenientes do carvão mineral e 1,5 % do urânio. O consumo das fontes energéticas renováveis corresponde 43,5 % incluindo a participação de 17,5 % da biomassa proveniente da cana-de-açúcar, 12,6 % hidráulica e incluindo importação de eletricidade oriunda de fonte hidráulica, 8,0 % lenha e carvão vegetal e 5,4 % correspondendo a lixo e outras renováveis.

As fontes alternativas de energia apresentam-se como uma possibilidade cada vez mais promissora, principalmente com a descoberta de novas matérias-primas que podem ser utilizadas com potencial energético. É nesse cenário que a biomassa de origem vegetal ganha função de destaque por apresentar-se como a fonte de energia renovável mais abundante e explorada do planeta (GREENPEACE, 2013).

O Brasil destaca-se nesse contexto, pois possui grandes fontes de biomassa vegetal, tanto a cultivada quanto a resultante de resíduo de processos agroindustriais, florestais e madeireiros. Com isso, possui grande potencial para empregar e desenvolver técnicas para a conversão da biomassa em biocombustíveis (LENÇO, 2010).

A produção e utilização da biomassa vegetal são responsáveis pela geração de uma grande quantidade de resíduos, que na maioria das vezes são depositados inadequadamente no ambiente, ocasionando significativos impactos ambientais, perda de matéria-prima e energia (Ramo; Paula, 2011).

Segundo Nogueira e Lora (2003), a biomassa *in natura* que se pretende empregar em processos de conversão pode apresentar-se de muitas formas, tanto em relação à granulometria quanto ao teor de umidade. Na etapa anterior ao processamento da biomassa são fundamentais a redução de tamanho, densificação ou secagem, ajustando as propriedades e otimizando os processos de conversão subsequente, com o objetivo de convertê-la em combustíveis sólidos.

Ao utilizar a matéria-prima na forma de briquetes, que consiste em um processo de aglomeração de partículas com dimensões inferiores após a trituração dos resíduos e compactação, esse processo tem a vantagem de permitir a redução do volume do resíduo. Em seguida, a caracterização da biomassa deve ser feita, isto é, conhecer suas propriedades físico-químicas, para que haja um melhor aproveitamento energético desse resíduo.

A caracterização da biomassa pode se fundamentar nas propriedades físicas, como granulometria, massa específica, densidade. Na análise imediata que envolve: teor de umidade, voláteis, cinzas e carbono fixo. Na análise elementar, que quantifica os elementos químicos contidos na biomassa, como teor de carbono, teor de hidrogênio, teor de enxofre e teor de oxigênio. Na análise molecular que pesquisa o teor de lignina, celulose e hemicelulose e no poder calorífico superior e inferior que expressa a quantidade de energia que a biomassa libera na forma de calor durante a combustão completa de uma unidade de massa de combustível.

Diante da necessidade de viabilizar outras formas eficientes de aproveitamento da palha da carnaúba excedente do extrativismo e produção artesanal, o presente trabalho teve como objetivo o estudo da contribuição energética da cultura da carnaúba, aproveitando-a na forma *in natura*, carbonizada e de briquetes.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho teve como objetivo principal caracterizar a biomassa residual proveniente da palha da carnaúba tanto na sua forma *in natura* quanto carbonizada, visando à produção de combustíveis sólidos – os briquetes.

2.2 Objetivos Específicos

- ✓ Determinar o Teor de Umidade, Teor de Cinzas, Teor de Voláteis, Teor de Carbono Fixo e Poder Calorífico Superior da palha de carnaúba *in natura*;
- ✓ Realizar a Análise Elementar da palha de carnaúba *in natura*;
- ✓ Realizar os processos de carbonização da palha de carnaúba *in natura* em carvão vegetal;
- ✓ Determinar o Teor de Umidade, Teor de Cinzas, Teor de Voláteis, Teor de Carbono Fixo e Poder Calorífico Superior da palha de carnaúba carbonizada em diversas temperaturas - (250 °C, 300 °C, 350 °C e 400 °C);
- ✓ Produzir briquetes 100% (m/m) da palha de carnaúba *in natura* e carbonizada a 300 °C;
- ✓ Determinar o Teor de Umidade, Teor de Cinzas, Teor de Voláteis, Teor de Carbono Fixo e Poder Calorífico Superior para briquetes formados pela palha de carnaúba *in natura*.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Biomassa como fonte de energia

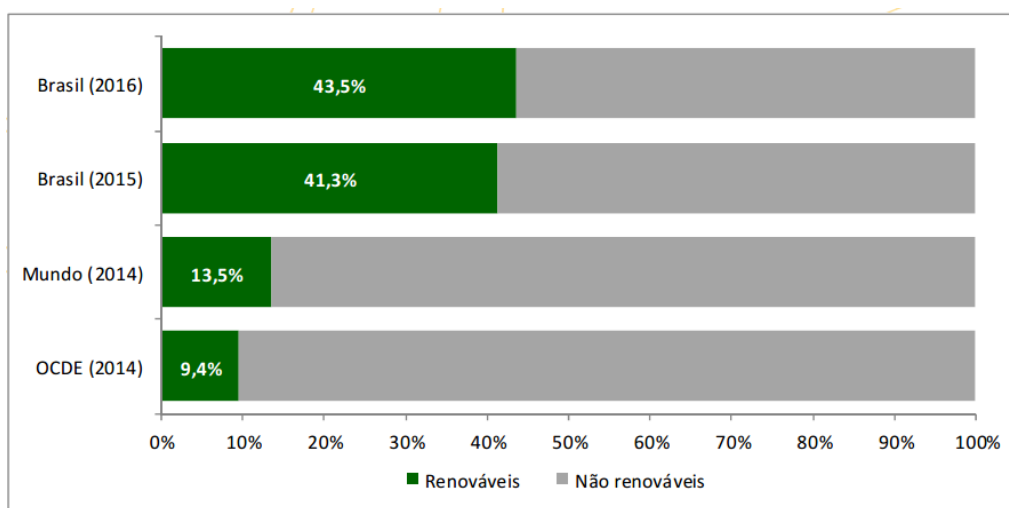
Segundo Oliveira (2013), a biomassa é considerada um recurso renovável, que se define como um agregado de fontes orgânicas de origem vegetal ou animal, susceptíveis de serem utilizadas para produção de energia. Essa energia presente na biomassa vegetal é o resultado da absorção da energia solar pelas plantas, que na fase posterior irão transformar em energia química por meio da fotossíntese.

A utilização da biomassa como fonte de energia é cada vez mais frequente, pois essa é a mais numerosa das energias renováveis e, possui como principal vantagem, a redução de emissões de CO₂. Atualmente, a biomassa vem sendo cada vez mais utilizada na geração de eletricidade, especialmente, em sistemas de cogeração e no suprimento de eletricidade para demandas isoladas da rede elétrica (ANEEL, 2015).

Em 2016, a participação de energias renováveis na Matriz Energética Brasileira manteve-se entre as mais elevadas do mundo, com crescimento devido, particularmente, a queda da oferta interna de petróleo e derivados e expansão da energia hidráulica (BEN, 2017).

No Gráfico 1, está determinada a porcentagem dessa fonte de energia na matriz energética brasileira.

Gráfico 1- Participação de energias renováveis na matriz energética brasileira



Fonte: Balanço Energético Nacional, 2017.

As fontes energéticas oriundas da biomassa são muito heterogêneas, tanto no que diz respeito a sua origem quanto ao nível de estado físico que se encontram. Segundo o Portal Energia (2016), a biomassa pode ser dividida em três classes:

"A biomassa sólida tem como fonte os produtos e resíduos da agricultura (incluindo substâncias vegetais e animais), os resíduos das florestas e a fração biodegradável dos resíduos industriais e urbanos.

A biomassa líquida existe em uma série de bicomustíveis líquidos com potencial de utilização, todos com origem nas chamadas "culturas energéticas". São exemplos o biodiesel, obtido a partir de óleos de colza ou girassol; o etanol, produzido com a fermentação de hidratos de carbono (açúcar, amido, celulose); e o metanol, gerado pela síntese do gás natural.

A biomassa gasosa é encontrada nos efluentes agropecuários provenientes da agroindústria e do meio urbano. É encontrada também nos aterros de RSU (resíduos sólidos urbanos). Estes resíduos são resultado da degradação biológica anaeróbia da matéria orgânica, e são constituídos por uma mistura de metano e gás carbônico. Esses materiais são submetidos à combustão para a geração de energia."

A biomassa sólida vegetal é constituída principalmente de celulose, hemicelulose e lignina, sendo que o teor de celulose varia de 40 a 50%, o teor de hemicelulose de 20 a 40% e o teor de lignina de 25%, por isso a biomassa vegetal é considerada como resíduo lignocelulósico (MARTINI, 2009). Segundo Ramos e Paula (2010), esses resíduos vegetais são descartados em forma de matéria orgânica ou queimados diretamente para a sua eliminação, o que reflete em perdas de matéria-prima e valor energético, acarretando também em poluição ambiental. Assim, a preocupação com a produção e o uso dos resíduos gerados pelo aproveitamento da biomassa, especialmente a biomassa florestal, não pode ser desprezada (VALE; GENTIL, 2008).

A biomassa tem sido empregada de forma crescente no mundo como insumo energético. Para a produção de calor, a tecnologia mais empregada é a combustão, podendo estar aliada diretamente à produção de energia elétrica, por intermédio do emprego de caldeiras e turbinas. A combustão de biomassa associada aos resíduos agroflorestais e agroindustriais, constitui a tecnologia de conversão de biomassa mais utilizada no mundo (CHRISOSTOMO, 2011).

Para serem utilizados e comercializados como bioenergia, os vegetais devem apresentar alto poder calorífico, propriedades favoráveis de combustão como umidade satisfatória, baixo teor de cinzas e um baixo custo de aquisição; os resíduos derivados da colheita, beneficiamento e processamento das *commodities* agrícolas e industriais e o setor

florestal podem ser aproveitados entre os materiais que atendem aos padrões de eficiência energética (COSTA, 2015).

