

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

**CÁSSIA ROBERTA PONTES SILVA**

BIOMASSA GERADA A PARTIR DA *TERMINALIA CATAPPA* L. (CASTANHEIRA):  
ESTUDO DO SEU POTENCIAL ENERGETICO

Maceió

2012

**CÁSSIA ROBERTA PONTES SILVA**

BIOMASSA GERADA A PARTIR DA *TERMINALIA CATAPPA* L. (CASTANHEIRA):  
ESTUDO DO SEU POTENCIAL ENERGETICO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Alagoas para obtenção de título de Mestre em Engenharia Química.

**Orientadora:** Prof<sup>a</sup> Dra. Simoni Plentz Meneghetti

**Co-Orientador:** Prof<sup>o</sup> Dr. Mario Roberto Meneghetti

Maceió

2012

**Catálogo na fonte**  
**Universidade Federal de Alagoas**  
**Biblioteca Central**  
**Divisão de Tratamento Técnico**  
**Bibliotecária: Fabiana Camargo dos Santos**

S586b Silva, Cássia Roberta Pontes.  
Biomassa gerada a partir da *Terminalia catappa* L. (castanheira): estudo do seu potencial energético / Cássia Roberta Pontes Silva. -- 2012.  
54 f. : il., tabs., grafs.

Orientadora: Simoni Margareti Plentz Meneghetti.  
Co-orientador: Mario Roberto Meneghetti.  
Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2012.

Bibliografia: f. 51-54.

1. Biomassa. 2. Biodiesel. 3. Poder calorífico. 4. Castanhola - Óleo. I. Título.

CDU: 662.7

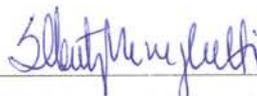
Cássia Roberta Pontes Silva

BIOMASSA GERADA A PARTIR DA TERMINALIA CATAPPA L.  
(CASTANHEIRA): ESTUDO DO SEU POTENCIAL ENERGÉTICO

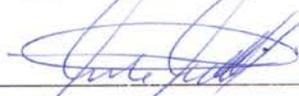
Dissertação apresentada à Universidade  
Federal de Alagoas, como requisito para a  
obtenção do Título de Mestre em Engenharia  
Química

Aprovada em: Maceió, 23 de março de 2012.

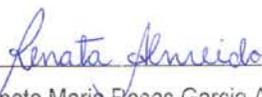
**BANCA EXAMINADORA**



Profª. Drª. Simoni Margareti Pientz Meneghetti  
(Orientadora – PPGEQ/UFAL)



Prof. Dr. Mario Roberto Meneghetti  
(Coorientador - PPGEQ/UFAL)



Profª. Drª. Renata Maria Rosas Garcia Almeida  
(PPGEQ/UFAL)



Prof. Dr. Paulo Anselmo Ziani Suarez  
(IQ/UnB - Membro Externo)



## RESUMO

Num país de imensa extensão territorial e com um grande potencial agrícola como o Brasil, um dos maiores desafios é desenvolver matrizes energéticas a partir de fontes alternativas de baixo custo, tornando-as competitivas economicamente. Diante desta situação, vários órgãos de pesquisa do país têm se esforçado para desenvolver novas alternativas e, entre as diversas possibilidades, destaca-se a utilização de resíduos de biomassa para geração de energia através da queima. A *Terminalia Catappa L.* conhecida popularmente por castanheira é uma espécie adaptável a todas as regiões do Brasil, o que a tornar uma fonte viável de biomassa. Nesse trabalho, avaliamos a qualidade de algumas partes da castanheira (folha, amêndoa, galho, torta) para fins energéticos tanto na sua forma *in natura* quanto na forma de briquetes. As amostras foram trituradas logo após serem coletadas e foram realizadas as seguintes caracterizações físico-químicas: poder calorífico superior, teor de cinzas, umidade e densidade. O poder calorífico observado para a espécie estudada apresentou valores entre 13 643 J/g a 18 842 J/g, destacando-se a torta da castanhola por apresentar maiores quantidades de energia disponível tanto na sua forma *in natura* com valores de 18 620 J/g quanto como briquetes com valores de 18 842 J/g, valores que são considerados satisfatórios para biomassas residuais. O teor de cinzas das amostras apresentou valores entre 2,89 % a 6,54 % seja para amostra *in natura* quanto na forma de briquetes valores que são considerados aceitáveis, não havendo perdas consideráveis de material inerte. A umidade das espécies analisadas variou entre 3,76 % a 15,01 % esses resultados indicam que a amostra pode ser queimada sem necessidade de nenhum processo de secagem, promovendo maior ganho energético para os processos a ser empregado. Os resultados sugerem a potencialidade do uso das varias partes da planta para geração de energia, através da queima. Complementarmente, óleo foi extraído das amêndoas obtendo-se um rendimento de aproximadamente 50 % de óleo e suas propriedades e potencialidade para a produção de biodiesel metílico e etílico foram avaliados. Os resultados demonstraram que o biodiesel etílico e metílico obedece às leis de produção de biodiesel determinado pela ANP N° 7.

