



UFC

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ

CENTRO DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA

JEFFERSON WILLIS DA SILVA ALEXANDRE

**PROTÓTIPO DE FORNO DE BAIXO CUSTO PARA PRODUÇÃO DE
BIOCARVÃO DA BIOMASSA DE COCO-BABÃO (*Syagrus Cearensis*)**

FORTALEZA

2019

JEFFERSON WILLIS DA SILVA ALEXANDRE

PROTÓTIPO DE FORNO DE BAIXO CUSTO PARA PRODUÇÃO DE BIOCARVÃO
DA BIOMASSA DE COCO-BABÃO (*Syagrus Cearensis*)

Trabalho de conclusão de curso apresentado
à banca examinadora como requisito parcial
à obtenção do título de graduado em
Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Emílio Ferreira
Quevedo Nogueira

FORTALEZA

2019

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)

- A369p Alexandre, Jefferson Willis da Silva.
Protótipo de forno de baixo custo para produção de biocarvão da biomassa de coco-babão (*Syagrus Cearensis*) / Jefferson Willis da Silva Alexandre. – 2019.
47 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Fortaleza, 2019.
Orientação: Prof. Dr. Ricardo Emílio Ferreira Quevedo Nogueira.
1. Protótipo. 2. Forno 1G toucan TLUD. 3. *Syagrus cearensis*. 4. Biomassa . 5. Biochar. I. Título.
CDD 669
-

JEFFERSON WILLIS DA SILVA ALEXANDRE

PROTÓTIPO DE FORNO DE BAIXO CUSTO PARA PRODUÇÃO DE BIOCARVÃO
DA BIOMASSA DE COCO-BABÃO (*Syagrus Cearensis*)

Trabalho de conclusão de curso apresentado
à banca examinadora como requisito parcial
à obtenção do título de graduado em
Engenharia Metalúrgica.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Ricardo Emílio Ferreira Quevedo Nogueira
(Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Me. Rigoberto Soares do Nascimento
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Jorge Luiz Cardoso
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus pais, Liduina, Esposa e Família.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Ricardo Emílio Ferreira Quevedo Nogueira, pela excelente orientação.

A Prof. Dra. Maria Alexandra pela disponibilidade do seu tempo, oportunidade, atenção e apoio para a realização deste estudo.

Aos membros participantes da banca examinadora, pelas valiosas colaborações e sugestões.

Ao doutorando Rigoberto por todo o suporte durante o trabalho.

Ao formando Leônidas Leite pelo enorme auxílio e atenção no desenvolver do trabalho.

Aos colegas da turma de graduação, José Robério, Tomaz Costa, Marcos Paulo, Samuel Silveira, Manoel Vasconcelos, entre outros, por todos os momentos vividos academicamente, sejam bons ou ruins, e também pela contribuição emocional para que esse momento se realizasse.

Ao senhor Tomás Melo, meu cunhado, que contribuiu significativamente para a conclusão desse objetivo.

Em memória da Senhora Liduina Costa, a qual sempre acreditou em mim, depositando toda a sua confiança e estímulo, incentivo imprescindível na concretização desse momento.

RESUMO

A crescente preocupação com o meio ambiente torna urgente a busca de soluções práticas para os diversos problemas ambientais, causados, muitas vezes, pela má utilização de escassos recursos energéticos. Neste trabalho, é apresentada uma alternativa para certos inconvenientes da questão da utilização dos recursos naturais, a saber, um protótipo de forno capaz de produzir carvão vegetal a baixo custo, do tipo 1G Toucan TLUD. Esse forno tem um modo de operação que é menos prejudicial ao meio ambiente, quando comparado aos processos convencionais, podendo, também, servir de aquecedor ou funcionar como fogão, bastante útil em locais inóspitos e de difícil acesso. O forno ou reator foi confeccionado e, posteriormente, teve suas características de operação avaliadas e verificadas, tais como: funcionalidade, durabilidade e facilidade de operação. O valor encontrado para o rendimento médio do protótipo para produção do carvão foi de 241,93 g. O tempo médio para completar a queima foi de 44,33 minutos. A eficiência média foi de 14,34 %. A capacidade média de preenchimento de Biomassa no corpo do forno foi de 1,67 kg. A utilização de biomassa é uma ótima alternativa para um desenvolvimento mais sustentável, podendo ser utilizada de diversas formas e convertida em outros produtos. A *Syagrus Cearensis* é uma palmeira típica de alguns dos Estados do Nordeste, tais como Ceará, Paraíba, Pernambuco e Alagoas. Ela é um exemplo de biomassa que pode ser estudada para desenvolver outro produto de maior valor agregado. Assim, foi utilizada para fabricar carvão vegetal destinado a favorecer e beneficiar solos inférteis, o conhecido Biochar. O Biochar, que é a biomassa carbonizada, foi analisado através de ensaios em triplicata para a obtenção de resultados mais consistentes, previstos na norma NBR 8112 para a análise imediata, determinando o teor de umidade, em 4,63%; teor de voláteis, em 10,31%; teor de cinzas, em 7,69%; teor de carbono fixo, em 81,99%, que são resultados compatíveis com os da literatura. A biomassa *in natura* também passou por análise imediata feita da mesma forma, resultando em valores de teor de umidade, teor de matérias voláteis, teor de cinzas e teor de carbono fixo respectivamente em, 11,88%; 74,53%; 3,40%; 22,08%. Demonstrou-se, no presente trabalho, que a pesquisa científica aliada aos anseios de uma sociedade tende a favorecer ambos os lados, proporcionando, em sua grande maioria, consequências benéficas por gerações e gerações.

Palavras-chave: Protótipo. Forno 1G Toucan TLUD. *Syagrus Cearensis*. Biomassa. Biochar.

ABSTRACT

The growing concern with the environment makes urgent the search for practical solutions to the various environmental problems, often caused by the misuse of scarce energy resources. In this paper, an alternative to some drawbacks of the use of natural resources is presented, namely a furnace prototype capable of producing low cost charcoal, type 1G Toucan TLUD. This oven has a mode of operation that is less harmful to the environment when compared to conventional processes, and can also serve as a heater or cooker, very useful in harsh and hard to reach places. The furnace or reactor was made and subsequently had its operating characteristics evaluated and verified, such as: functionality, durability and ease of operation. The value found for the average yield of the prototype for coal production was 241.93 g. The average time to complete the burn was 44.33 minutes. The average efficiency was 14.34%. The average filling capacity of biomass in the furnace body was 1.67 kg. The use of biomass is a great alternative for more sustainable development and can be used in many ways and converted into other products. *Syagrus Cearensis* is a palm tree typical of some Northeastern states, such as Ceará, Paraíba, Pernambuco and Alagoas. It is an example of biomass that can be studied to develop another higher value added product. Thus, it was used to make charcoal to favor and benefit infertile soils, the so called Biochar. Biochar, which is carbonized biomass, was analyzed by triplicate assays to obtain more consistent results, provided by NBR 8112 standard for immediate analysis, determining the moisture content in 4.63%; volatile content by 10.31%; ash content, 7.69%; fixed carbon content of 81.99%, which is compatible with the literature. In natura biomass also underwent immediate analysis in the same way, resulting in moisture content, volatile matter content, ash content and fixed carbon content respectively, 11.88%; 74.53%; 3.40%; 22.08%. It has been shown in the present work that scientific research combined with the desires of a society tends to favor both sides, providing, for the most part, beneficial consequences for this and future generations.

Keywords: Prototype. 1G Toucan TLUD Oven. *Syagrus cearensis*. Biomass. Biochar.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Palmeira de Coco-babão	23
Figura 2 – Coco-Babão em casta	23
Figura 3 - Áreas de ocorrência de palmeira (Syagrus) no Brasil	24
Figura 4: Forno 1G Toucan TLUD	31
Figura 5: Forno/Reator completo	32
Figura 6: Corpo do Reator Preenchido	33
Figura 7: Forno abastecido e em operação	34
Figura 8: Biocarvão pronto	34
Figura 9: Amostra triturada e Homogeneizada	35

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Eficiência em relação ao tempo, comparando com a eficiência média	38
Gráfico 2 – Rendimento em carvão (g), em relação ao tempo de queima.....	39
Gráfico 3 – Comparação entre as Análises Imediatas	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Fontes de Ofertas Internas de Energia no Brasil 2018	15
Tabela 2 – Dados do protótipo de acordo com a biomassa.....	38
Tabela 3 – Análise Imediata dos Resíduos	40

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
A.C	Antes de Cristo
BIOCHAR	Carvão Originário de Biomassa
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
GRINTEQUI	Laboratório do Grupo de Inovações Tecnológicas e Especialidades Químicas
NBR	Norma Brasileira Regulamentar
PH	Potencial Hidrogeniônico
TC	Teor de Cinzas
TCF.	Teor de Carbono Fixo
TLUD	TOP LID UP DRAFT
TU	Teor de Umidade
TV	Teor de Voláteis
UFC	Universidade Federal do Ceará

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
l	Litro
mm	Milímetro
“	Polegada
°C	Graus Celsius
min	Minutos
Mtep	Milhões de Toneladas Equivalente de Petróleo
m ³	Metros Cúbicos
kg/m ³	Quilograma por Metro Cúbico
Kg	Quilograma
MPa	Mega Pascal
hs	Horas