De acordo com Ramos e Paula (2010), uma possibilidade para agregar valor e diminuir os impactos ambientais causados pelos resíduos florestais é sua utilização na produção de combustíveis sólidos. Conforme já mencionado por Quirino (2003), o aproveitamento dos resíduos florestais para fins energéticos possibilita mudanças na matriz energética, expansão na geração de renda, redução dos gases de efeito estufa e diminuição dos volumes de resíduos encaminhados aos aterros sanitários.

Como descrito por Santos (2012), a biomassa vegetal tem provocado grande interesse da comunidade científica, devido principalmente a sua abundância e baixo custo, as possibilidades de melhoria e utilização do seu potencial energético serem muito amplas e promissoras. Dessa forma, o Brasil encontra-se em situação de destaque para o estudo e aproveitamento de biomassa vegetal de maneira aprimorada, por apresentar disponibilidade de matéria-prima vegetal abundante, torna-se, portanto, competitivo para o seu progresso socioeconômico, investir em energia simples e fonte energética não fóssil (PIRES, 2013).

3.2 Aspectos gerais da carnaúba

A carnaubeira, *Copernícia prunifera*, que pertence à família das *Arecaceae*, é uma espécie de palmeira que habita exclusivamente as margens de rios da região semiárida do Nordeste brasileiro, principalmente nos estados do Ceará, Rio Grande do Norte e Piauí, sendo que em algumas localidades dos estados mencionados, é a única forma de atividade de renda durante os períodos de estiagem (DANTAS, 2014). Na Figura 1 está apresentada a disposição dos carnaubais no nordeste brasileiro

Figura 1 - Mapa de distribuição da carnaúba no Nordeste brasileiro



Fonte: (FIEC –Federação das Indústrias do Estado do Ceará, 2009)

Também conhecida como a “árvore da vida”, “aquela que tudo provê”, “ouro verde” é uma árvore resistente a diferentes condições de solo e clima. Essa espécie de palmeira geralmente cresce em solos argilosos e aluviais, o que a condiciona a suportar períodos intensos de alagamento e capacidade de resistir a elevados teores salinos, sendo considerada uma vegetação halófito (DANTAS, 2014).

A carnaúba pode alcançar 7 a 10 metros de altura, podendo atingir até 15 metros. Apresenta resistência ao calor, suportando até 3.000 horas de insolação por ano. Durante esse intervalo de tempo, as folhas da carnaúba evidenciam uma cobertura cerífera que reflete a luz, o que reduz o aquecimento, impedindo a planta de perder água por transpiração e protegendo contra o possível ataque de fungos. As folhas são longas e pecioladas medindo aproximadamente 1,2 metros de comprimento, recobertas parcialmente, principalmente nas bordas, de espinhos rígidos em forma de “unha-de-gato”. Essa parte da carnaubeira é a de maior interesse econômico, por causa da cera de carnaúba, que é um produto importante nas exportações dos estados produtores (MARQUES, 2012).

Como mencionado por Marques (2012), a carnaúba tem aproveitamento total, os seus frutos servem de alimento, o tronco e as folhas são utilizados como material de construção e artesanato e suas raízes possuem propriedades medicinais. A carnaúba é muito conhecida na região Nordeste principalmente por conta do valor do pó cerífero presente em suas folhas, principal matéria-prima para o beneficiamento da cera. No beneficiamento do pó extraído são admitidos dois diferentes tipos de tratamento o artesanal e o industrial. No processamento artesanal produz a cera de origem e quando se utiliza o tratamento industrial

produz a cera refinada. Depois da remoção da cera, o que resta é intitulado de palha de carnaúba ou bagana. Assim como toda fibra vegetal é constituída basicamente de celulose, lignina e hemicelulose.

O Decreto-Lei nº 27.413, de 30.03.2004, instituiu a carnaúba como símbolo do Estado. É protegida por lei e se encontra no brasão do Estado do Ceará. O artigo 2º estabelece que a derrubada e o corte da carnaúba ficam condicionados à autorização dos órgãos e entidades estaduais competentes. Esse Decreto levou em consideração a importância de promover a conservação da biodiversidade, do desenvolvimento sustentável e do reconhecimento do valor histórico, cultural e paisagístico da árvore.

Por tratar-se de uma planta adaptada ao clima semiárido, a carnaúba oferece possibilidades de atividades econômicas mesmo durante o período de estiagem, sendo, portanto, importante alternativa na composição da renda familiar das comunidades rurais (CÂMARA SETORIAL DA CARNAÚBA, 2009).

Vários são os produtos que têm como matéria-prima a carnaúba. As atividades de produção de cera são utilizadas na fabricação de diversos produtos na indústria de polímeros, sendo reconhecida como a melhor cera para esta finalidade. A cera de carnaúba apresenta dureza e alto ponto de fusão variando entre 81 a 86 °C, sendo considerada uma cera dura e que permanece em estado sólido sob altas temperaturas, o que lhe garante alta demanda em aplicações como revestimentos, isolantes e componentes eletrônicos. Por apresentar baixa toxicidade e tolerância para consumo humano, pode ser utilizada em cosméticos, produtos alimentícios e farmacêuticos (D'ALVA, 2004; MARQUES, 2012). Do ponto de vista econômico, a cera é o principal produto extraído da carnaúba.

Segundo Dantas (2014), as folhas das carnaúbas podem ser divididas de acordo com a idade de maturação, sendo as mais novas (ainda fechadas) classificadas como folhas do olho da palmeira e as mais velhas (completamente abertas) denominadas de palha. Elas produzem o “pó do olho” e o “pó de palha”, sendo a primeira mais valorizada por conter menos impurezas, ser mais clara e produzir uma cera de melhor qualidade. Quando a cera da carnaúba é produzida industrialmente, o “pó do olho” e o “pó da palha” são submetidos a um processo de refinamento que envolve etapas de extração, filtração e clareamento.

O uso de resíduos e subprodutos agrícolas e agroindustriais têm se constituído como fonte de alimento para melhorar a eficiência da produção animal no semiárido. Dentre esses produtos a bagana da carnaúba (palha resultante da extração da cera da palha de

carnaúba) está sendo pesquisada, principalmente, pela disponibilidade e volume produzido. Apesar de apresentar limitações devido aos altos teores de fibra e lignina e baixos teores de digestibilidade e de proteína bruta, seu uso como ração animal é uma prática que vem sendo adotada por vários produtores e pode se constituir numa alternativa interessante, principalmente quando enriquecida com uréia animal (MARQUES, 2012).

A bagana de carnaúba também pode ser utilizada como cobertura morta para as áreas de cultivo, pois reduz a variação de temperatura e mantém a umidade do solo, diminui a ocorrência de ervas daninhas na área da cobertura e diminui a mortalidade de plantas jovens (CÂMARA SETORIAL DA CARNAÚBA, 2009).

A palha é um produto da carnaúba que tradicionalmente também tem muita importância no Nordeste brasileiro, principalmente na produção artesanal. É utilizada na fabricação de diversos artesanatos como chapéus, esteiras, capachos, vassouras, bolsas. Por meio do trançado que muitas famílias garantem sua fonte de renda.

3.3 Caracterização e transformação da biomassa

Na fase de pré-processamento da biomassa alguns estágios são fundamentais com o intuito de convertê-la em biocombustíveis sólidos, como: redução do tamanho, densificação, secagem e carbonização, regulando as características e otimizando a eficiência nos processos posteriores. Para transformar um material disperso em outro compacto e homogêneo, uma caracterização da biomassa deve ser feita, ou seja, conhecer suas propriedades, para que haja uma melhor escolha da fração adequada e, conseqüentemente, da tecnologia de conversão. Tais características compreendem as descrições físico-químicas específicas (CORTEZ *et al.*, 2008).

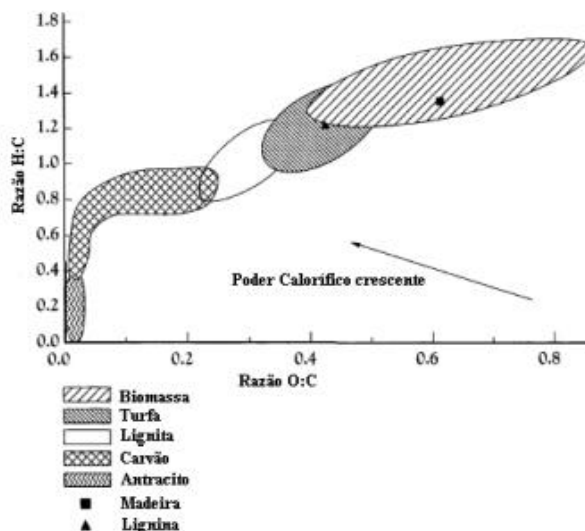
3.3.1 Análise elementar

Pela análise elementar são determinados os teores de carbono (C), hidrogênio (H), oxigênio (O), nitrogênio (N) e enxofre (S) dos materiais, dos quais os elementos de maior contribuição para o poder calorífico são o carbono e o hidrogênio, neste sentido quanto maior

a quantidade destes elementos, mais energético será o material (GENTIL, 2008).

Van Krevelen elaborou um diagrama que compara o poder calorífico dos combustíveis fósseis e biomassa através das relações oxigênio/carbono e hidrogênio/carbono (Figura 2). No eixo das ordenadas mostra a razão molar H/C e no eixo das abscissas a razão O/C.

Figura 2 – Diagrama de Van Krevelen para combustíveis sólidos



Fonte: (MCKENRY, 2002)

3.3.2 Análise Imediata

Esta análise refere-se ao conteúdo percentual, relacionado à massa do material combustível, podendo ser dividida em: teor de umidade, correspondendo à quantidade de água livre presente na biomassa, teor de material volátil, que expressa a capacidade de combustão do material, teor de cinzas, porção remanescente de fração inorgânica após a calcinação e teor de carbono fixo, material resultante após decomposição dos voláteis (PONTE, 2017).

De acordo com Protásio (2014), o entendimento da composição química imediata da biomassa é fundamental para determinar o grau de combustão.

3.3.2.1 Teor de Umidade

O teor de umidade indica a parcela de água existente na biomassa e pode ser expressa tanto na base úmida quanto na base seca. Segundo Nogueira (2003), esse valor pode ser obtido pela diferença entre os pesos de uma amostra antes e logo após ser submetida ao processo de secagem.