Palavras Chave: Biomassa. Poder calorífico. Biodiesel.

## ABSTRACT

In a country of vast land area and a large agricultural potential such as Brazil, one of the biggest challenges is to develop arrays of energy from alternative sources of low cost, making them economically competitive. In this situation, several research institutions of the country have struggled to develop new alternatives, and among the various possibilities, we highlight the use of biomass residues for power generation by burning. The *Terminalia catappa L.* popularly known as walnut is a species adapted to all regions of Brazil, which make it a viable source of biomass. In this study, we evaluated the quality of some parts of the nut for energy purposes. The samples were crushed immediately after being collected and were made the following physico-chemical characterizations: gross calorific value, ash content, moisture and density. The calorific value observed for the species studied had values between 13 643 J / g to 18 842 J / g, especially if Pie castanets due to the higher amounts of available energy both in its fresh form with values of 18 620 J / g or as briquettes with values of 18 842 J / g, values that are considered satisfactory for biomass waste. The ash content of the samples had values between 2.89% to 6.54% for the sample is fresh and in form of briquettes values that are considered acceptable, with no losses of inert material. The humidity of the species studied ranged from 3.76% to 15.01% these results indicate that the sample can be burned without any drying process, promoting greater energy gain for the processes to be employed. The results suggest the potential use of the poles parts of the plant for power generation by burning. In addition, oil is extracted from almonds obtaining a yield of approximately 50% of oil and its properties and potential for the production of biodiesel were evaluated methyl and ethyl. The results showed that biodiesel and methyl ethyl obey the laws of biodiesel production determined by ANP No. 7.

Keywords: Biomass. Calorific value. Biodiesel.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus por ter me dado força e coragem para concluir meu curso mesmo com todas as dificuldades que tive ao longo de todo trajeto.

A minha mãe, meu pai, irmão, tios, tias, primos e primas, sogra e cunhados por ter torcido muito pela minha vitória.

A meu esposo João Paulo por todas as horas de companheirismo, incentivo e compreensão. Ao meu filho João Victor por todas as alegrias.

A minha orientadora Prof<sup>a</sup>. Dra. Simoni Plentz Meneghetti pelo empenho em transmitir seus conhecimentos.

Ao LASSOP por ter cedido à prensa para extração do óleo e a todos que ajudaram na extração do óleo.

Ao Paulo (da carroça) por ter feito a coleta e retirada da amêndoa, sua ajuda foi de extrema importância, sem o qual eu não teria terminado esse projeto.

Ao LMC (Laboratório de Materiais e Combustíveis) da Universidade de Brasília, pelos ensaios de caracterização do biodiesel.

A Janaína por ter ajudado nas análises de composição do óleo, e a sua paciência para tirar todas as dúvidas que tive durante o projeto.

Aos meus amigos: Andréa Claudia, Maria dos Prazeres, Bruno, Maria Beatriz, Yariadner, Luiz Carlos, Paulinha, Jailma, Felipe Lins, Jeilma, Mikael, Roberta, Jesús, Francisco, Edgar, Jhosy, Mayra, Nereu, Raiane e a todos que contribuíram direto e indiretamente com minha conquista.

Agradeço também com todo amor a Jaqueline, Marcio, Esdras, Lane, Anastácio, Pedrinho pela força, carinho e confiança.