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 JUSTIFICATIVA	17
3 OBJETIVOS	18
3.1 Objetivo Geral	18
3.2 Objetivos Específicos	18
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
4.1 Biomassa e Bioeconomia	19
4.2 Composição Química da Biomassa Vegetal	20
4.2.1 Lignina	21
4.2.2 Celulose	22
4.2.3 Hemicelulose	22
4.3 Aspectos gerais do Coco-babão	23
4.4 Carvão	25
4.5 Propriedades do Carvão	26
4.5.1 Rendimento gravimétrico	26
4.5.2 Carbono fixo	26
4.5.3 Matérias voláteis	27
4.5.4 Cinzas	27
4.5.5 Densidade	28
4.5.6 Porosidade e Reatividade	28
4.6 Pirólise	29
4.7 Forno TLUD e seu funcionamento	30
5. MATERIAIS E MÉTODOS	32
5.1 Construção do forno Toucan TLUD	32
5.2 Preparação do Material Precursor	33
5.3 Preparação das amostras	34
5.4 Análise imediata da Biomassa in Natura	35
5.4.1 Determinação do Teor de Umidade	35
5.4.2 Determinação do Teor de Voláteis	36
5.4.3 Determinação do Teor de Cinzas	36
5.4.4 Determinação do Teor de Carbono Fixo	37
5.5 Análise Imediata da Biomassa Carbonizada	37
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
6.1 Eficiência do Protótipo em Relação ao Tempo de Queima	38
6.2 Variação de Rendimento em Relação ao Tempo	39
6.3 Discussão relativa aos resultados da fabricação do forno	39
6.4 Análise imediata da biomassa in Natura e do carvão	40
6.5 Comparação das Análises Imediatas em in Natura e Carbonizada	41
7 CONCLUSÃO	43
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44
APÊNDICE	48

1 INTRODUÇÃO

A questão ambiental está se tornando cada vez mais urgente e importante para a sociedade, pois o futuro da humanidade depende da relação estabelecida entre a natureza e o uso pelo homem dos recursos naturais disponíveis, podendo causar degradação ambiental, alterações e desequilíbrios.

O meio ambiente é explorado pelo homem há milhares de anos, mas somente há pouco tempo é que a humanidade vem se conscientizando acerca da necessidade da preservação ambiental como um aspecto essencial para a própria preservação do nosso planeta.

Explorar o meio ambiente é, com certeza, um mal necessário e inevitável para o desenvolvimento da sociedade, mas se esse desenvolvimento não ocorrer de forma sustentável, as consequências poderão ser bastante prejudiciais para as gerações futuras. Assim, faz-se necessário empenho e investimento em estudos e pesquisas a fim de encontrar melhores formas de extrair e utilizar os recursos disponíveis na natureza.

A influência humana modifica a natureza trazendo diversas consequências para o planeta, que vão desde a alteração no ciclo de chuvas e secas, até o aumento da temperatura global. Com o advento das discussões climáticas e ambientais, a questão referente à sustentabilidade passou a se constituir em palavra de ordem, e as nações passaram a criar leis e tratados locais e globais como forma de minimizar os efeitos da atividade humana, no clima, impondo limites, metas e responsabilidades (CAVALCANTI, 1994).

É nesse contexto, que a bioeconomia, ou economia do “carbono verde” se torna um elemento fundamental no Brasil. Tal tecnologia consiste em valorizar e desenvolver produtos provindo de biomassa vegetal, para que possam ser utilizados não só como alimentos, mas também em materiais, bases químicas, fertilizantes, e energia, que essa é uma fonte de recursos sustentável. Portanto, a bioeconomia pode desempenhar um papel expressivo no desenvolvimento nacional diante do potencial do país na produção de matéria prima vegetal (CARDOSO, 2012).

O Brasil se beneficia de condições climáticas bastante favoráveis para a produção de biomassa. Diante de tal oferta, a biomassa é vista como uma das alternativas mais promissoras para o futuro energético sustentável. Atualmente, essa fonte corresponde a mais de 25% da oferta interna de energia do país, destacando-se o uso da cana-de açúcar (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2019). Contudo, os resíduos ainda são

subutilizados ou aproveitados de formas ineficientes, gerando passivos ambientais significativos.

Tabela 1 - Fontes de Ofertas Internas de Energia no Brasil 2018

2018	Mtep	%
RENOVÁVEIS	130,6	45%
Energia hidráulica	36,5	13%
Biomassa da cana	50,1	17%
Lenha e carvão vegetal	24,1	8%
Eólica	4,2	1%
Solar	0,298	0%
Lixívia e outras renováveis	15,4	5%
NÃO RENOVÁVEIS	157,9	55%
Petróleo e derivados	99,3	34%
Gás natural	35,9	12%
Carvão mineral	16,6	6%
Urânio	4,2	1%
Outras não renováveis	1,8	1%

Fonte: Adaptado (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2019)

O coco-babão é um fruto de uma palmeira nativa da região Nordeste. Ela é uma palmeira de hábito cespitoso com vários caules emergindo de um mesmo ponto. Sua panícula contém cerca de 50 frutos, de polpa amarela e adocicada, e em seu fruto, tanto o pericarpo quanto a amêndoa são comestíveis, e por isso, seus frutos são ocasionalmente comercializados (SOUTO, 2014).

Dessa forma, o biochar ou biocarvão é obtido por meio do processo de pirólise de biomassas. Devido à facilidade e ao baixo custo de produção, esse produto se tornou uma poderosa ferramenta mitigadora no destino final dos resíduos orgânicos, uma vez que esse produto tem a capacidade de sequestrar carbono, e promover melhorias nas propriedades químicas, físicas e microbiológicas do solo (LEHMANN & STEPHEN, 2011). As fontes de biomassas do biocarvão são variadas, diversas matérias-primas podem ser utilizadas para a produção de biocarvão, porém, a qualidade do biocarvão produzido será de acordo com a natureza da biomassa.

Para a produção do biochar, buscaram-se várias alternativas. Dentre elas, a construção de fornos, e principalmente com materiais de baixo custo, tornam a produção de biocarvão uma alternativa para realizar a carbonização dessas biomassas. Dessa forma, este estudo mostra o desempenho de um forno artesanal para produção de biocarvão a partir do coco-babão, e avalia sua funcionalidade, durabilidade e viabilidade.

2 JUSTIFICATIVA

Investir no aproveitamento adequado dos diversos resíduos e na construção de fornos artesanais mais eficientes e menos poluentes representa não só um fator determinante na capacidade produtiva, mas a possibilidade do aproveitamento racional e eficiente destes materiais, concorrendo para melhoria da qualidade ambiental, especialmente considerando a redução das emissões de gases poluentes. Além do mais, os resíduos quando carbonizados passam a ter um valor agregado que, em pequena escala, pode promover o desenvolvimento econômico, representando um mecanismo de inclusão social e geração de renda.

Através da queima desses resíduos de uma maneira controlada, é possível a geração do carvão que é um produto funcional de alto valor agregado, que pode ser incorporado no solo como condicionador. Mas também pode ser utilizado como combustível nas siderúrgicas, ou para adsorção de materiais na forma de carvão ativado. Atualmente, observa-se uma demanda crescente por carvão ativado, nas mais diversas áreas de utilização, porém, a produção é insuficiente frente às reais necessidades do país (IMBROISI, 2015). Essa crescente demanda aliada ao grande aumento da importação, observado nos últimos anos, incentiva cada vez mais os estudos sobre a produção de carvões.

A queima da biomassa em forno artesanal do tipo Top Lid Updraft (TLUD) para a produção de biochar é importante, uma vez que esse forno artesanal de baixo custo mostra eficiência semelhante a outros tipos de fornos mais sofisticados usados para a produção de biocarvão, produzindo material bem carbonizado e de boa qualidade.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo Geral

Fabricar, artesanalmente, um forno para produzir Biocarvão a partir do coco-babão (*Syagrus Cearensis*), e avaliar sua funcionalidade, durabilidade e viabilidade.

3.2 Objetivos Específicos

- Construir um protótipo de forno para produção de carvão de Biomassa do coco-babão (*Syagrus Cearensis*);
- Aplicar o método de obtenção de Biocarvão ou Carvão Vegetal com o uso do forno do tipo 1G Toucan TLUD, determinando o seu rendimento e eficiência;
- Desenvolver Biocarvão ou Carvão Vegetal a partir da Biomassa conhecida como coco-babão (*Syagrus Cearensis*);
- Difundir o conceito de Biocarvão para uma maior familiarização a respeito do assunto para estudantes e pesquisadores iniciantes afins;
- Realizar os processos de carbonização dos resíduos na temperatura requerida para realizar a análise imediata dos mesmos, determinando o teor de umidade, cinzas, voláteis e carbono fixo.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Biomassa e Bioeconomia

Para Fonseca (2009) o termo biomassa abrange uma extensão considerável de materiais que podem ser usados como combustíveis ou matérias-primas para os mais diversos fins e deve ser considerada como derivados de organismos vivos ou que estiveram vivos recentemente. Assim incluindo várias matérias primas, como: bagaço, palha e ponta da cana de açúcar, lenha, frutos, carvão vegetal, biogás, lixívia, óleos vegetais e resíduos vegetais, urbanos ou animais e excluindo os tradicionais combustíveis fósseis, pois, apesar de terem origem de vida vegetal e animal como carvão mineral e petróleo, necessitam de processos de milhões de anos para sua conversão na forma que são encontrados.

O potencial econômico de cada biomassa está relacionado às características dessa matéria-prima, assim como a tecnologia utilizada para se obter o produto final desejado. Na bioeconomia, os mercados são extremamente variados, e extrapolam largamente os setores energéticos. Numa perspectiva do ramo energético, biomassa é todo recurso renovável oriundo de matéria orgânica, seja de origem animal ou vegetal, que pode ser utilizada na produção de energia (CAMPOS; MORAES, 2012).