Essa parcela de umidade é determinante para outras propriedades como densidade, estabilidade dimensional, resistência e exerce grande influência sobre o poder calorífico com combustível e na densidade energética (SOUZA, 2010). O teor de umidade está relacionado com o desempenho térmico do material, sendo que, quanto maior este, menor será o poder calorífico líquido do combustível. Isso é devido ao fato de que a primeira etapa de um processo de queima é a incineração do material, ou seja, parte da energia é cedida para que ocorra a evaporação da água que difunde do interior da partícula através dos poros, para o ambiente (ALEXANDRE, 2016). Elevados teores de umidade acarretam perdas de energia, baixa ignição e durabilidade, além de um reduzido prazo de estocagem da biomassa (GARCIA, 2010).

3.3.2.2 Teor de Voláteis

Os materiais voláteis estão relacionados com o comportamento do combustível na decomposição, pois determina a facilidade com que a biomassa queima, também interfere na ignição, pois quanto maior o teor de voláteis maior será a reatividade e conseqüentemente a ignição, dessa forma, o conteúdo de voláteis é uma mensuração da reatividade do combustível (GARCIA, 2010, OSHIRO, 2016).

Ainda para McKendry (2002) *apud* Vieira (2012), o material volátil é a fração da biomassa que evapora como um gás (incluindo umidade) por aumento de temperatura, ou seja, o teor de material volátil é mensurado determinando a fração de massa da biomassa que volatiliza durante o aquecimento de uma amostra padronizada e previamente seca, em atmosfera inerte, até temperaturas de aproximadamente 900°C.

Segundo Garcia (2013) *apud* Protásio (2014), a compreensão do teor de materiais voláteis é essencial para o planejamento das fornalhas e das quantidades de ar necessárias ao

bom fluxo dos gases e para o conhecimento da combustão adequada da biomassa nos sistemas de conversão energética.

3.3.2.3 Teor de Cinzas

Garcia (2010) e Dionízio (2017) afirmaram que as cinzas não são desejáveis nos processos industriais e, particularmente, no uso doméstico para o aquecimento residencial, uma vez que elevado valor de cinza da biomassa, representa menor poder calorífico do combustível, assim haverá uma maior quantidade de resíduos a ser removido ao final da combustão. Podendo levar a um aumento da necessidade de manutenção, podendo inviabilizar a utilização deste resíduo como combustível e, conseqüentemente, elevando os custos de produção do combustível.

Para a biomassa florestal o teor de cinzas corresponde à proporção de constituintes minerais contidos na biomassa devido à incorporação no decorrer da vida do vegetal (PONTE, 2017). Essas cinzas são compostas por todo material que não queima, tornando-se resíduo no processo de combustão.

3.3.2.4 Teor de Carbono Fixo

Segundo Pires (2013), o carbono fixo é considerado a maior parcela de fonte energética na biomassa quando aplicada como combustível para a produção de energia durante a combustão, e também proporciona uma queima mais lenta, o que aumenta a durabilidade e rendimento energético do combustível nos fornos.

O teor de carbono fixo também é definido como a quantidade de carbono presente na biomassa (DIONIZIO, 2017), excetuando o carbono nos materiais voláteis. A lignina é o principal componente químico responsável pela presença de carbono fixo na biomassa, que favorece a liberação de energia durante o processo de queima direta (CASTRO, 2011). Segundo Chaves et al., (2013), o teor de carbono fixo tem uma relação direta com o poder calorífico, isto é, quanto maior o teor de carbono fixo maior o conteúdo energético.

3.3.3 Poder Calorífico

O poder calorífico é uma medida termodinâmica importante na avaliação de um combustível sólido e representa a quantidade de calor liberada pela combustão completa de uma unidade de massa de um combustível, expressa em Kcal/kg ou MJ/kg (ÇENGEL, 2006). Na avaliação de combustíveis o poder calorífico pode ser classificado de duas formas: poder calorífico superior e inferior.

O Poder Calorífico Superior (PCS) não leva em consideração as perdas de energia com a evaporação da água presente no combustível (DIONIZIO, 2017), ou seja, ele quantifica a quantidade de calor liberada pela queima de modo que a água proveniente da combustão esteja em estado líquido, isto é, que o calor latente de vaporização da água de constituição seja recuperado (GARCIA, 2010).

O Poder Calorífico Inferior (PCI) é a quantidade de energia interna de um combustível, porém considerando a água no estado de vapor (REIS; SILVA; SILVA; ROCHA, 2002). Segundo Garcia (2010), em processos industriais é mais habitual utilizar o PCI, visto que, na maioria dos ciclos industriais os gases gerados na combustão são liberados a altas temperaturas e a água neles contida se encontra na fase gasosa.

Essa variável está intrinsicamente relacionada ao teor de umidade do combustível. Elevados teores de água na biomassa causam baixo poder calorífico, perdas de energia, baixa ignição, baixa durabilidade e menor tempo de secagem (GARCIA, 2010).

Para resíduos vegetais podem ser adotados como valor típico de PCS, valores variando entre 4.500 a 5.000 Kcal/kg, enquanto que para o PCI que é dependente da umidade, o valor de PCI será de 3000 Kcal/kg (PINHEIRO *et al.*, 2006).

3.3.4 Processo de densificação

Segundo Oliveira Júnior (2013), a densificação da matéria orgânica consiste na compressão desse material, com ou sem adição de ligante, e com ou sem tratamento térmico, de forma a tornar a biomassa mais homogênea e compacta. O aumento da temperatura promove a “plastificação” da lignina, substância que desempenha uma função aglomerante das partículas presente nos materiais lignocelulósicos.

É fundamental destacar que a lignina é um polímero termoplástico sendo, portanto, o principal constituinte que atua como aglomerante das fibras presentes na palha de carnaúba, bem como, quando a biomassa é submetida ao processo de briquetagem (TAVARES; SANTOS, 2013).

As técnicas mais usuais de densificação da biomassa são a produção de *pellets* e briquetes, com o objetivo de reduzir custos de transporte, facilitar o manuseio do combustível e diminuir a área para estocagem.

Os briquetes são considerados lenha ecológica de alta qualidade, produzidos a partir da compactação de resíduos lignocelulósicos, a elevadas pressões, associados ou não à temperatura, possuem formato regular, o que resulta em queima uniforme do material. Fácil manuseio e transporte, baixa umidade, e por possuir maior densidade, tem seu poder calorífico aumentado.

No processo de briquetagem, é fundamental que o teor de umidade esteja entre a faixa de 8 % a 15 % e o tamanho da partícula esteja entre 5 e 10 mm. Uma outra grande vantagem da briquetagem é a possibilidade de aproveitamento de resíduos lignocelulósicos carbonizados em geral, no entanto, na utilização de briquetes de carvão vegetal, usa-se um aglutinante para promover a união das partículas. A seleção do tipo e a quantidade desse aglutinante é o ponto mais decisivo na manufatura dos briquetes, sendo a etapa mais sensível aos custos do processo. O aglutinante não deve prejudicar as propriedades energéticas do carvão vegetal, diminuindo o rendimento calorífico, aumentando o teor de voláteis e cinzas, ou mesmo, ser usado em quantidades que seu gasto inviabilize economicamente o briquete (DIONIZIO, 2017).

A densificação da biomassa ocasionada pela briquetagem produz um combustível com maior poder calorífico, ou seja, maior concentração energética por unidade de volume.

3.3.5 Carbonização da biomassa

Como já mencionado por Vieira (2012), a carbonização da biomassa vegetal resulta em outra fonte de energia renovável, o carvão vegetal, que é muito utilizado no Brasil, principalmente nas indústrias de ferro gusa e até mesmo em residências.

Segundo o Balanço Energético Nacional (BEN) de 2016, o Brasil foi considerado

o maior produtor e consumidor mundial de carvão vegetal, representando 8% na Oferta Interna de Energia (OIE) (EPE, 2016). Este insumo energético é utilizado nas indústrias de cerâmicas, cimenteira, alimentícia e também no setor doméstico, bem como em algumas siderúrgicas brasileiras como redutor. (DIONIZIO, 2017).

O carvão vegetal é um produto concentrado em carbono, com menor teor de voláteis que a biomassa *in natura*. É muito reativo, isto é, reage com gases que contenham oxigênio, sendo um dos principais motivos para seu emprego no setor siderúrgico (MATARELLI *et al.*, 2001). Como exposto por Dionizio (2017), a biomassa mais utilizada para a produção do carvão vegetal é a lenha, no entanto, estudos apontam outras fontes de matéria-prima para a produção como os resíduos agrícolas e florestais.

O carvão vegetal é mais apropriado que a biomassa *in natura* para o processo de produção de energia, visto que há uma maior quantidade de calor gerado. Além disso, como resultado do processo de carbonização, são gerados bio-óleo que possui valor agregado comercial e ambiental (VIEIRA, 2012).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A análise elementar da biomassa *in natura* foi realizada no Laboratório de Tecnologia da Biomassa (LTB), localizada na Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). Os procedimentos, testes e caracterizações da biomassa *in natura* e carbonizada foram realizados no Laboratório de Referência em Biocombustíveis Professor Expedito José de Sá Parente (LARBIO), localizado na Fundação Núcleo de Tecnologia Industrial do Ceará (NUTEC). Os métodos analíticos utilizados encontram-se expostos na Tabela 1.

Tabela 1 – Normas técnicas utilizadas como referência para a caracterização da palha de carnaúba

Parâmetro Analítico	Norma técnica adotada
Teor de Umidade (%)	NBR 8112/1986
Teor de Voláteis (%)	NBR 8112/1986
Teor de Cinzas (%)	NBR 8112/1986
Teor de Carbono Fixo (%)	NBR 8112/1986
Poder Calorífico Superior (MJ/kg)	NBR 8633/1984

Fonte: Autora

A palha de carnaúba utilizada nessa pesquisa foi fornecida em janeiro de 2017 por uma fazenda localizada no município de Morrinhos – CE, região esta que integra o Polígono da Carnaúba e, posteriormente, foi armazenada em sacos de polipropileno à temperatura ambiente, no LARBIO, como mostra na Figura 2.

Figura 3 – Acondicionamento da palha de carnaúba



Fonte: Autora

Para a realização das análises, a palha de carnaúba foi submetida à trituração no liquidificador doméstico (Figura 3) com o objetivo de uniformizar o tamanho das partículas e aumentar a relação superfície/volume.