A CAPES pelo suporte financeiro.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Oferta interna de energia no Brasil.....	14
Figura 2 - Esquema do processo de gaseificação.....	17
Figura 3 - Biomassa compactada. ....	19
Figura 4 - Foto da biomassa na forma de fardos.....	19
Figura 5 - Potencial de geração de energia elétrica a partir de biomassa.....	21
Figura 6 - Esquema da transesterificação de um triglicerídeo com metanol.....	24
Figura 7 - Mecanismo de esterificação de ácidos graxos.....	25
Figura 8 - Foto da castanhola.....	28
Figura 8 - Foto das folhas e frutos da castanheira.....	28
Figura 10 - Morfologia da folha da <i>Terminalia Catappa</i> L.....	29
Figura 11 - Calorímetro, IKA <sup>®</sup> -C200.....	32
Figura 12 - Prensa hidráulica utilizada na extração do óleo da castanhola.....	33
Figura 13 - Foto das amostras após queima na mufla a 710°C.....	41
Figura 14 - Poder Calorífico Superior de resíduos ligno-celulósico.....	42

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Medidas da densidade da folha, polpa, pecíolo da folha e casca da castanhola.....	38
Tabela 2 - Resultados da umidade da castanhola.....	39
Tabela 3 - Teor de Cinzas da Castanhola.....	40
Tabela 4 - Poder Calorífico Superior da Castanhola.....	42
Tabela 5 - Poder Calorífico Inferior da Castanhola.....	44
Tabela 6 - Composição em ácido graxo do óleo da <i>Terminalia Catappa</i> L. e do óleo de soja.....	44
Tabela 7 - Propriedades físico-químicas do óleo da <i>Terminalia Catappa</i> L. e do óleo de soja.....	45
Tabela 8 - Propriedades do biodiesel metílico e etílico, obtidos a partir do óleo da <i>Terminalia Catappa</i> L.....	46

## SÚMARIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>11</b>
<b>2 OBJETIVOS.....</b>	<b>13</b>
2.1 Gerais.....	13
2.2 Específicos.....	13
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>14</b>
3.1 Matriz energética do Brasil.....	14
3.2 Classificação da biomassa.....	15
3.3 Aproveitamento da Biomassa.....	15
3.3.1 Combustão direta.....	16
3.3.2 Gaseificação.....	16
3.3.3 Pirólise.....	18
3.3.4 Transesterificação.....	18
3.3.5 Compactação.....	18
3.3.6 Briquetes.....	20
3.4 Biomassa no Brasil.....	20
3.4.1 Etanol.....	21
3.4.2 Resíduos Agroindustriais.....	22
3.4.3 Carvão Vegetal.....	23
3.4.4 Biodiesel.....	23
3.4.5 Obtenção de biodiesel por reação de transesterificação/esterificação.....	23
3.5 Utilização de biomassa em fornos cerâmicos.....	26
3.6 Castanhola.....	28
<b>4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>30</b>
4.1 Procedimentos gerais.....	30
4.2 Caracterizações físico-químicas da biomassa de castanhola.....	31

<b>5 EXTRAÇÃO DO ÓLEO.....</b>	<b>33</b>
<b>5.1 Caracterização do óleo e do biodiesel etílico e metílico.....</b>	<b>34</b>
5.1.1 Viscosidade.....	34
5.1.2 Massa Específica.....	35
5.1.3 Índice de acidez em ácido oleico.....	35
5.1.4 Estabilidade oxidativa.....	35
5.1.5 Corrosividade ao cobre.....	36
<b>5.2 Reação de obtenção do biodiesel etílico/metílico.....</b>	<b>36</b>
<b>5.3 Rendimento do biodiesel.....</b>	<b>37</b>
<b>5.4 Determinação em ácido graxo do óleo da <i>Terminalia Cattapa</i> L.....</b>	<b>37</b>
<b>6 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>38</b>
<b>6.1 Densidade.....</b>	<b>38</b>
<b>6.2 Teor de umidade.....</b>	<b>39</b>
<b>6.3 Teor de cinzas.....</b>	<b>40</b>
<b>6.4 Poder calorífico superior (PCS).....</b>	<b>41</b>
<b>6.5 Caracterizações físico-química do óleo.....</b>	<b>44</b>
<b>6.6 Parâmetros físico-químicos do biodiesel etílico e metílico.....</b>	<b>46</b>
<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>49</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>50</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de um país está relacionado ao aumento do consumo energético (GONÇALVES *et al*, 2009). A geração de energia a partir do uso de matérias-primas renováveis, dentre elas a biomassa, vem despertando grande interesse devido não somente às crescentes exigências relacionadas à preservação do meio ambiente, como também pelos seus custos que tendem a se tornar cada vez mais competitivo.