A mesma sempre esteve presente como fonte de energia na história da civilização, principalmente na forma de lenha, embora de eficiência reduzida, seu aproveitamento podia ser feito diretamente, por intermédio da combustão em fornos, caldeiras, etc. A partir de meados do século XX, outras formas mais desenvolvidas e eficientes de utilização da biomassa de forma energética ganharam ênfase com intuito de aumentar a eficiência do processo e reduzir impactos socioambientais, desde então, tem-se desenvolvido e aperfeiçoado tecnologias de conversão mais eficientes, como a gaseificação e a pirólise, também sendo comum a cogeração (CARDOSO, 2012).

Existem diversas rotas tecnológicas para a utilização da biomassa com a finalidade de se produzir energia elétrica, contudo, todas envolvem a transformação da biomassa, por meio de processos termoquímicos, bioquímicos e físico-químicos, em um produto intermediário como biocombustíveis, biocarvão, briquetes ou biogás, que por fim, serão usados na geração de energia. As principais rotas de conversão de biomassa são: combustão, liquefação, fermentação, biodigestão, gaseificação e pirólise (CARDOSO, 2012). Cada uma dessas tecnologias tem suas vantagens dependendo da fonte de biomassa e do tipo de energia requerida.

A bioeconomia também é muito presente na manufatura de materiais mais tradicionais como papéis e borrachas. Esses setores constituem o atual sustentáculo da valorização não alimentar da biomassa, sobretudo florestal, e ainda dispõem de amplas margens de desenvolvimento e inovação. Ao passo que os “neobiomateriais” como bioplástico, filmes finos e biocompósitos fibrosos são chamados, por sua vez, a competir com materiais de estrutura mais elaborada e altamente consumidores de energia cinzenta como aço e concreto (ROY, 2018).

A biomassa, também possui grandes potenciais além desses ramos. Por isso, é que nos últimos anos, grande esforço tem sido despendido para o aproveitamento de coprodutos e de resíduos dos processos de conversão da biomassa para agregar valor às cadeias produtivas em outros setores sociais e assim reduzir possíveis impactos ambientais negativos. Os conceitos de biorrefinaria e química verde enfocam este aproveitamento de modo que se tenham cadeias de valor similares àquelas dos derivados do petróleo, porém com menor impacto ao meio ambiente (VAZ, 2010).

Atualmente um dos principais interesses da biorrefinaria tem sido dado ao desenvolvimento de produtos a partir de resíduos de biomassa de processos já desenvolvidos e utilizados atualmente como do processamento térmico e da transesterificação de óleos, visto que esses resíduos muitas vezes são mal aproveitados. Por exemplo, no fracionamento ou desconstrução, a biomassa, após passar por diversos tipos de pré-tratamentos físicos e químicos disponibiliza os polímeros de lignina, celulose e hemicelulose (VAZ, 2010).

No processamento térmico por pirólise rápida a biomassa é incinerada em presença controlada de oxigênio, fornecendo o bio-óleo. A produção de biodiesel por transesterificação gera a glicerina como subproduto. Todos esses resíduos dentro do propósito da biorrefinaria tem como serem melhores aproveitados. A potencialidade de uso de coprodutos e resíduos para a obtenção de insumos químicos renováveis é uma alternativa viável, cabendo estabelecer rotas químicas e métodos mais eficientes para seu aproveitamento (VAZ, 2010).

4.2 Composição Química da Biomassa Vegetal

A maioria das biomassas vegetais são materiais lignocelulósicos e em base seca, seus principais constituintes moleculares são uma composição estruturada de três famílias de compostos químicos: celulose, hemicelulose e lignina. A hemicelulose e a

celulose estão agrupadas formando a Holocelulose, a qual dispõe as paredes das fibras. A lignina é um polímero tridimensional com finalidade de manter as fibras juntas. Além dos constituintes principais, outros materiais não estruturais também estão presentes, mas geralmente em menor quantidade, são esses os extrativos e as cinzas (DORRESTIJN et al., 2000).

4.2.1 Lignina

A palavra lignina vem do latim *lignum*, que significa madeira, foi introduzida por Schultz, em 1857, para designar o material que hoje se sabe ser o segundo mais abundante do reino vegetal, logo depois da celulose. A lignina é um dos três principais biopolímeros na parede celular das plantas, sua função é reforçar a estrutura e proporcionar rigidez. Esses compostos químicos só não estão presentes em vegetais primitivos como fungos, algas e líquens não lignificados (SANTOS, 2008).

A lignina tem uma atuação importante no intrincado transporte interno de água, nutrientes e metabólitos pelo decréscimo que causa na permeação de água através das paredes das células dos tecidos condutores do xilema, além de seus tecidos resistirem ao ataque por micro-organismos, impedindo a penetração de enzimas destruidoras da parede celular (PHILIPP, 1988).

A principal utilização da lignina ainda é como fonte de energia, mas tem encontrado novos campos de aplicação. Sua utilização é geralmente baseada nas propriedades dispersantes e adesivas, sendo aplicada como dispersante para pigmentos, produtos cerâmicos, pesticidas, como emulsificante de óleos e látex, aditivo em concreto e cimento, entre outros. Uma das principais razões para a lignina ainda ser utilizada, em sua maior parte, como fonte de energia está associada à sua estrutura química (MARABEZI, 2009).

A presença de diferentes unidades precursoras e o elevado número de combinações possíveis entre as unidades precursoras faz com que a estrutura da macromolécula de lignina seja bem mais complexa que a apresentada pela celulose e pelas polioses. As ligninas são moléculas amorfas, cujo polímero é formado principalmente por unidades aromáticas de fenilpropano, que é considerada uma substância incrustante (ROWELL et al., 2005).

Sua estrutura tridimensional explica a rigidez e a resistência às forças de compressão, gerando uma estrutura resistente ao impacto, compressão e quebra ao conferir rigidez à parede da célula e ao agir como um agente permanente de ligação entre as células.

O comportamento químico da lignina é governado, principalmente, pela presença de diferentes grupos funcionais encontrados na macromolécula (MARABEZI, 2009).

4.2.2 Celulose

A celulose é o polissacarídeo mais abundante na natureza, sendo base estrutural das células das plantas. É a mais importante substância natural produzida pelos organismos vivos. A porcentagem de celulose nas plantas varia dependendo da origem. O isolamento da celulose é fortemente influenciado pelas substâncias que acompanham a celulose na parede celular. Compostos como gorduras, ceras, proteínas e pectina podem ser facilmente removidos por extração com solventes orgânicos e álcalis diluídos (MARABEZI, 2009).

Sua cadeia se constitui de unidades de anidroglicose, unidas através de ligações β -1,4-glicosídicas, resultando num polímero de alto peso molecular. As cadeias de celulose nas paredes celulares das plantas são arranjadas compactamente, de modo que suas fibras apresentam regiões nitidamente cristalinas, uma consequência do número grande de ligações de hidrogênio que resulta numa forte interação entre suas moléculas. Os grupos funcionais da cadeia de celulose responsáveis por essas interações são grupos hidroxilas (MARABEZI, 2009).

4.2.3 Hemicelulose

Hemiceluloses também são polissacarídeos, mas diferem da celulose pela composição de várias unidades de açúcar, com cadeias moleculares menores e ramificadas. Enquanto a celulose, como substância química, contém exclusivamente a D-glicose como unidade fundamental, as polioses são polímeros, em cuja composição podem aparecer condensadas em proporções variadas (MARABEZI, 2009).

Algumas das unidades de açúcares que compõem as polioses possuem cinco átomos de carbono, sendo denominadas pentoses, outras, porém, possuem seis átomos de carbono, sendo denominadas hexoses. Assim, o termo hemicelulose não designa um composto químico definido, mas sim uma classe de componentes poliméricos presentes em vegetais fibrosos, possuindo, cada componente, propriedades peculiares. Como no caso da celulose e da lignina, o teor e a proporção dos diferentes componentes encontrados nas hemiceluloses de madeira variam grandemente com a espécie e, provavelmente, também de árvore para árvore (PHILIPP, 1988).

A hemicelulose exerce importantes funções na regulação do crescimento das estruturas vegetais, atuando como ligantes entre celulose e lignina, possuindo pouca

contribuição sobre a resistência mecânica das fibras. Devido à baixa massa molar a hemicelulose é mais facilmente hidrolisável em relação à celulose, e quando extraída de diferentes fontes vegetais geralmente mostra diferença nos detalhes estruturais entre espécies como o grau de polimerização (SANTOS, 2008).

4.3 Aspectos gerais do Coco-babão

As palmeiras (Família Arecaceae), de um modo geral, são representadas por indivíduos de estipe lenhoso, folhas pecioladas compostas agrupadas no ápice do estipe (SOUZA; LORENZI, 2008).

As flores são pequenas, geralmente pouco vistosas, reunidas em grandes inflorescências axilares que nascem protegidas por brácteas lenhosas em forma de canoa. Os frutos podem ser secos ou carnosos, sempre indeiscentes (não se abrem espontaneamente quando maduros). As sementes possuem bastante endosperma (JOLY, 2002).

Figura 1 – Palmeira de Coco-babão.



Fonte: Autor.

Figura 2 – Coco-Babão em casta.



Fonte: Autor.

Dentre esses, encontra-se o gênero *Syagrus*, nome derivado do latim e que significa “um tipo de palmeira”. Gênero quase que totalmente restrito à América do Sul, sendo o Brasil Central e o leste do Brasil o seu centro de dispersão (FIG. 3). É representado por 36 espécies, das quais 30 ocorrem no Brasil (LORENZI et al., 2004). Entre essas espécies está o *Syagrus cearensis* (Noblick, 2004), também conhecido como catolé, coco catolé, coco-babão ou babão.

Figura 3 - Áreas de ocorrência de palmeira (*Syagrus*) no Brasil



Fonte: Adaptado (LORENZI, 2010).