Figura 4 – Palha de carnaúba após o processo de trituração



Fonte: Autora

4.1 Determinação da Análise Elementar da Biomassa *in natura*

Através da análise elementar foi determinado o teor de carbono, de hidrogênio, de nitrogênio e, por diferença, o teor de oxigênio do material. A palha de carnaúba foi triturada e peneirada, a alíquota usada foi a que passou pela peneira de 60 mesh. Após o peneiramento, o material peneirado foi seco em estufa à temperatura de $(105 \pm 10) ^\circ\text{C}$.

Para a realização do teste, utilizou-se aproximadamente 2 mg da amostra em um porta-amostra de estanho. Posteriormente, o conjunto (amostra + porta-amostra) foi colocado

no carrossel do equipamento da marca Perkin Elmer® modelo EA 2400 Series II. Com auxílio do computador acoplado ao equipamento (Figura 4), as porcentagens dos elementos foram determinadas.

Figura 5 – Analisador elementar



Fonte: http://www.pucrs.br/cepac/index_br.php?p=equipamentos

4.2 Determinação da Análise Imediata da Biomassa *in natura*

A Análise Imediata da biomassa *in natura* foi realizada de acordo com a norma ABNT NBR 8112, com adaptações. Por meio desta análise, determinou-se o Teor de Umidade, Teor de Voláteis, Teor de Cinzas e, por diferença, o Teor de Carbono Fixo. Todos os procedimentos foram realizados em quadruplicatas para garantir maior confiabilidade aos testes. O Teor de Umidade da palha de carnaúba foi determinado em estufa, da marca De Leo. O Teor de Voláteis e Cinzas foram realizados em forno mufla da marca Quimis, modelo 0318M24.

4.2.1 Determinação do Teor de Umidade

As amostras de palha de carnaúba trituradas, contidas em cadinhos de porcelana, foram pesadas e secas em uma estufa a (105 ± 10) °C até que a massa ficasse constante, com o posterior resfriamento em dessecador com sílica em gel. Foram utilizadas, na análise, amostras de 0,50 g em cada cadinho. Após a secagem e resfriamento, as amostras foram

pesadas em uma balança analítica. O procedimento foi repetido até a constância das massas. O teor de umidade foi então determinado através da diferença de peso antes e após a secagem do material.

O Teor de Umidade da palha de carnaúba, em base seca, foi calculado de acordo com a Equação 1 (ABNT NBR 8112, 1986).

$$TU = \frac{M - M_2}{M_2} \times 100 \quad (1)$$

Sendo: TU teor de umidade, em %; M é a massa inicial da biomassa úmida e M₂ a massa seca, após secagem em estufa, ambas em gramas.

4.2.2 Determinação do Teor de Voláteis

Após a secagem da biomassa em estufa, a mesma amostra foi adicionada em um cadinho de platina com tampa e posicionada na porta do forno mufla, previamente aquecida a (900 ± 10) °C, ficando nessa posição durante 3 minutos. Passado esse período, o cadinho foi colocado no interior da mufla a (900 ± 10) °C durante 7 minutos com a porta fechada. Em seguida, o cadinho foi esfriado em dessecador com sílica gel durante 20 minutos. Posteriormente, a amostra foi pesada em balança. Para esta análise foi utilizada aproximadamente 1,0 g da amostra isenta de umidade. O procedimento foi realizado em quadruplicata.

O teor de materiais voláteis foi determinado pela Equação 2 (ABNT NBR 8112, 1986).

$$TV = \frac{M_2 - M_3}{M_2} \times 100 \quad (2)$$

Sendo: TV teor de voláteis, em %; M₂ massa final do teor de umidade em gramas; M₃ massa final em gramas depois da mufla.

4.2.3 Determinação do Teor de Cinzas

Para a determinação do teor de cinzas foi utilizado aproximadamente 5,0 g da amostra. As amostras de biomassa foram então adicionadas em quatro cadinhos de porcelana, previamente secos e tarados e levadas ao forno mufla. Após atingir (525 ± 10) °C, as amostras ficaram no interior da mufla por um período de 4 horas. Em seguida, os cadinhos foram esfriados em dessecador com sílica gel aproximadamente por 40 minutos.

O teor de cinzas foi determinado pela Equação 3 (ABNT NBR 8112, 1986).

$$TC = \frac{M_f - M_{cad}}{M_a} \quad (3)$$

Sendo: TC teor de cinzas, em %; M_f massa do cadinho mais o resíduo final das cinzas em gramas; M_{cad} massa do cadinho em gramas; M_a massa da amostra inicial em gramas.

4.2.4 Determinação do Teor de Carbono Fixo

Esse teor refere-se à porção de carvão após o aquecimento da amostra. Segundo a NBR 8112, o teor de carbono fixo é calculado subtraindo-se de 100% a soma dos teores de materiais voláteis, cinzas e umidade, de acordo com a Equação 4.

$$T_{CF} = 100 - (TU + TV + TC) \quad (4)$$

Sendo: T_{CF} teor de carbono fixo, em %; TU teor de umidade, em %; TV teor de voláteis, em %; TC teor de cinzas.

4.3 Determinação do Poder Calorífico da Biomassa In Natura

A seguir, será diferenciado o Poder Calorífico Superior e o Poder Calorífico Inferior.

4.3.1 Poder Calorífico Superior (PCS)

A análise do poder calorífico superior da biomassa *in natura* foi realizada de acordo com a norma ABNT NBR 8633.

Para a realização dessas análises, utilizou-se 0,5 g da biomassa em cada teste. Foi utilizada uma bomba calorimétrica modelo C-200 da marca IKA, como mostra a Figura 5, com o objetivo de quantificar o valor de energia liberada na forma de calor em uma combustão completa de amostra.

Figura 6 – Etapas de realização do teste do PCS



Fonte: Autora

4.3.2 Poder Calorífico Inferior (PCI)

O poder calorífico inferior pode ser calculado algebricamente segundo a Equação 5 (KOLLMANN, 1968).

$$PCI = PCS - \left(\frac{600 \times 9 \times H}{100} \right) \quad (5)$$

Sendo: PCI poder calorífico inferior, em Kcal/Kg; PCS poder calorífico superior, em Kcal/Kg; H teor de hidrogênio, em %.

Uma outra forma de calcular o poder calorífico inferior é através do teor de carbono (Equação 6) (KOLLMANN, 1968).

$$PCI = 84,2xC \quad (6)$$

Sendo: PCI poder calorífico inferior, em Kcal/Kg e C teor de carbono, em %.

4.4 Processo de carbonização

Segundo Rezende (2006), o processo de carbonização ocorre em quatro etapas:

Fase I: Secagem (ocorre até 110 °C) quando apenas a umidade é liberada;

Fase II: Torrefação (ocorre entre 110 e 250 °C), na temperatura de 180 °C tem início a liberação de água de constituição pela decomposição da celulose e hemicelulose e pouco peso é perdido até 250 °C.

Fase III: Carbonização (ocorre entre 250 e 350 °C) com a intensificação da decomposição da celulose e hemicelulose. Ocorre expressiva perda de peso, formando-se gás, óleo e água. Ao atingir a temperatura de 350 °C a carbonização está praticamente pronta.

Fase IV: Fixação dos 350 °C em diante ocorre a redução gradual na liberação dos voláteis.

Esta etapa consistiu na queima da palha de carnaúba em forno mufla a diferentes temperaturas (250 °C, 300 °C, 350 °C e 400 °C ± 10 °C). Os cadinhos foram então colocados no interior da mufla, ainda à temperatura ambiente, de forma que ficassem em uma disposição centralizada tanto com relação à porta, quanto com relação ao fundo e as laterais do equipamento, de forma a garantir que toda a amostra fosse carbonizada de maneira uniforme.

Ao atingir a temperatura programada, esperou-se por um período de 15 minutos para assegurar que a amostra carbonizasse na temperatura desejada pelo tempo que foi estabelecido. Em seguida, desligou-se a mufla e os cadinhos só foram retirados quando a temperatura atingiu uma média inferior a 40 °C (Figura 6), temperatura que assegura a abertura do forno e retirada do carvão vegetal sem riscos de incêndio. Após esse processo, os cadinhos foram colocados em um dessecador com sílica em gel e, posteriormente, pesados sua nova massa para iniciar a análise imediata e o poder calorífico superior da biomassa carbonizada.

Figura 7 – Carbonização da palha de carnaúba (250 °C, 300 °C, 350 °C e 400 °C)



Fonte: Autora

4.4.1 Análise imediata da biomassa carbonizada

A análise imediata da biomassa carbonizada (teor de umidade, teor de voláteis, teor de cinzas e teor de carbono fixo) seguiu o mesmo princípio da análise imediata realizada para a biomassa *in natura*.

4.4.2 Determinação do PCS da biomassa carbonizada

Nessa análise, com a biomassa carbonizada, pesando-se 0,50 g, aproximadamente, colocou-se na bomba calorimétrica modelo C-200 para verificar a quantidade de calor liberada pela amostra.

4.5 Produção do briquete da biomassa *in natura*

Inicialmente, foi utilizada a biomassa *in natura*, visto que possuía um valor adequado de umidade, em torno de 11,10 %. Com o auxílio de uma balança de precisão, pesou-se aproximadamente 6,50 g da palha de carnaúba. Em seguida, realizou-se a prensagem da biomassa em uma prensa hidráulica a frio, a Figura 7, da marca Marconi, modelo MPH15, fabricado em aço, com cilindro de pressão máxima de 15 toneladas. Na Figura 8, o molde utilizado possuía 5,0 cm de diâmetro e 14 cm de altura.

Figura 8 – Prensa hidráulica a frio



Fonte: Autora

Figura 9 – Molde utilizado para a confecção dos briquetes

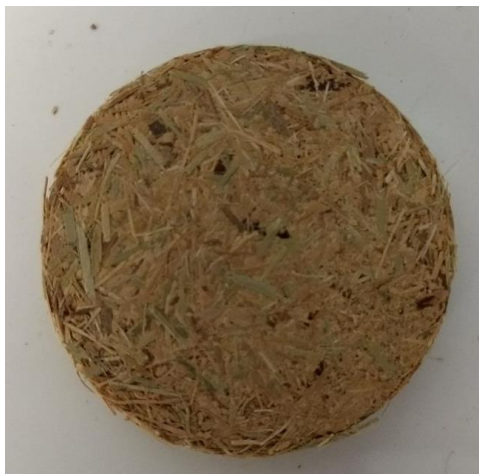


Fonte: Autora

A pressão empregada na produção dos briquetes foi de 7,5 toneladas. É importante destacar que o briquete foi mantido à pressão constante por 5 minutos durante o processo de prensagem, com o objetivo de promover a agregação das fibras formadas pela palha da

carnaúba. Após esse período, aliviou-se a pressão por igual intervalo de tempo e retirou-se o briquete do molde, conforme visto na Figura 9.

Figura 10 – Briquete de palha de carnaúba *in natura*



Fonte: Autora

4.5.1 Análise imediata do briquete in natura

A análise imediata dos briquetes *in natura* (teor de umidade, teor de voláteis, teor de cinzas e teor de carbono fixo) seguiu o mesmo princípio da análise imediata realizada para a biomassa *in natura*.

4.5.2 Determinação do PCS do briquete in natura

Nessa análise utilizou-se uma porção do briquete *in natura*, pesando 0,50 g aproximadamente, e colocou-se em seguida na bomba calorimétrica para verificar a quantidade de calor liberada pela amostra.

4.6 Produção dos briquetes carbonizado a 300°C

Nessa fase, utilizou-se a biomassa carbonizada à temperatura 300 °C, pois dentre as demais foi a que apresentou um valor mais elevado de PCS (20,69 MJ/kg) e menor valor de teor de cinzas (15,73%).

Seguiu-se a mesma metodologia da produção de briquetes *in natura*. Com o auxílio de uma balança de precisão, pesou-se aproximadamente 6,50 g da biomassa carbonizada. Em seguida, realizou-se a prensagem do material na mesma prensa hidráulica utilizada anteriormente. Durante a execução foi submetida à mesma pressão anterior para a confecção dos briquetes, 7,5 toneladas. Durante a prensagem, no intervalo de tempo de 5 minutos, a pressão permaneceu constante. Após esse período, aliviou-se a pressão por igual intervalo de tempo e retirou-se o briquete do molde. Também foi realizado um teste com o mesmo valor de pressão, no entanto, mantendo esse parâmetro constante. E, por fim, repetiu-se o procedimento anterior utilizando-se 12 toneladas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a melhor compreensão, os resultados foram divididos em cinco seções sendo a primeira parte resultante da análise elementar, análise imediata e PCS da biomassa *in natura*; a segunda parte referente à análise imediata e PCS da biomassa carbonizada a 250 °C, 300 °C, 350 °C e 400 °C; a terceira parte relativa à comparação da biomassa *in natura* e carbonizada à temperatura de 300 °C; a quarta parte relacionada à formação de briquetes *in natura* e a quinta parte pertinente à formação de briquete carbonizado a 300°C.

5.1 Primeira Seção

Nessa etapa foram discutidas a análise elementar, a análise imediata e o PCS da palha de carnaúba *in natura*.

5.1.1 Análise elementar da biomassa *in natura*

Esta análise forneceu resultados referentes à composição química elementar da biomassa isolada em percentuais de carbono (C), hidrogênio (H), nitrogênio (N), enxofre (S) e oxigênio (O). Na Tabela 2 estão dispostos os principais resultados.

Tabela 2- Composição Química Elementar (CQE) da palha de carnaúba *in natura*

Biomassa	Carbono (%)	Hidrogênio (%)	Nitrogênio (%)	Enxofre (%)	Oxigênio*
Palha de carnaúba	44,43	5,34	2,25	1,81	36,41

Fonte: Autora

*calculado a partir da Equação 7

O teor de oxigênio foi calculado a partir da Equação 7 (PROTASIO *et al.*, 2013a)

$$\% O = 100 - (\% C) - (\% H) - (\% N) - (\% S) \quad (7)$$

Tabela 3 - Composição Química Elementar (CQE) da palha de carnaúba na literatura

Biomassa	Carbono (%)	Hidrogênio (%)	Nitrogênio (%)	Lignina (%)	Celulose (%)	Sílica (%)
Palha de carnaúba	40,40	5,61	1,72	20,33	10,38	14,42

Fonte: (TAVARES; SANTOS, 2013)

Os resultados dispostos estão em conformidade com os aportados por Tavares e Santos (2013).

Para Paula (2010), a presença de enxofre em combustíveis é indesejável, devido a problemas de corrosão e liberação de SO₂ após a combustão. Quanto aos teores de nitrogênio, segundo Dionízio (2017) *apud* Munalula e Meincken (2009), altos teores de nitrogênio podem estar relacionados aos impactos ambientais e poluição do ar, em função da formação de óxidos de nitrogênio tóxicos e ácido nítrico.

5.1.2 Análise imediata e PCS da biomassa *in natura*

Esta análise forneceu resultados referentes ao Teor de Umidade, Teor de Voláteis, Teor de Cinzas, Teor de Carbono Fixo e o Poder Calorífico Superior da palha de carnaúba. Na Tabela 4 encontram-se os resultados obtidos a partir da média das quatro repetições.

Tabela 4 - Resultado da análise imediata e poder calorífico superior da biomassa *in natura*

	Teor de Umidade (%)	Teor de Voláteis (%)	Teor de Cinzas (%)	Teor de Carbono Fixo (%)	PCS (MJ/kg)
Média	11,10 ± 0,96	75,77 ± 0,47	9,76 ± 1,11	14,17 ± 0,45	17,26 ± 0,03

Fonte: Autora

5.1.2.1 Teor de Umidade

O teor de umidade encontrado neste trabalho encontra-se em conformidade aos reportados por Tavares e Santos (2013), o qual diz que a umidade encontrada na palha de carnaúba foi de 9,98%. Segundo dados expostos por Farinhaque (1981), o valor da umidade

não deve ultrapassar 20 %, pois amostras com elevados valores de umidade necessita de uma maior quantidade de energia para dá início ao processo de combustão, pois mais energia seria requerida para vaporizar a água presente na amostra, além de poder gerar maior poluição ambiental devido ao aumento do volume dos produtos de combustão e material particulado.

Para Dionizio (2017), o teor de umidade influencia também no tempo de armazenagem da biomassa, visto que, a presença de água promove a proliferação de organismos decompositores da matéria orgânica, na qual compromete a utilização da biomassa para fins energéticos.

5.1.2.2 Teor de Voláteis

Ainda segundo Tavares e Santos (2013), o teor de voláteis presentes na palha de carnaúba é de 89,42%. Encontrou-se um valor médio de 75,77 %, próximo ao valor mencionado em literatura.

Os materiais voláteis são os componentes emitidos no início da combustão, sendo composto principalmente por hidrogênio, hidrocarbonetos, monóxido de carbono (CO) e dióxido de carbono (CO₂) (SANTOS, 2012). Conforme mencionado por Costa (2015), quanto maior a porcentagem desse componente na biomassa, maior será a facilidade de queima. Ainda segundo Vieira (2012), os voláteis são as substâncias que se desprendem do material combustível na forma de gases durante a queima da amostra, essa característica indica que quando a matéria for submetida em processos termodinâmicos irão ser consumidos rapidamente.

5.1.2.3 Teor de Cinzas

O teor de cinzas encontrado na palha de carnaúba foi de 9,76% aproximando-se do valor presente no trabalho de Tavares e Santos (2013), o qual reporta que o teor de cinzas encontrada na palha de carnaúba foi de 9,74%. Nas pesquisas realizadas por Marques (2012), encontrou-se 3,85% para o pó da palha de carnaúba, composto por microfibrilas de celulose dispersas em uma matriz amorfa de lignina e hemicelulose.

Como mencionado por Hoffmann (2010) um elevado teor de cinzas leva a uma diminuição da eficiência devido ao aumento do consumo de oxigênio para derreter as cinzas e

pela perda de calor com a saída das cinzas do reator, que não pode ser plenamente recuperado. Para a gaseificação, o menor teor de cinzas inibe o entupimento e incrustações por escórias nos equipamentos.

É importante o controle das cinzas em qualquer processo termodinâmico, pois interfere diretamente no poder calorífico provocando perda de energia, alterando também a transferência de calor.

5.1.2.4 Teor de Carbono Fixo

O percentual de carbono fixo presente em uma amostra demonstra a quantidade de calor gerado, sendo que quanto mais elevado for este percentual mais lentamente o combustível irá queimar (VIEIRA, 2012).

Segundo Tavares e Santos (2013), o teor de carbono fixo presente na palha de carnaúba é de 0,89%. Esse resultado diferiu do encontrado no presente trabalho, possivelmente pode ser explicado que a palha de carnaúba ser oriunda de regiões diferentes, consequentemente de solos distintos, o que interfere na composição química e consequentemente nos resultados obtidos.

5.1.2.5 Poder Calorífico

A palha de carnaúba, segundo Tavares e Santos (2013), apresentou um poder calorífico superior (PCS) de 17,78 MJ/kg e para Ferreira *et al.*, (2012), 20,35 MJ/kg. Neste estudo, como pode ser visto na Tabela 4, o PCS teve um valor médio de 17,26 MJ/kg, estando próximo aos valores encontrados na literatura.

Como mencionado anteriormente, o PCS é definido como a quantidade de energia liberada durante a transferência de calor, desse modo quanto mais energia é liberada, melhor a eficiência do processo.

De acordo com a Equação 5, o PCI da palha de carnaúba *in natura* foi 15,63 MJ/kg.

5.2 Segunda Seção

Nesta etapa, foram determinadas a análise imediata e o PCS da palha de carnaúba carbonizada a diferentes temperaturas.

5.2.1 Análise imediata e PCS da biomassa carbonizada

Esta análise forneceu resultados referentes ao Teor de Umidade, Teor de Voláteis, Teor de Cinzas, Teor de Carbono Fixo e o Poder Calorífico Superior da palha de carnaúba a diferentes temperaturas de carbonização. Na Tabela 5 verifica-se a média das quatro repetições da análise imediata e do poder calorífico superior para as temperaturas de 250 °C, 300 °C, 350 °C e 400 °C.