A cadeia produtiva do coco-babão é uma das mais representativas do extrativismo vegetal no Brasil, em razão da área de abrangência da palmeira (13 a 18 milhões de hectares em 279 municípios, situados em 11 Estados), bem como das inúmeras potencialidades de produtos que podem ser desenvolvidas a partir da planta como um todo, promovendo diversas atividades econômicas, principalmente para as mulheres, comumente chamadas de quebradeiras de coco, que sobrevivem da agricultura de subsistência associada à exploração do coco (NOLETO, 2012).

4.4 Carvão

O carvão produzido a partir da biomassa é um material carbonáceo de granulidade fina com elevado teor de carbono orgânico e largamente resistente à decomposição, obtido como o subproduto sólido do processo de pirólise da matéria prima. Relatos arqueológicos indicam que a pirólise, mais comumente chamada de carbonização quando se trata da transformação da biomassa em carvão um dos processos termoquímicos mais antigo conhecido pelo homem, fato devido a vestígios de carvão encontrados na França, datados de mais de 30.000 a.C. O fim da Idade da Pedra só foi possível com a produção desse produto, pois sua combustão pode chegar a temperaturas maiores que 1.100°C, permitindo a fundição de minérios. Sendo assim, pode-se afirmar que as Idades do Ferro e do Bronze não teriam acontecido sem o carvão (PINHEIRO et al., 2006).

O carvão também é comumente usado como adsorvente, uma vez que possui muitas propriedades atraentes para ser utilizado para esse fim, a saber, matriz de carbono relativamente estruturada, com grande área superficial específica, estrutura micro, meso e macroporos, grupos funcionais ativos e pH elevado, podendo desempenhar um papel importante no controle de contaminantes no ambiente. Em função de suas características físico-químicas pode atuar como um precursor na produção de carvão ativado (FREITAS, 2009).

Guarnieri (2016) destaca a aplicação do carvão no solo como um condicionador, que pode aumentar a fertilidade do solo e melhorar a sua qualidade elevando o pH, também, pode aumentar a capacidade de retenção de umidade e melhorar a capacidade de troca catiônica, ajudando o solo a manter os nutrientes. Outras vantagens, associadas à utilização de biochar, como um condicionador do solo, são que pode sequestrar o carbono da atmosfera e transferi-lo para o solo oferecendo potencial benefício ambiental e evitando a perda de nutrientes. (LEHMANN et al., 2011).

Segundo Lehmann (2007) o carvão quando é combinado com a produção bioenergética, ou seja, com a captação dos gases produzidos durante a pirólise, e utilizado no solo como condicionador é uma tecnologia mais limpa e útil para sequestro de carbono. Portanto, é um alvo atrativo para subsídios à produção energética e para a sua inclusão no mercado global de créditos de carbono.

Para o Brasil, o carvão originado a partir de biomassa é uma fonte energética de grande importância, pelo seu caráter renovável e pela sua importância histórica e econômica. Este insumo energético é, em grande parte, utilizado pelo setor industrial brasileiro,

principalmente nos segmentos siderúrgico e metalúrgico que o utilizam como termo-redutor de minério. O Estado de Minas Gerais se destaca como o maior consumidor e produtor nacional e mais de 80% da produção de carvão no Brasil são destinados ao setor siderúrgico). O carvão tem algumas vantagens em relação ao coque do petróleo nesse setor por possuir maior grau de pureza, garantindo um aço de melhor qualidade e reduzindo a quantidade de resíduos poluentes emitidos ao meio ambiente (PINHEIRO, 2006).

É possível produzir carvão a partir de qualquer fonte de biomassa, porém, os processos terão eficiências diferentes, assim como os produtos obtidos poderão apresentar características físicas e químicas diferentes, tais como porosidade, constituição elementar, poder calorífico, reatividade, densidade, teor de carbono fixo e resistência mecânica. Isso ocorre devido às diferenças existentes na composição química (teores de lignina, extrativos, celuloses e hemiceluloses) e na morfologia dessas matérias-primas, assim como nas condições da pirólise, principalmente, a temperatura final (BRITO, 1996).

4.5 Propriedades do Carvão

4.5.1 Rendimento gravimétrico

O rendimento gravimétrico é a relação percentual de peso entre o produto e a matéria-prima, expresso em porcentagem.

Segundo OLIVEIRA (1988) o rendimento gravimétrico possui:

- Correlação positiva com o teor de lignina total e teor de extrativos;
- Correlação positiva com massa específica básica e com teor de cinzas da biomassa;
- Correlação negativa entre largura e diâmetro dos lúmenes das fibras.

Segundo Trugilho e Silva (2001), o rendimento gravimétrico do carvão na pirólise diminui com o aumento da temperatura final, porém tende a se estabilizar, em temperaturas mais elevadas. Outros fatores importantes para o rendimento gravimétrico e uma taxa de aquecimento e o tempo de residência do processo (OLIVEIRA et al., 1982).

4.5.2 Carbono fixo

O carbono fixo pode ser definido como a quantidade de carbono presente no carvão. O rendimento em carbono fixo apresenta uma relação diretamente proporcional aos

teores de lignina, extrativos e massa específica da biomassa, e inversamente proporcional ao teor de holocelulose. Apresenta uma correlação direta com o teor de carbono fixo presente na biomassa e com o rendimento gravimétrico (OLIVEIRA, 1988). Segundo Carmo (1988), a quantidade de carbono fixo fornecido por unidade de biomassa é função da porcentagem de lignina da biomassa.

4.5.3 Matérias voláteis

Os materiais voláteis podem ser definidos como substâncias que são desprezadas da biomassa como gases durante a pirólise e/ou queima do carvão. Os fatores que influenciam os materiais voláteis no carvão são: temperatura de pirólise, taxa de aquecimento e composição química da biomassa (CARMO, 1988). A temperatura é o principal parâmetro que regula os teores de materiais voláteis e carbono fixo do carvão. O efeito das matérias voláteis se dá na modificação estrutural do carvão. A porosidade, diâmetro médio dos poros, massa específica e outras características físicas do carvão podem ser alteradas significativamente pela eliminação dos voláteis.

4.5.4 Cinzas

As cinzas são resultantes da combustão dos componentes orgânicos e oxidação dos inorgânicos. Alguns dos componentes das cinzas são fósforo, silício e óxido de alumínio, sódio, cálcio e potássio, logo a composição química das cinzas varia dependendo da matéria-prima. Geralmente, o carvão apresenta baixo teor de cinzas quando comparado com o coque mineral (CARMO, 1988). Segundo Cotta (1996), quanto maior a proporção de materiais minerais na biomassa, maior a produção de cinzas no carvão. Os minerais presentes na biomassa e carvão são considerados indesejáveis para a maioria das aplicações do carvão

O teor, bem como a composição química das cinzas pode ser afetada pela disponibilidade de minerais no solo. Com relação ao teor de minerais no carvão vegetal, presentes na forma de fósforo, enxofre, cálcio, etc. percebe-se que quanto maior o teor dos mesmos na matéria-prima utilizada, maior será a porcentagem destes no carvão produzido. Os principais minerais encontrados nas cinzas são cálcio, magnésio, fósforo e silício (BARCELLOS, 2007).

4.5.5 Densidade

É importante ter em mente que, quando se fala em massa específica do carvão, é preciso saber exatamente qual conceito está sendo expresso. Existem três diferentes conceitos de massa específica para o carvão: a massa específica verdadeira, a massa específica aparente e a massa específica a granel.

A massa específica varia conforme a técnica utilizada na sua medição. Ao se tomar uma determinada caixa, com volume nominal de 1 m^3 , cheia de carvão, a relação massa do carvão/volume é denominada massa específica a granel, expressa em kg/m^3 . Normalmente, esse valor gira em torno de 200 a 300 kg/m^3 , com os valores mais comuns próximos de 250 kg/m^3 . Se, na medida anterior, desconsiderar o volume dos espaços vazios entre os vários pedaços de carvão, teremos a relação massa do carvão/volume, cujo resultado expressa a massa específica aparente. O carvão vegetal é um material bastante poroso, com 70-80% de porosidade. A massa específica verdadeira é a medida da massa dos materiais que compõem o carvão vegetal, ou seja, é a massa específica aparente, desconsiderando-se o volume da porosidade interna. Relacionando a massa específica verdadeira com a aparente, pode-se obter, então, uma medida da porosidade do carvão (OLIVEIRA et al., 1982).

4.5.6 Porosidade e Reatividade

A porosidade e a reatividade são as propriedades do carvão muito relacionadas às suas características de adsorção. Morais et al. (2005) observou que a porosidade do carvão que é resultante das estruturas de células e poros do material de origem, é influenciada principalmente pela temperatura da pirólise que faz liberar elementos do material original e o fornecimento de calor pode produzir quebras, contração, expansão, derretimento e formação de produtos intermediários. Um elevado índice de porosidade vai resultar numa área superficial grande que é fundamental para o processo de adsorção.

Já a reatividade, que é a característica que um combustível sólido tem de reagir com o dióxido de carbono, é influenciada diretamente na quantidade de material volátil do carvão. Para o carvão, um aumento no carbono fixo acarretará um aumento da reatividade no processo de combustão, ou seja, maior reatividade implica maior cinética da combustão e maior geração de gás redutor da carga metálica. A reatividade é o fator determinante da característica do carvão como redutor (MORAIS et al., 2005).

4.6 Pirólise

Os processos de conversão da biomassa podem ser classificados em três grupos: os processos físicos, os bioquímicos e os termoquímicos. No primeiro, não há alteração da composição química original da matéria prima, sendo utilizados como preparação da biomassa para outros processos de conversão (CARDOSO, 2012).

Exemplos de processos físicos são: densificação, compactação de resíduos na forma de pellets, moagem ou picagem e extração mecânica do óleo em filtro prensa. Os processos bioquímicos, que geralmente são desenvolvidos em biomassa com alto teor de umidade à temperatura ambiente, incluem a fermentação alcoólica e a digestão anaeróbia para produção de biogás, assim como outros processos químicos realizando reações químicas na matéria prima para modificar suas propriedades deixando ela mais propícia ao uso, como no caso da transesterificação e esterificação dos óleos vegetais para produção de biodiesel. Já nos processos termoquímicos da biomassa, são utilizadas temperaturas e/ou pressões elevadas para alterar a sua estrutura química (LABEGALINI, 2013).

Os principais processos termoquímicos são a gaseificação, a liquefação e a pirólise. A gaseificação é um processo a altas temperaturas, que podem variar entre 700 e 900°C para otimizar a produção, na presença de um agente de gaseificação, geralmente oxigênio ou vapor, o que resulta em uma maior produção de produtos gasosos, produtos da gaseificação podem ser utilizados como combustível em caldeiras, motores de combustão interna, turbinas a gás, pilhas e em síntese de compostos orgânicos (PEREIRA et al., 2012).

A liquefação é a conversão da biomassa em produtos líquidos, utilizando altas pressões (12-30 MPa) e temperaturas moderadas (250 – 350°C), esses produtos são utilizados como combustíveis ou como matéria-prima na indústria. Mas o principal processo de conversão termoquímica da biomassa a pirólise, que é a decomposição térmica da biomassa, um processo de quebra das ligações químicas das cadeias carbônicas pelo calor fornecido à biomassa em um ambiente inerte, sem ou com baixa concentração de oxigênio (MIRANDA, 2017).

A pirólise é um processo em que a degradação de um material sólido ocorre pelo calor, formando três produtos: carvão, óleo e gás pirolíticos, ela consiste em uma série de reações químicas complexas, endotérmicas e exotérmicas de rompimento ou formação de ligações químicas, com fenômenos físicos que compreendem a ressolidificação e produção de compostos químicos de cadeia mais simples, cujas mudanças ocorrem devido a efeitos térmicos na ausência de oxigênio ou em quantidades limitadas deste. Nesse procedimento

ocorre a degradação da biomassa, ocasionada inicialmente pelo rompimento das ligações fracas seguido por reações de despolimerização (MIRANDA, 2017).

O comportamento geral da biomassa, perante o processo de pirolise, representa o somatório do comportamento de cada um de seus componentes principais (celulose, hemiceluloses e lignina). O processo consiste em quatro etapas diferentes bem características: primeiramente a secagem do material, segunda etapa da decomposição da hemicelulose, seguido da decomposição da celulose e por fim a decomposição da lignina (MACEDO, 2012).

Vários fatores afetam a taxa de conversão e rendimentos, composição e propriedades das classes de cada um dos produtos da pirolise, tendo como principais parâmetros a serem monitorados a temperatura, fluxo, o tipo de reator, a taxa de aquecimento e o tempo de residência do processo, assim como tem a influência das propriedades da própria biomassa como composição química, teor de cinzas e umidade, tamanho de partícula e a forma, densidade, entre outros. (MACEDO, 2012)

4.7 Forno TLUD e seu funcionamento

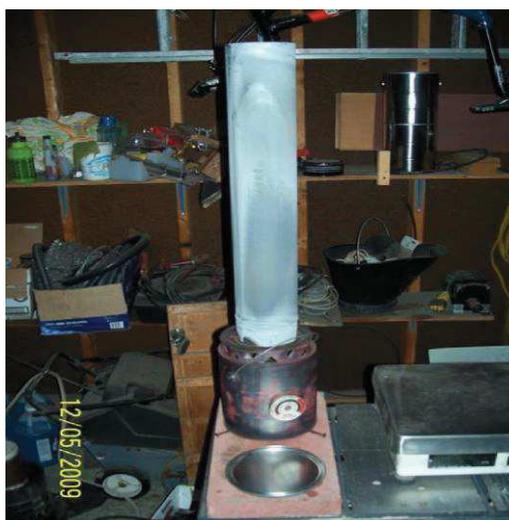
Conforme Mclaughlin (2010), esse tipo de forno ou reator é um gaseificador de corrente ascendente com iluminação superior (também conhecido como TLUD). É um micro-forno usado para produzir carvão, especialmente biocarvão, e calor para cozinhar. Um TLUD pirolisa o material orgânico, incluindo madeira ou estrume, e usa um rebobiador para eliminar subprodutos voláteis da pirolização. O processo deixa principalmente carbono como resíduo, que pode ser incorporado ao solo.

Um forno gaseificador TLUD é comumente construído com dois recipientes cilíndricos concêntricos. O cilindro interno é o pote de combustível. O pote de combustível tem orifícios na base. Esses orifícios são à entrada de ar principal. O pote de combustível também possui orifícios no pescoço, como a saia, servindo como entrada de ar secundária. O cilindro externo possui orifícios próximos à parte inferior nas laterais. Durante a combustão, o ar entra nesses orifícios, seja por tiragem de ar natural ou forçado com um ventilador de corrente contínua, dependendo dos requisitos e do modelo de construção (MCLAUGHLIN, 2010).

Segundo Mclaughlin (2010), qualquer biomassa com menos de 20% de conteúdo de umidade pode ser usada como combustível. O usuário enche o tanque de combustível até

em cima, logo abaixo dos orifícios secundários da entrada de ar. O usuário inflama a camada superior de combustível para iniciar a pirólise. O ar flui através das entradas de ar primária e secundária. A entrada primária ajuda o fluxo de gás de madeira pirolisada a subir. A entrada de ar secundária sopra ar quente ao viajar ao redor do tanque de combustível. A entrada secundária acima da camada de combustível ajuda a queimar o gás da madeira.

Figura 4: Forno 1G Toucan TLUD.



Fonte: MCLAUGHLIN, 2010.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 Construção do forno Toucan TLUD

Para realização do trabalho, construiu-se um forno do tipo 1G Toucan TLUD, utilizando-se duas latas, uma para compor o corpo do reator e a outra para a chamada Coroa do forno. Nesta lata é feita marcações em formas de triângulos, com uma caneta porosa, por exemplo, para guiar melhor os locais dos cortes. Triângulos maiores feitos com a maquina, em número de oito ao todo. Os triângulos menores podem ser feitos utilizando o abridor de lata simples. Na primeira lata, será também necessário vários furos e cortes, para a pequena ou quase nenhuma incidência de oxigênio, que pode ser feito com o uso do abridor de latas comum, abrindo as laterais dos triângulos pequenos e empurrando para dentro da lata a parte que ficou flexível. Os cortes centrais podem ser feitos com uma faca simples, pois essa região da lata é bem maleável.

Para a fixação do termômetro, usa-se a furadeira com a broca chata para furar e após, com porcas e arruelas adequadas, prossegue-se com a fixação do sensor no local adequado da lata, o qual deve estar disposto a aproximadamente cinco centímetros do fundo da lata usada para servir de corpo do reator. Na lata que será usada como coroa, deve-se ter um furo de três polegadas de diâmetro, o qual pode ser realizado fazendo-se primeiramente uma marcação circular com a dimensão requerida, para uma maior precisão, e com o uso da Serra-copo acoplada a furadeira, alcança-se o objetivo, como mostra a figura 5.

Figura 5: Forno/Reator completo.



Fonte: Autor.

5.2 Preparação do Material Precursor

Todos os experimentos foram conduzidos com coco-babão, gentilmente disponibilizados pela senhora Antônia Adriana Nojosa. O *Syagrus cearensis* foi colhido em novembro de 2019 no município de Caucaia, região metropolitana de Fortaleza-Ceará.

O *Syagrus cearensis* foi o material escolhido para o estudo apresentado neste trabalho devido a sua maior disponibilidade no estado e também pelo fato de o mesmo ter uma baixa utilização pela população local.

Para a produção de carvão através do forno, deve-se começar pela preparação do material precursor, que no caso foi o coco-babão. O mesmo foi recolhido no local mencionado acima no estado de menor umidade aparente possível, ou seja, aqueles que estavam há mais tempo expostos a ação da luz solar. O material precursor pode ser preparado quantificando-o de acordo com a capacidade do corpo do forno. Também é necessário uma matéria-prima inicial, separando-a, previamente, uma vasilha seca e limpa de margarina para efetuar um banho de querosene na própria, o que facilitará sua combustão para dar início a pirólise da biomassa. Logo após, procede-se a preencher o corpo do forno com a biomassa utilizada até próximo do seu limite, figura 6. Daí, segue-se para a efetiva obtenção do carvão, colocando-se o dispositivo com o material e as peças necessárias, em local adequado, aberto e ventilado, de preferência. Dispondo-o em um local que suporte uma elevada temperatura, sobre pregos do tipo 3/8 (1/8 mm) dispostos da maneira abaixo, os quais servirão para configurar a entrada de ar primária, conforme figura 7.

Figura 6: Corpo do Reator Preenchido.



Fonte: Autor

Figura 7: Forno abastecido e em operação.



Fonte: Autor.

Procedendo conforme as referências e acompanhando o processo, como forma de ter uma maior segurança na operação do dispositivo, alcança-se o objetivo na produção do carvão, figura 8.

Figura 8: Biocarvão pronto.



Fonte: Autor.

5.3 Preparação das amostras

O material foi triturado e homogeneizadas com auxílio de um moinho de facas de Wiley, para que tivessem uma granulometria menor ficando mais adequado realizar os experimentos, esse procedimento foi realizado na EMBRAPA. A amostra está apresentada na figura 9.

Figura 9: Amostra triturada e Homogeneizada.



Fonte: Autor.

5.4 Análise imediata da Biomassa in Natura

A Análise Imediata da biomassa *in natura* foi realizada de acordo com a norma ABNT NBR 8112 (1986), 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 no laboratório GRINTEQUI, em triplicatas para garantir maior confiabilidade aos testes.