Tabela 5 - Resultado da análise imediata e poder calorífico superior da biomassa carbonizada a 250 °C, 300 °C, 350 °C e 400 °C

	Teor de Umidade (%)	Teor de Voláteis (%)	Teor de Cinzas (%)	Teor de Carbono Fixo (%)	PCS (MJ/kg)
Palha de carnaúba carbonizada a 250 °C	2,38 ± 0,38	49,27 ± 0,58	17,27 ± 1,39	31,10 ± 0,46	17,24 ± 0,06
Palha de carnaúba carbonizada a 300 °C	4,54 ± 0,47	44,05 ± 0,64	15,73 ± 1,12	35,68 ± 0,36	20,69 ± 0,11
Palha de carnaúba carbonizada a 350 °C	7,75 ± 0,43	37,69 ± 0,67	19,85 ± 1,35	34,72 ± 0,39	17,62 ± 0,16
Palha de carnaúba carbonizada a 400 °C	6,77 ± 0,93	33,00 ± 1,64	27,10 ± 0,64	33,13 ± 0,65	15,60 ± 0,10

Fonte: Autora

O teor de umidade sofre influência das mesmas considerações citadas para a palha de carnaúba *in natura* já mencionadas na revisão bibliográfica desta pesquisa. Um elevado

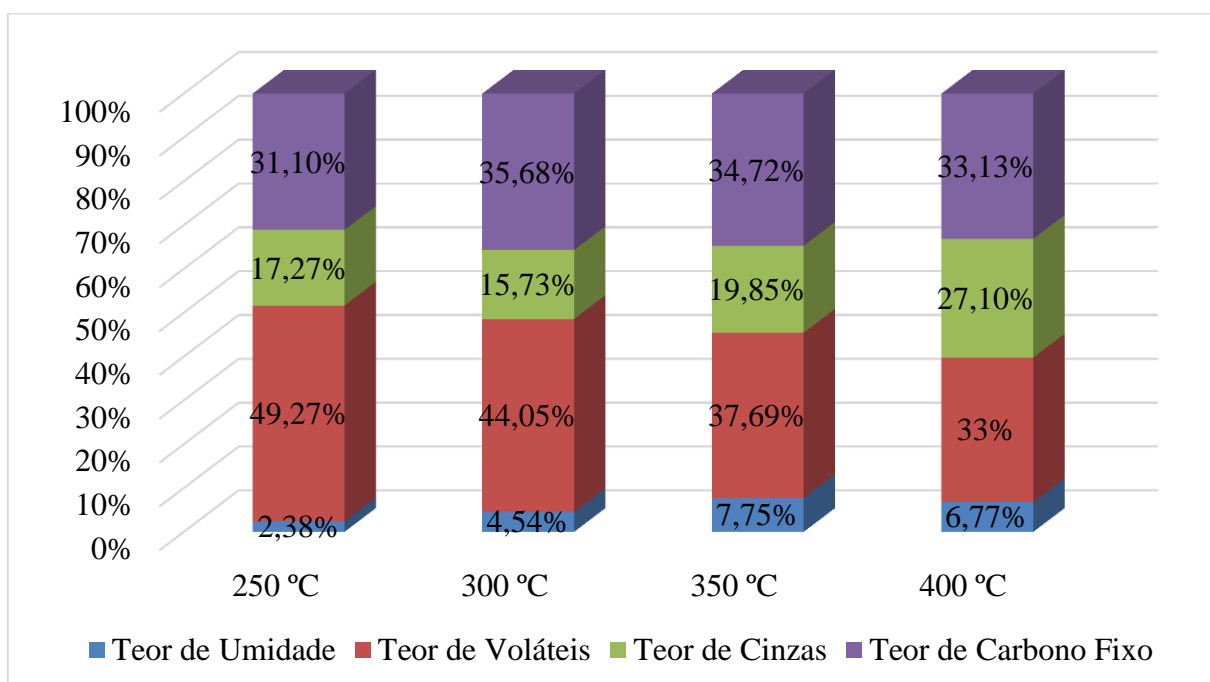
teor de umidade na amostra carbonizada influencia negativamente a eficiência do processo de combustão e o poder calorífico do carvão vegetal (Gráfico 3).

Para o aproveitamento energético, o teor de voláteis deve ser baixo, pois somente nessas condições o carvão vegetal queimará mais lentamente, tendo um melhor aproveitamento do produto.

A influência da quantidade de cinzas na palha de carnaúba carbonizada é a mesma exercida na *in natura*, a qual já foi citada.

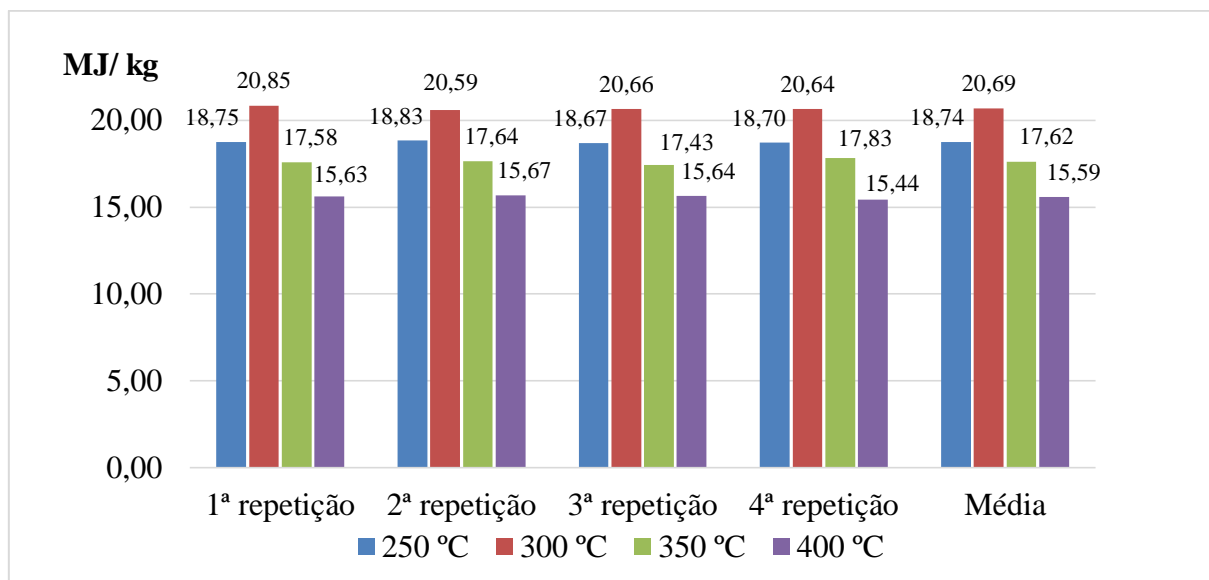
Como já mencionado, quanto maior o teor de carbono fixo maior o PCS da amostra, pois ele é o responsável pela geração de gás (Gráfico 2).

Gráfico 2 – Composição percentual da análise imediata no processo de carbonização



Fonte: Autora

Gráfico 3 – PCS para a palha de carnaúba carbonizada nas temperaturas (250 °C, 300 °C, 350 °C e 400 °C)



Fonte: Autora

5.3 Terceira Seção

A seguir, foram comparadas as propriedades da palha de carnaúba *in natura* e carbonizada.

5.3.1 Comparação entre a análise imediata e PCS da biomassa *in natura* e carbonizada a 300 °C

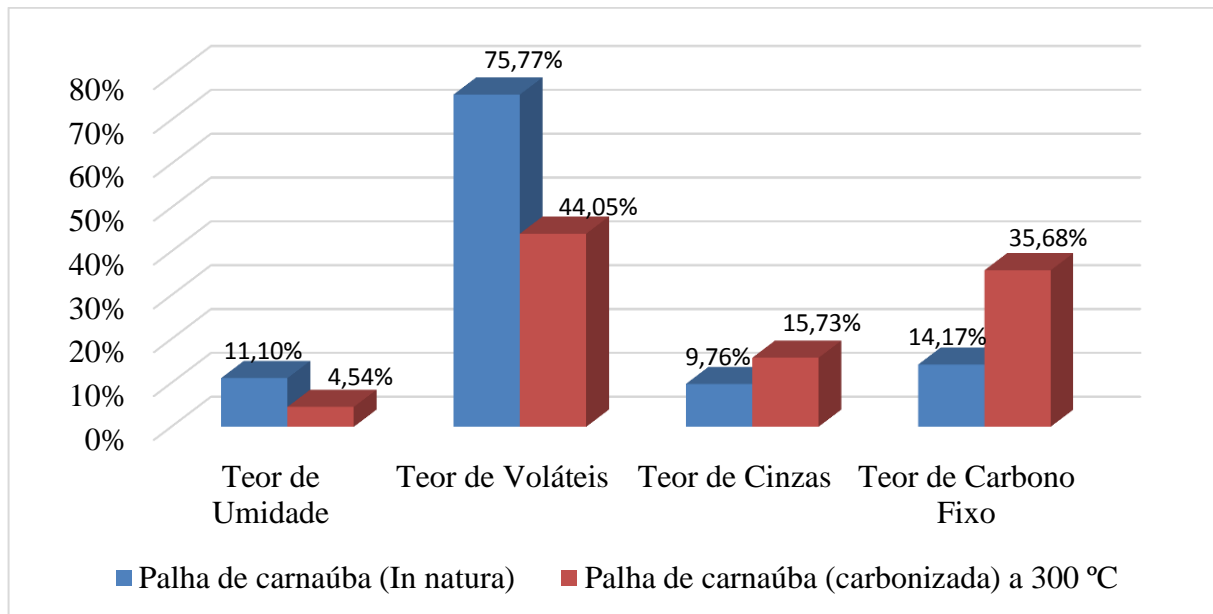
O carvão vegetal apresenta características distintas da biomassa *in natura*. Como mencionado por Prótasio *et al.* (2012), a principal vantagem do processo de carbonização é a concentração de carbono no combustível para a utilização em siderúrgicas como agente de dupla finalidade (redução do minério de ferro e fornecimento de energia para o alto forno).