5.4.1 Determinação do Teor de Umidade

Inicialmente fez-se a secagem dos cadinhos na estufa a 105°C durante 30 min, em seguida foram armazenados no dessecador, depois o material foi pesado na balança de precisão e verificado a sua massa. Posteriormente, foi adicionado nos cadinhos aproximadamente 1 g das amostras. Então os mesmos foram acondicionados na estufa a 105°C, por 3 hs, e na sequência foram armazenados no dessecador, para posterior pesagem. Tal processo repetiu-se até que os pesos se mantivessem constantes. Para determinação do teor de umidade utiliza-se a Equação 1.

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

Na qual:

TU: Teor de umidade (porcentagem);

m1: Massa do recipiente de secagem seco em estufa (gramas);

m2: Massa do recipiente com a amostra antes da secagem (gramas);

m3: Massa do recipiente com amostra após secagem (gramas).

5.4.2 Determinação do Teor de Voláteis

Inicialmente fez-se a calcinação dos cadinhos na mufla a 900°C durante 30 minutos, mesmo período que os mesmos ficaram no dessecador, depois o material foi pesado na balança de precisão e verificado a sua massa. Posteriormente, foi adicionado nos cadinhos aproximadamente 1 g das amostras secas. Então o cadinho foi tampado e posicionado na porta do forno mufla, previamente aquecido a 900°C, ficando nessa posição durante 3 minutos. Passado esse período, o cadinho foi colocado no interior da mufla a 900°C durante 7 minutos com a porta fechada. Em seguida, o cadinho foi resfriado em dessecador com sílica gel durante 30 minutos. Por último, a amostra foi pesada. O teor de voláteis foi calculado de acordo com a Equação 2.

$$TV = \left(1 - \frac{m3 - m1}{m2 - m1}\right) * 100 \quad (2)$$

Na qual:

TV: Teor de matérias voláteis (porcentagem);

m1: Massa do recipiente calcinado (gramas);

m2: Massa do recipiente com a amostra seca (gramas);

m3: Massa do recipiente com amostra incinerada (gramas).

5.4.3 Determinação do Teor de Cinzas

Foi feita a calcinação dos cadinhos na mufla a 700 °C durante 30 minutos mesmo período que os mesmos ficaram no dessecador, depois o material foi pesado na balança de precisão e verificado a sua massa. Posteriormente, foi adicionado nos cadinhos aproximadamente 1 g das amostras secas. Então o cadinho foi levado ao forno mufla, previamente aquecida a 700°C, ficando nele por 3 horas. Passado esse período, o cadinho foi

resfriado em dessecador com sílica gel durante 30 minutos. Por último, a amostra foi pesada. O teor de cinzas foi calculado de acordo com a Equação 3.

$$TC = \left(\frac{m3 - m1}{m2 - m1} \right) * 100 \quad (3)$$

Na qual:

TC: Teor de cinzas (porcentagem);

m1: Massa do recipiente calcinado (gramas);

m2: Massa do recipiente com a amostra seca (gramas);

m3: Massa do recipiente com as cinzas da amostra(gramas).

5.4.4 Determinação do Teor de Carbono Fixo

Segundo a NBR 8112, o teor de carbono fixo é calculado subtraindo-se de 100%, a soma dos teores de materiais voláteis e cinzas, de acordo com a Equação 4.

$$TCF = 100 - (TV + TC) \quad (4)$$

Na qual:

TCF: teor de carbono fixo (porcentagem);

TV: teor de voláteis (porcentagem);

TC: teor de cinzas (porcentagem).

5.5 Análise Imediata da Biomassa Carbonizada

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

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A tabela 2 apresenta os valores das eficiências encontradas de acordo com cada amostra. O forno foi posto em operação para produzir carvão por três vezes para obtermos valores mais consistentes e também para verificar sua funcionalidade, durabilidade e eficiência. Rendimento médio do protótipo para produção do carvão: 241,93 g; Tempo médio para completar a queima: 44,33 minutos; Média das eficiências: 14,34 %; Capacidade média de preenchimento de Biomassa no corpo do forno: 1,66 Kg.

Tabela 2 – Dados do protótipo de acordo com a biomassa.

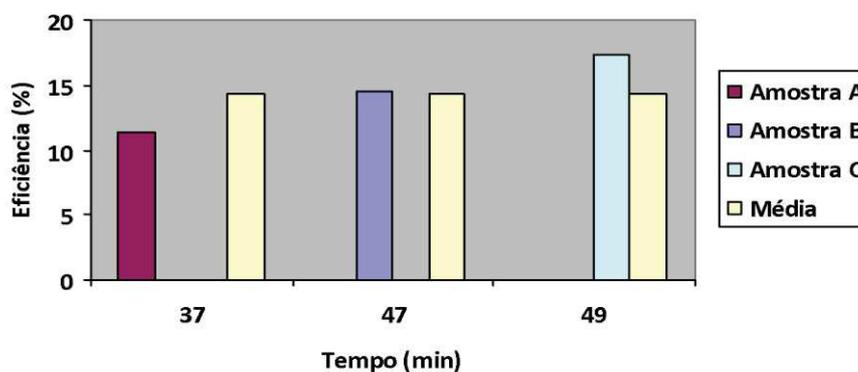
Amostra	Biomassa precursora (Kg)	Rendimento em carvão (g)	Eficiência (%)	Tempo (min)
A	1,515	170,78	11.28	37
B	1,700	245	14.42	47
C	1,790	310	17.32	49

Fonte: Autor

6.1 Eficiência do Protótipo em Relação ao Tempo de Queima

Valores das eficiências para as respectivas amostras são mostrados no gráfico 1, tendo em vista uma comparação com as médias das eficiências para uma melhor ou mais justa relativização, devido ao fato de terem sido utilizadas chaminés de tamanhos diferentes para verificar o que MCLAUGHLIN (2010) faz menção sobre essa peculiaridade.

Gráfico 1: Eficiência em relação ao tempo, comparando com a eficiência média.

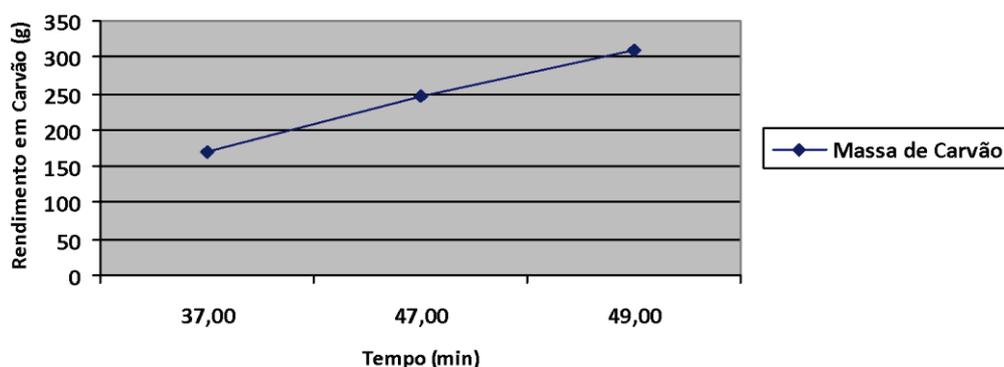


Fonte: Autor.

6.2 Variação de Rendimento em Relação ao Tempo

Vale salientar, para melhor compreender o dado apresentado, que o gráfico 2 teve esse referido comportamento por conta de o processo ser bastante empírico, exigindo, portanto, a necessidade de uma maior familiarização com as peculiaridades intrínsecas à operação do dispositivo. Não obstante, a tendência da reta no gráfico não é a de seguir ascendendo, pois é óbvio que haverá um ponto de inflexão, no qual, a partir desse valor, em que o rendimento é máximo, caso o forno continue em combustão, este estará gerando apenas cinzas e não mais carvão, refletindo, portanto numa redução do rendimento em carvão do forno. Em IMBROISI (2015) pode-se atestar o contexto do parágrafo exposto.

Gráfico 2: Rendimento em carvão (g), em relação ao tempo de queima.



Fonte: Autor

6.3 Discussão relativa aos resultados da fabricação do forno

Observa-se as eficiências um pouco distantes umas das outras em termos de valores, mas foi devido ao aprimoramento e a familiarização para com o processo que levaram a um melhor aproveitamento da capacidade em eficiência do forno. É preciso compreender que o tempo mencionado na tabela 2 é o tempo final para a efetiva transformação da Biomassa em carvão, ou seja, temperatura para o fim da pirólise, como conceitua Mclaughlin (2010). Enfatizando, isso significa dizer que para uma dada amostra do experimento realizado, caso deixe a combustão continuar, estará aumentando a quantidade de cinzas e, conseqüentemente, reduzindo a quantidade final de carvão, bem explicitado em IMBROISI (2015). Para a amostra A o processo foi bem mais rápido devido ao uso de uma

chaminé mais longa, o que proporciona uma velocidade de queima maior, segundo (MCLAUGHLIN, 2010).

Para as amostras B e C foi utilizada uma chaminé menor exatamente para verificar o que MCLAUGHLIN (2010) informa em sua tese. Consequente, para essas amostras foi usado um tubo de aço inox de menor tamanho, o que leva a melhor acompanhar o processo de pirólise, mas em compensação o tempo final aumenta. A temperatura não foi efetivamente acompanhada e registrada devido ao sensor de temperatura, o termômetro, não ter suportado a capacidade calorífica do forno, o qual superou a temperatura que o termômetro poderia registrar, a qual era de 350 °C. Mas, de acordo com (MCLAUGHLIN, 2010), a temperatura de final de pirólise alcança os 400 °C. Nesse processo de queima a necessidade de constante monitoramento do forno foi percebida, pois, após a biomassa ser completamente pirolisada, se transformando em carvão, o calor que permanece na unidade pode transformar toda biomassa em cinzas.

6.4 Análise imediata da biomassa in Natura e do carvão

Esta análise forneceu dados sobre o teor de umidade, material volátil, cinzas e carbono fixo dos resíduos em estudo, que na tabela 3 pode ser visualizada a média encontrada para estes teores.

Tabela 3 – Análise Imediata dos Resíduos

	Umidade (%)	Voláteis (%)	Cinzas (%)	Carbono fixo (%)
Biomassa in natura	11,88	74,53	3,40	22,08
Carvão	4,63	10,31	7,69	81,99

Fonte: Autor

O valor obtido para a umidade média (11,88 %) foi um pouco maior que dados da literatura científica (11.77%) mencionados por (PRADHAN *et al.*, 2009). A maior parte dos fornos TLUD funcionam melhor com uma umidade entre 10 a 20 % (CUMMER; BROWN, 2002).

Brand (2008) relata que a presença de umidade dificulta a combustão da biomassa já que o poder calorífico é reduzido, aumentando o consumo do combustível e consequentemente aumentando a poluição ambiental. Em se tratando de processo de

conversão termoquímicos da biomassa, Hoffman (2010) diz que um alto teor de umidade gera uma redução na eficiência do processo.

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.

Segundo Hoffmann (2010) um alto teor de cinzas leva a uma diminuição do poder calorífico e 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.

O teor de carbono fixo está relacionado à quantidade de cinzas e volátil, pois o mesmo representa a massa restante após a saída de compostos voláteis, excluindo as cinzas e teores de umidade esse demonstra a quantidade de calor gerado, sendo que quanto mais elevado for este percentual, mais lentamente o combustível irá queimar (VIEIRA, 2012).

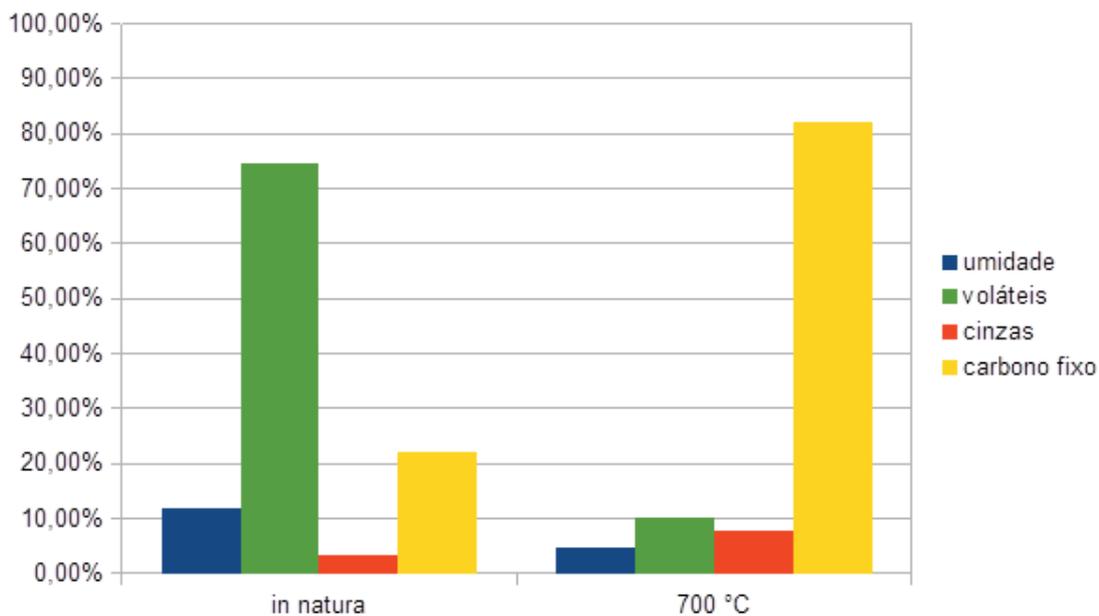
Pode ser observado que o material *in natura* apresentara características energéticas como teor de voláteis elevado e teor de carbono fixo baixo, com consequentes baixos rendimentos nos processos de geração de energia, uma das principais desvantagens da biomassa *in natura* para fins energéticos.

6.5 Comparação das Análises Imediatas em *in Natura* e Carbonizada

No gráfico 3 é possível verificar a análise imediata, *in natura* e carbonizada, na temperatura de 700 °C, conforme a Norma NBR 8112.

Os dados de análise imediata indicam uma tendência no teor de carbono fixo ascender com o aumento da temperatura de carbonização. Devido principalmente à expulsão dos componentes voláteis da Biomassa, ocorrendo uma concentração de carbono.

Gráfico 3: Comparação entre as Análises Imediatas



Fonte: Autor

Segundo Santos (2008) a faixa desejada de carbono fixo no carvão para uso siderúrgico está compreendida entre 75 e 80%, no entanto, maiores teores de carbono fixo contribuem para o aumento na produtividade dos altos-fornos para o mesmo consumo de redutor. De acordo com Santos (2008) o teor de matérias voláteis no carvão situa-se entre 20 e 25% e que porcentagens inferiores a 25% são desejadas para o uso siderúrgico.

7 CONCLUSÃO

Pela facilidade de operação e pela quantidade de energia gerada, a combustão direta da biomassa *in natura* pode ser adequada, desde que observada suas características, além da associação a tecnologia de conversão. Dentre as biomassas em estudo as propriedades do coco são boas, apresentando baixa umidade e cinzas que não comprometem a combustão.

O uso do carvão vegetal necessita de um investimento maior que o uso da biomassa *in natura* devido ao processo de carbonização. Contudo evidenciou que entre a biomassa *in natura* e carbonizada, o carvão apresenta uma maior vantagem na sua utilização para fins energéticos, devido a um maior teor de carbono fixo e menor teor voláteis. No entanto, a carbonização dos resíduos e o aumento da temperatura final de pirólise, também ocasionou um maior teor de cinzas nos resíduos. Teores de cinza elevados reduzem o poder calorífico da biomassa e eficiência de combustão podendo até comprometer o processo. No processo de carbonização observou-se que o teor de carbono fixo e cinzas aumentaram com a temperatura de pirólise, já teor de voláteis diminuiu.

O presente estudo demonstrou que é possível encontrar alternativas viáveis para certos problemas ambientais e que essas, não necessariamente, requerendo alto investimento. Pois, pôde-se atestar a perfeita forma em que foram aliados o baixo custo com o alto valor agregado no produto final obtido no estudo, dada a sua particularidade de emprego possível. Foram satisfatórios os resultados, visto que os objetivos foram alcançados e os testes e ensaios feitos comprovaram o que as bases literárias de referência forneciam de fundamento acerca do assunto.

Verifica-se a necessidade de apoiar sempre a ciência, a pesquisa e o estudo, pois esses são aliados importantíssimos da sociedade, pois influenciam diretamente a forma como o indivíduo pode interagir com as questões do meio em que vive.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.

ALMEIDA, Josimar Ribeiro de, 1950- **Gestão ambiental para o desenvolvimento sustentável** /Josimar Ribeiro de Almeida. - [2.reimp.]. - Rio de Janeiro, RJ: Thex, 2009.

BARCELLOS, D. C. **Caracterização do carvão vegetal através do uso de espectroscopia no infravermelho próximo.** 2007. Tese (Pós- Graduação em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, [S. l.], 2007.

BRAND, M. A. **Fontes de Biomassa para a Geração de Energia.** Disponível em: <http://www.solumad.com.br/artigos/201011171818441.pdf> . Acesso em: 24 de novembro de 2019.

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

CAMPOS, A. F.; MORAES, N. G. **Tópicos em energia: teoria e exercícios com respostas para concursos.** Rio de Janeiro: Synergia, 2012.

CARDOSO, Bruno Monteiro. **Uso da Biomassa como Alternativa Energética.** 2012. Trabalho de Conclusão de Cursos (Graduação em Engenharia Elétrica) - Escola Politécnica, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, [S. l.], 2012.

CAVALCANTI, C. **Desenvolvimento e natureza: Estudos para uma sociedade sustentável.** Cambridge: INPSO-FUNDAJ, Instituto de Pesquisas Sociais-Fundação Joaquim Nabuco, 1994.

CARMO, J. S. **Propriedades Físicas e Químicas do Carvão Vegetal Destinado à Siderurgia e Metalurgia.** 1988. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, [S. l.], 1988.

CAVALCANTI, C. **Desenvolvimento e natureza: Estudos para uma sociedade sustentável.** Cambridge: INPSO-FUNDAJ, Instituto de Pesquisas Sociais-Fundação Joaquim Nabuco, 1994.

COTTA, A. M. G. **Qualidade do Carvão Vegetal para Siderurgia.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, [S. l.], 1996.

CUMMER K.R., BROWN R.C: **Ancillary equipment for biomass gasification. Biomass and Bioenergy.** (2002)

DORRESTIJN, E., et al. **The occurrence and reactivity of phenoxy linkages in lignin and low rank coal.** Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, v. 54, n. 1, p. 153-192, 2000.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balço Energético Nacional 2019.** Rio de Janeiro: EPE, 2019.

FONSECA, A. D. **Biomass-to-liquids: uma contribuição ao estudo da obtenção de biocombustíveis sintéticos através da síntese Fischer-Tropsch.** 2009. 143p. Dissertação (Mestrado – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia). EP/FEA/IEE/IF da Universidade de São Paulo- USP, 2009.

GUARNIERI, Simone Francieli. **Alteração de Atributos do Solo Devido ao Emprego de Biocarvão de Frutos de Coco nucifera L.** / Simone Francieli Guarnieri. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Mato Grosso, Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Programa de Pós-Graduação em Agricultura Tropical, Cuiabá, 2016.