Como visto no Gráfico 4, segundo Protásio *et al.* (2012), o teor de cinzas e o teor de carbono fixo na biomassa carbonizada é maior que na biomassa *in natura* como consequência do processo de pirólise. Segundo Assis (2008), no carvão vegetal, o teor de carbono fixo depende do teor de lignina na biomassa, pois esse componente químico é o principal responsável pela presença dessa quantidade de carbono, consequentemente, a liberação de energia durante o processo de queima direta.

Como observado no Gráfico 4 e Gráfico 5 e mencionado por Chaves *et al.* (2013) e Dionízio (2017), o processo de carbonização proporciona uma maior concentração de

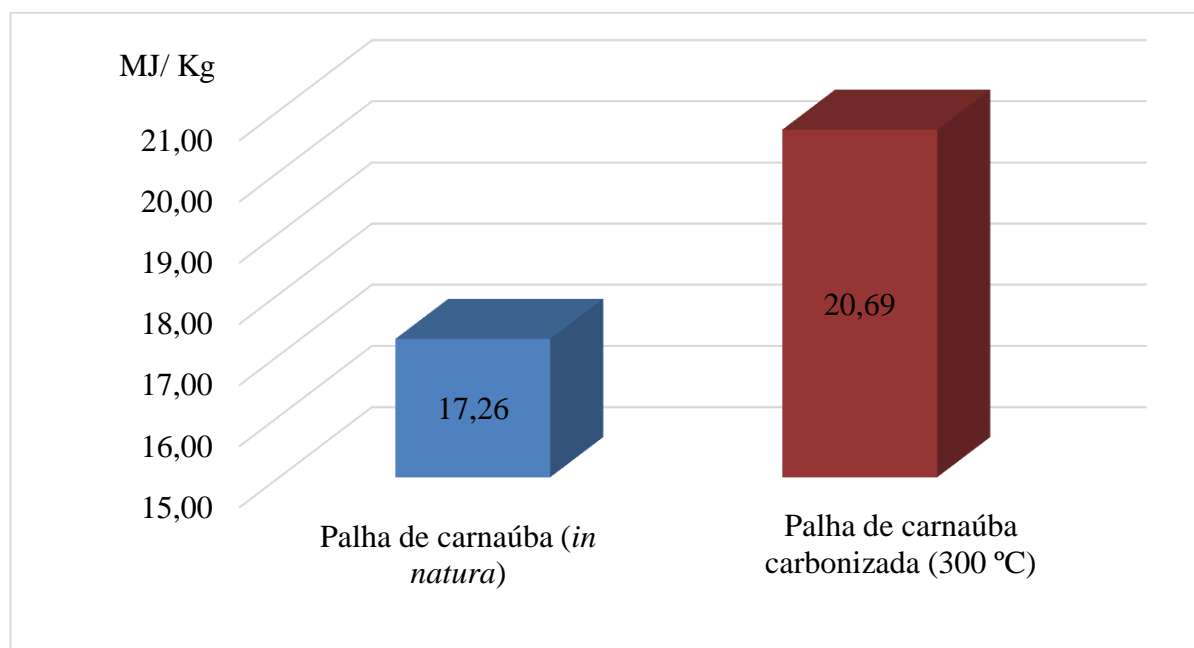
carbono e diminui a quantidade de oxigênio e hidrogênio devido à perda de massa ocasionada pelo tratamento térmico, quando comparado com a biomassa *in natura*. No entanto, a perda de matéria é compensada pelo ganho energético em carbono, por conseguinte, aumento do PCS, como observado na carbonização à temperatura de 300 °C.

Gráfico 4 – Comparativo da análise imediata da palha de carnaúba *in natura* e carbonizada a 300 °C



Fonte: Autora

Gráfico 5 – Comparativo do PCS da palha de carnaúba *in natura* e carbonizada a 300 °C



Fonte: Autora

5.4 Quarta Seção

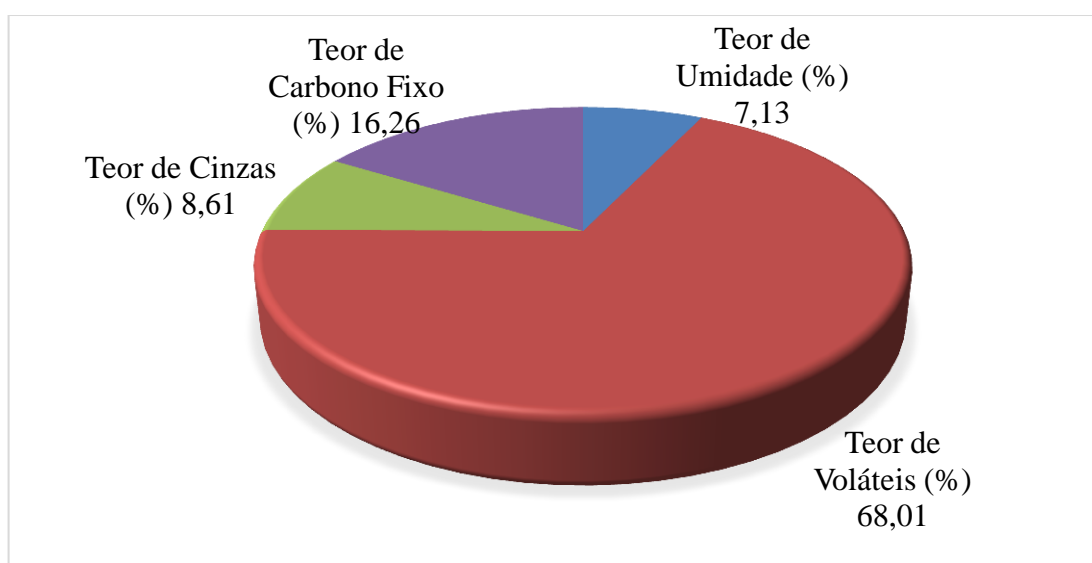
Nesta seção, foi analisada a influência das propriedades no briquete de palha de carnaúba.

5.4.1 Briquete *in natura*

Segundo Protásio *et al.* (2012), o briquete é convertido em um combustível com maior poder calorífico, menor teor de materiais voláteis, menor teor de cinzas, maior teor de carbono fixo e baixa umidade.

No Gráfico 6 está representada a composição do briquete da palha de carnaúba *in natura*. Embora o teor de umidade, o teor de cinzas e o teor de voláteis tenha um resultado menor que o da palha de carnaúba *in natura*, o PCS, como mostrado na Tabela 9, não foi superior, isso pode ser justificado pela absorção de água ao longo do tempo, visto que, as condições do ambiente na qual a amostra foi acondicionada pode interferir nas propriedades finais.

Gráfico 6 – Composição da análise imediata do briquete da palha de carnaúba *in natura*



Fonte: Autora

Tabela 6 – PCS do briquete de palha de carnaúba *in natura*

	PCS (MJ/kg)
Briquete da palha de carnaúba <i>in natura</i>	16,92 ± 0,15

Fonte: Autora

Conforme mencionado em estudos por Tavares e Santos (2012), o briquete composto 100 % de palha de carnaúba obteve 18,37 MJ/kg de Poder Calorífico Superior, próximo aos valores encontrados nesta pesquisa (16,92%) e no trabalho de Paula (2010), que analisou o bagaço e a palha da cana-de-açúcar e encontrou 16,11 MJ/kg e 16,33 MJ/kg de PCS, respectivamente.

5.5 Quinta Seção

Nesta seção foi analisada a formação do briquete a partir da palha de carnaúba carbonizada a 300 °C.

5.5.1 Briquete Carbonizado à temperatura de 300 °C

Em processos que utilizam na produção de briquetes somente o carvão vegetal, por exemplo, é necessária a utilização de um aglomerante artificial, pois, neste caso, parte da lignina foi degradada, reduzindo sua propriedade de plasticidade e não fazendo o papel de aglomerante. Com o decorrer do tempo, com o surgimento de rachaduras internas, o briquete desintegra facilmente, como observado na Figura 10, pois não apresenta uma agregação das fibras nas paredes laterais.

Figura 11 – Briquete de palha de carnaúba carbonizado a 300 °C



Fonte: Autora

A falta de sustentação do briquete carbonizado propõe o estudo e o desenvolvimento de novas fontes que podem ser utilizadas como agentes aglomerantes desse combustível sólido. A princípio foi verificada a mistura dessa biomassa com a torta residual de amêndoa do babaçu após extração do óleo, como mostrado na Figura 11.

Figura 12 – Briquete formado pela palha de carnaúba carbonizada a 300 °C e torta residual de amêndoa do babaçu após a extração do óleo



Fonte: Autora

Como pode ser verificado, o briquete formado apresenta maior resistência física quando comparado ao anterior, inferindo que, após os testes de análise imediata e poder calorífico superior, apresentará propriedades melhores o qual pode viabilizar seu uso como combustível sólido.

7. CONCLUSÕES

A palha de carnaúba *in natura*, objeto de estudo desse trabalho, foi caracterizada com base nos ensaios para determinação de análise imediata e PCS. Os valores resultantes apresentaram quantitativamente as parcelas que estão relacionadas diretamente no aproveitamento da energia gerada na combustão dessa biomassa vegetal.

Entre a biomassa *in natura* e carbonizada, o carvão vegetal tem uma maior vantagem em ser utilizado para fins energéticos devido a maior quantidade de calor gerado na combustão completa. Dentre as temperaturas avaliadas, os ensaios realizados para a temperatura de 300 °C para a palha de carnaúba carbonizada foi a que apresentou melhores resultados para a análise de carbono fixo e poder calorífico.

Além disso, foi possível a produção de briquetes de palha de carnaúba *in natura* e carbonizada através do processo de compactação, sem aquecimento. O briquete formado a partir da biomassa *in natura* resultou em um menor teor de umidade, menor teor de voláteis e um menor teor de cinzas, no entanto, teve um valor muito próximo do PCS da palha de carnaúba triturada, sofrendo influências da umidade presente no meio. Contudo, ao compactar a biomassa carbonizada sugeriu-se a utilização de um agente aglomerante, pois parte da lignina foi degradada com o aumento de temperatura.

8. RECOMENDAÇÕES

Visando uma melhor explicação dos resultados obtidos nesta pesquisa, recomenda-se realizar:

- (i) ensaios mecânicos como o de friabilidade, pois informa o quanto o material se desgasta quando submetido a vibrações mecânicas;
- (ii) ensaios mecânicos de resistência à tração por compressão diametral;
- (iii) ensaio de análise imediata e poder calorífico superior do briquete formado pela blenda da palha de carnaúba carbonizada a 300 °C e torta residual de amêndoa do babaçu após a extração do óleo;
- (iv) testes com outros aglutinantes produzidos a partir de resíduos agrícolas na produção de briquetes de carvão vegetal.

REFERÊNCIAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Carvão Vegetal – Determinação do poder calorífico**. Método de ensaio. 01.040 – NBR 8633 OUT/1984. Origem: ABNT 1:21.01-002/84. CB-1 – Comitê Brasileiro de Mineração e Metalurgia. CE-1:21.01-Comissão de Estudo de Carvão Vegetal, 13p.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Carvão Vegetal – Análise imediata**. Método de ensaio. 01.040 – NBR 8112 OUT/1986. Origem: MB-1857/86. CB-1 – Comitê Brasileiro de Mineração e Metalurgia. CE-1:21.01-Comissão de Estudo de Carvão Vegetal, 5p.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas_par2_cap4.pdf>. Acesso em: 08 out. 2017.
- ALEXANDRE, L. H. Z. **Combustível ecológico a partir de resíduos de biomassa e rejeitos de carvão mineral**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Química) – Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2016.
- ASSIS, C. F. C. **Caracterização de carvão vegetal para sua injeção em altos-fornos a carvão de pequeno porte**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) **Análise química imediata do carvão vegetal**, NBR 8112. 1986.
- CÂMARA SETORIAL DA CARNAÚBA. **A Carnaúba – preservação e sustentabilidade** – Fortaleza-CE: Câmara setorial da carnaúba, 2009.
- CASTRO, A. F. N. M. **Efeito da idade e de materiais genéticos de *Eucalyptus* na madeira e carvão vegetal**. 2011. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.
- CEARÁ. DECRETO Nº 27.413, DE 30 DE MARÇO DE 2004. Reconhecimento do valor histórico, cultural e paisagístico da árvore denominada Carnaúba.
- CHAVES, A. M. B.; VALE, A. T.; MELIDO, R. C. N; ZOCH, V. P. **Característica energética da madeira e carvão vegetal de clones de *Eucalyptus* spp**. Enciclopédia Biosfera, v.9, n.17; p.533-542. 2013.

- CHRISOSTOMO, W. **Estudo da compactação de resíduos lignocelulósicos para utilização como combustível sólido**. 2011. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais)– Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2011.
- CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. **Biomassa para energia**. 3. ed. Campinas: Editora da UNICAMP, 2008.
- COSTA, T. G. **Estudo do potencial energético de briquetes produzidos a partir de resíduos de madeira**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.
- ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Termodinâmica**. 7. ed. 2013
- D’ALVA, O. A. **O extrativismo da carnaúba no Ceará**. 2004. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2004.
- DANTAS, A. N. S. **Estudo de novos parâmetros para aprimoramento do controle de qualidade da cera de carnaúba**. 2014. Tese (Doutorado em Química)– Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.
- DIONIZIO, A. F. **Aproveitamento energético de resíduos agroindustriais no Distrito Federal**. 2017. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade de Brasília, Brasília, 2017.
- ENERGIA, Portal. **Vantagens e desvantagens da energia a biomassa**. 2016. Disponível em: <<http://www.portal-energia.com/vantagens-e-desvantagens-da-energia-biomassa/>>. Acesso em: 04 out. 2017.
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2017 – Ano Base 2016**. Rio de Janeiro: EPE, 2017.
- FARINHAQUE, R.; 1981. **Influência da umidade no poder calorífico da madeira de bracatinga (*Mimosa scrabella*, Benth) e aspectos gerais de combustão**. Curitiba: fupef, Série Técnica. p. 14
- FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DO CEARÁ. Disponível em: <http://www.sfiec.org.br/portalv2/sites/sindicarnauba/files/Brochura_Carna%C3%BAba2.pdf>. Acesso em: 29 out. 2017.
- FERREIRA, J. C.; FURTADO, T. S.; VALIN, M.; M.A. & MUNIZ, G. I. B. **Potencialidade do uso de resíduos vegetais para a geração de energia através da técnica de briquetagem**. BioMassa & BioEnergia, edição 01, vol. 02., p. 18-25, 2012.

- GARCIA, D. P. **Caracterização química, física e térmica de pellets de madeira produzidos no Brasil.** 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia dos Campus de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2010.
- GENTIL, L. V. B. **Tecnologia e economia do briquete de madeira.** 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade de Brasília, Brasília, 2008.
- GREENPEACE BRASIL. **Revolução Energética.** 2013. Disponível em http://www.greenpeace.org/brasil/pt/O-que-fazemos/Clima-e-Energia/revolucao-energetica/?gclid=CjwKEAjwsNfOBRCWl_HevZSJ2i0SJABiE2qWN8sGBc4gn9atT-qdINUOn1X0A1wG_w66lJ2Gu2XThxoCunDw_wcB. Acesso em: 05 out. 2017.
- HOFFMAN, B.S. **O ciclo combinado com gaseificação integrada e a captura de CO₂: uma solução para mitigar as emissões de CO₂ em termelétricas a carvão em larga escala no curto prazo?** 2010. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.
- LENÇO, P.C. **Caracterização do bagaço de cana-de-açúcar para geração de energia.** 2010. 181 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.
- MARQUES, J. S. **Uso do pó da palha da carnaúba em compósitos de quitosana.** 2012. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012.
- MARTINI, P. R. R. **Conversão pirolítica de bagaço residual da indústria de suco de laranja e caracterização química dos produtos.** 2009. Dissertação (Mestrado em Química) PPGQ – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.
- MATARELLI, F.A.; LOPES, L.E.F.; CASTRO, L.F.A. **Siderurgia a carvão vegetal.** In: Biomassa, Energia dos Trópicos em Minas Gerais. Mello, Marcello Guimarães (org.). Belo Horizonte: LabMídia/FAFICH, 2001. P. 145- 162.
- NOGUEIRA, L. A. H.; LORA, E. E. S. **Dendroenergia: fundamentos e aplicações.** 2 ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2003.
- OLIVEIRA JUNIOR, E. M. **Produção de briquetes com resíduos de vegetais de jardinagem e podas em condomínios residenciais.** 2013. Dissertação (Mestrado em Sustentabilidade na Gestão Ambiental) – Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2013.
- OSHIRO, T. L. **Produção e caracterização de briquetes produzidos com resíduos**

- lignocelulósicos.** 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2016.
- PAULA, L. E. R **Produção e avaliação de briquetes de resíduos lignocelulósicos.**2010. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.
- PINHEIRO, G. F.; RENDEIRO, G.; PINHO, J.T. Densidade energética de resíduos vegetais. **Biomassa e Energia.** 2006. Disponível em: <<https://www.lippel.com.br/dados/download/02-05-2014-15-30Densidade-Energetica-de-Residuos-Vegetais.pdf>>. Acesso em 19 nov. 2017.y
- PIRES, A. A. F. **Resíduos lignocelulósicos para biocombustíveis sólidos:** caracterização e termogravimetria aplicada. 2013. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) – Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2013.
- PONTE, M. R. **Blendas de bagaço de cana-de-açúcar:** Caracterização das propriedades e investigação da viabilidade técnica.2017. Monografia (Engenharia de Energias) – Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Acarape, 2017.
- PROTASIO, T. P. **Biomassa residual do coco babaçu:** potencial de uso bioenergético nas regiões norte e nordeste do Brasil. 2014. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014.
- PROTASIO, T. P., COUTO, A. M., REIS, A.A., TRUGUILHO, P. F., GODINHO, T. P. **Potencial siderúrgico e energético do carvão vegetal de clones de *Eucalyptus* spp. Aos 42meses de idade.** doi: 10.4336/2013.pfb.33.74.448 *Pesq. flor. bras.*, Colombo, v. 33, n. 74, p. 137-149, abr./jun. 2013
- PIRES, A. A. F. **Resíduos lignocelulósicos para biocombustível sólido:** caracterização e termogravimetria aplicada.2013. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais – Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2013.
- RAMOS E PAULA, L. E. **Produção e avaliação de briquetes de resíduos lignocelulósicos.** 72p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras – MG, 2010.
- RAMOS E PAULA, L. E et al. **Produção e avaliação de briquetes de resíduos lignocelulósicos.** PFB– Pesquisa Floresta Brasileira, Colombo, v.31, n.66, p.103-112, abr./jun. 2011.
- REZENDE, M. E. **Produção de carvão vegetal – importância do conhecimento**

fundamental. Belo Horizonte, 2006. Curso: Fundamentos e práticas da carbonização da biomassa, ministrado durante o Seminário: Prática, logística, gerenciamento e estratégias para o sucesso da conversão da matéria lenhosa em carvão vegetal para uso na metalurgia e indústria.

SANTOS, J. R. S. **Estudo da biomassa torrada de resíduos florestais de eucalipto e bagaço de cana-de-açúcar para fins energéticos.** Dissertação (Mestrado em Ciências, Programa: Recursos Florestais, Opção em: Tecnologia de Produtos Florestais) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

SOUZA, M. M. **Caracterização e viabilidade econômica do uso energético de resíduos da colheita e do processamento de *Pinustaeda L.*** Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal, Área de concentração: Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

TAVARES, S. R. L.; SANTOS, T. E. **Potencial de uso de biomassa de biomassa vegetal para a produção de briquetes na região do Baixo-Açu no Rio Grande do Norte.** In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE BIOENERGIA, 7; BIOTECH FAIR, 5. 2012, São Paulo.

TAVARES, S. R. L.; SANTOS, T. E. **Uso de diferentes fontes de biomassa vegetal para produção de biocombustíveis sólidos.** *Holos*, Ano 29, Vol. 5. 2013

VALE, A.T.; GENTIL, L.V. Produção e uso energético de biomassa e resíduos agroflorestais. **Tecnologia aplicadas ao setor madeireiro III.** Rio Branco: Suprema, 2008. p.195-241.

VIEIRA, A. C. **Caracterização da biomassa proveniente de resíduos agrícolas.** Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2012.

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