HOFFMAN, B.S. **O ciclo combinado com gaseificação integrada e a captura de CO₂ : uma solução para mitigar as emissões de CO₂ e m 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.

IMBROISI, B. A. **Uso de bambu nativo acreano Guadua weberbaueri Pilger para o desenvolvimento de um carvão funcional em sistema de baixo.** 2015. Dissertação (Mestre em Ciências: Área de Concentração: Ciência e Inovação Tecnológica) - Universidade Federal do Acre, [S. l.], 2015.

JOLY, Aylthon Brandão. **Botânica:** Introdução à taxonomia vegetal. 13 ed. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 2002. 777 p.

LABEGALINI, André. **Obtenção de biochar a partir da pirólise rápida da torta de pinhão manso: uso como adsorvente e suporte** / André Labegalini. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2013.

LEHMANN, J. et al. Biochar effects on soil biota: a review. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v. 43, n. 9, p. 1812-1836, Sept. 2011.

LEHMANN, J. **Bio-energy in the black: concepts and questions.** © Sociedade Ecológica da América. v. 5. Ed. 7, p. 381-387, Sept. 2007.

LORENZI, Harri *et al.* **Palmeiras brasileiras e exóticas cultivadas.** São Paulo: Instituto Plantarum de estudos da flora, 2004. 640 p.

MACEDO, L. A. (2012). **Influência da composição da biomassa no rendimento em condensáveis do processo de torrefação.** Dissertação de Mestrado em Ciências Florestais, Publicação PPGEFL.DM - 189/2012, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 49p.

MARABEZI, K. **Estudo sistemático das reações envolvidas na determinação dos teores de Lignina e Holocelulose em amostras de Bagaço e Palha de Cana-de- Açúcar.** 2009.

Dissertação (Mestre em Ciências Físico-Química.) - Universidade de São Paulo, [S. l.], 2009.

MCLAUGHLIN, H. **1G Toucan TLUD for Biochar Production**. Alterna Biocarbon Inc., January 2010 Version. Disponível em: https://www.biochar-international.org/wp-content/uploads/2018/04/1G_Toucan_TLUD_for_Biochar.pdf. Acesso em: 10 de Novembro de 2019.

MIRANDA, MR.S. (2017). **Investigação da pirólise de biomassas do cerrado para aplicação à sistemas de gaseificação estagiada**. Tese de Doutorado em Ciências Mecânicas, Publicação ENM DT-40/2017, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 170 p.

MORAIS, S. A. L., NASCIMENTO, E. A., MELO, D. C. Análise da Madeira de Pinus Carpa Parte 1 – **Estudo dos Constituintes Macromoleculares e Extrativos Voláteis**. SIF, Sociedade de Investigações Florestais, Revista Árvore, v. 29, n. 3, p. 461-470, 2005.

NOBLICK, Larry R. **Syagrus cearensis, a twin-stemmed new palm from Brazil**. *Palms*. v. 48, n. 2, 2004. p. 70-76.

NOLETO, R. A política Nacional da Sociobiodiversidade e a cadeia do babaçu. In: CARRAZZA, L. R.; SILVA, M. L.; ÁVILA, J. C. C. **Manual Tecnológico de Aproveitamento Integral do Fruto do Babaçu**. Instituto Sociedade, População e Natureza. Brasília – DF, p. 68, 2012.

OLIVEIRA, E. de. **Correlação Entre Parâmetros de Qualidade da Madeira e do Carvão de *Eucalyptus grandis***. 1988. Tese (Pós-Graduação em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, [S. l.], 1988.

OLIVEIRA, J. B. de., GOMES, P.A., ALMEIDA, M. R. **Propriedades do carvão vegetal**. In: **Carvão vegetal: destilação, carvoejamento, controle de qualidade**. Belo Horizonte – MG. Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais - CETEC. 173p. 1982.

PHILIPP, P; D'ALMEIDA, M.L. O. **Celulose e Papel. Volume I. Tecnologia de Fabricação da Pasta Celulósica**. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – Centro Técnico em celulose e papel. São Paulo, 1988, Segunda edição.

PINHEIRO, P. C. da C et al. **A produção de carvão vegetal: teoria e prática**. 1. Belo Horizonte: edição do autor, 2006.

ROWELL, R. M.; PETTERSEN, R.; HAN, J.S.; ROWELL, J. S.; TSHABALALA, M. A. **Cell Wall Chemistry**. Capítulo 03 do livro *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites*. Editado por Roger M. Rowell. Editora Taylor & Francis Group. New York, 2005.

ROY, C. **Os potenciais da bioeconomia: Da fotossíntese à indústria, da inovação aos mercados**. [S. l.: s. n.], 2018.

ROSA, R. A. **Qualidade do carvão vegetal para uso doméstico comercializado em três municípios do estado do espírito.** 2010. Trabalho de Conclusão de Cursos (Graduação em Engenharia Industrial Madeireira.) - UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO, [S. l.], 2010.

SANCHEZ, L. E. **Avaliação de impacto ambiental : conceitos e métodos** / Luis Enrique Sanchez. - : Oficina de Textos, 2008.

SANTOS, I. D. **Influência dos teores de lignina, holocelulose e extrativos na densidade básica e contração da madeira nos rendimentos e densidade do carvão vegetal de cinco espécies lenhosas do cerrado.** 2008. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade de Brasília, [S. l.], 2008.

SOUTO, Ana Carla Gonçalves. **Das folhas às vassouras : o extrativismo do catolé (Syagrus cearensis Noblick) pela população tradicional de Monte Alegre, Pernambuco, Brasil** / Ana Carla Gonçalves Souto. – Recife: O autor, 2014. 115 f. : il. ; 30cm.

SOUZA, Vinicius Castro; LORENZI, Harri. **Botânica Sistemática: Guia ilustrado para a identificação de famílias de Fanerógamas nativas e exóticas no Brasil, baseado em APG II.** 2 ed. São Paulo: Instituto Plantarum de Estudos da Flora, 2008. 703 p.

TRUGILHO, P. F.; SILVA, D. A. **Influência da temperatura final de carbonização nas características físicas e químicas do carvão vegetal de jatobá (Himenea courbaril L.).** Scientia agrária, La Rioja, v.2, n.1/2, p.45-53, 2001.

VAZ, S. **Uso dos Coprodutos e Resíduos de Biomassa para Obtenção de Produtos Químicos Renováveis.** [S. l.: s. n.], 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharias) - Universidade Federal de Uberlândia, 2010.

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

APÊNDICE

Figura10: Cálculo das análises imediatas

	Cálculo do Teor de Humidade (TU)		Cálculo do Teor de Matérias Voláteis (MV)		Cálculo do Teor de Cinzas (CZ)	
	Antes da Estufa	Após a Estufa	Antes da Muf	Após a Muf	Antes da Muf	Após a Muf
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
1ª Massa do Cadinho	57,7032	58,9718	58,9718	58,8344	58,8344	57,8254
Massa da Amostra	1,3377	1,2686	1,2686	1,1312	1,1312	0,1222
TU (%) =	5,1655		MV (%) =	10,8308	CZ (%) =	10,8026
2ª Massa do Cadinho	67,531	68,8253	68,8253	68,7017	68,7017	67,6055
Massa da Amostra	1,353	1,2943	1,2943	1,1707	1,1707	0,0745
TU (%) =	4,3385		MV (%) =	9,5495	CZ (%) =	6,3637
3ª Massa do Cadinho	64,3536	65,6052	65,6052	65,473	65,473	64,4498
Massa de Amostra	1,309	1,2516	1,2516	1,1194	1,1194	0,0962
TU (%) =	4,385		MV (%) =	10,5624	CZ (%) =	8,5938
Média (%) =	4,62967		Média (%) =	10,3142	Média (%) =	8,5867
4ª Massa do Cadinho	60,7683	61,9546	0	0	61,9546	60,8049
Massa da Amostra	1,3439	1,1863	0	0	1,1863	0,0366
TU (%) =	11,727		MV (%) =	0	CZ (%) =	3,0852
5ª Massa do Cadinho	60,07	61,2265	0	0	61,2265	60,109
Massa da Amostra	1,3073	1,1565	0	0	1,1565	0,039
TU (%) =	11,5352		MV (%) =	0	CZ (%) =	3,3722
5ª Massa do Cadinho	65,6173	66,7787	0	0	66,7787	65,6606
Massa da Amostra	1,3256	1,1614	0	0	1,1614	0,0433
TU (%) =	12,3868		MV (%) =	0	CZ (%) =	3,7282
Média (%) =	11,883		Média (%) =	0	Média (%) =	3,3952
7ª Massa do Cadinho	62,721	63,8875	63,8875	63,0235	0	0
Massa da Amostra	1,3305	1,1665	1,1665	0,3025	0	0
TU (%) =	12,3261		MV (%) =	74,0677	CZ (%) =	0
8ª Massa do Cadinho	61,1374	62,3143	62,3143	61,4235	0	0
Massa da Amostra	1,3346	1,1769	1,1769	0,2861	0	0
TU (%) =	11,8162		MV (%) =	75,6903	CZ (%) =	0
9ª Massa do Cadinho	60,227	61,3917	61,3917	60,5318	0	0
Massa da Amostra	1,3263	1,1647	1,1647	0,3048	0	0
TU (%) =	12,1842		MV (%) =	73,8301	CZ (%) =	0
Média (%) =	12,1088		Média (%) =	74,5294	Média (%) =	0
Teor de Carbono Fixo Carvão (CF) = 81,0990 %			Teor de Carbono Fixo Biomassa (CF) = 22,07543 %			

Fonte: Autor.