A demanda por energia vem apresentando um aumento elevado no mundo seja pelo crescimento acelerado dos países em desenvolvimento e seu número de habitantes, seja pela mudança de hábitos que as tecnologias modernas têm proporcionado às populações de países desenvolvidos e em desenvolvimento. Este fato se acentua se levarmos em consideração as instabilidades políticas e sociais dos países produtores de petróleo, cujas reservas, dentro de algumas décadas, tendem a diminuir. A questão da sustentabilidade da biomassa é de especial importância nos países em desenvolvimento. Em muitos países a biomassa tradicional é a fonte de energia mais utilizada para cozimento e aquecimento de ambientes (GUARDABASSI, 2006).

Do ponto de vista energético, biomassa é todo recurso renovável proveniente de matéria orgânica (de origem animal, vegetal ou microbiana) que pode ser utilizada na produção de energia, isto é, biomassa é qualquer matéria bruta derivado de organismos que estiveram vivos recentemente. Excluímos dessa forma os combustíveis fósseis que para sua conversão em energia necessitam de milhares de anos. Assim como nos combustíveis fósseis, a energia contida na biomassa é energia química associada com os átomos de oxigênio, carbono e hidrogênio, tal reação se dá pelo processo de fotossíntese e os organismos fotossintetizantes assimilam cerca de 0,1 % a 3,0 % da energia solar incidente que pode ser convertida em combustível sintético (CENBIO, 2010).

A energia de biomassa pode substituir o petróleo tanto para produção de energia elétrica quanto para mover o setor de transporte e quando produzida de forma sustentável essa fonte de energia trás grandes benefícios, incluindo reduções de níveis de emissões de CO<sub>2</sub>, controle de resíduos, entre outros, sendo desta forma mais vantajoso que os combustíveis fósseis do ponto de vista econômico. No Brasil, muitos dos equipamentos para a conversão de biomassa em energia são de fabricação nacional, evitando assim gastos com importações e poupando contratempos com situações de crise mundial tão freqüente (CORTEZ, 2008).

Consumido especialmente por indústrias siderúrgicas, a energia derivado da biomassa florestal, como carvão vegetal e lenha tornam o Brasil o pioneiro na produção de energia renovável. A energia originada pela combustão do carvão vegetal representa 30% do consumo energético brasileiro. Entre as vantagens do seu consumo, enfatizamos o fato de ser um combustível renovável com pouco impacto sobre o efeito estufa, contudo é preciso que haja normas quanto a seu uso para que não contribua com o processo de desmatamento. Dessa forma o Brasil é apontado pelos especialistas como o país com maior potencial de projetar-se como líder no mercado bioenergético devido a sua localização geográfica, e seu nível de adaptação de espécies florestais a praticamente todas as regiões do país. Tais fatores são decisivos para alta produção e produtividades de biomassa florestal, contribuindo assim para a geração de empregos, pois sua produção pode ser feita por pequenos e médios proprietários rurais (EMBRAPA, 2009).

Esse trabalho tem como objetivo o estudo de fontes alternativas de energia que possam ser competitivas no mercado e que sejam oriundas de uma fonte renovável, diminuindo assim as emissões de gases poluentes que produzem o efeito estufa.

Neste trabalho a espécie *Terminalia Catappa* L., conhecida popularmente como castanhola ou castanheira, foi avaliada como fonte de biomassa para produção de energia. Nesse contexto, várias partes da planta foram caracterizadas (através da determinação do teor de cinzas, densidade, poder calorífico superior e umidade) visando seu emprego como matéria-prima energética. Além disso, o óleo extraído da amêndoa foi avaliado como potencial matéria-prima para a obtenção de biodiesel.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 GERAIS:

O objetivo geral desse trabalho é realizar um estudo de alternativas viáveis economicamente e ambientalmente em termos de biomassa residual, utilizando como matérias-primas várias partes da planta *Terminalia Catappa* L. (castanhola), visando sua utilização para geração de energia, no Estado de Alagoas, preferencialmente no setor cerâmico.

### 2.2 ESPECÍFICOS:

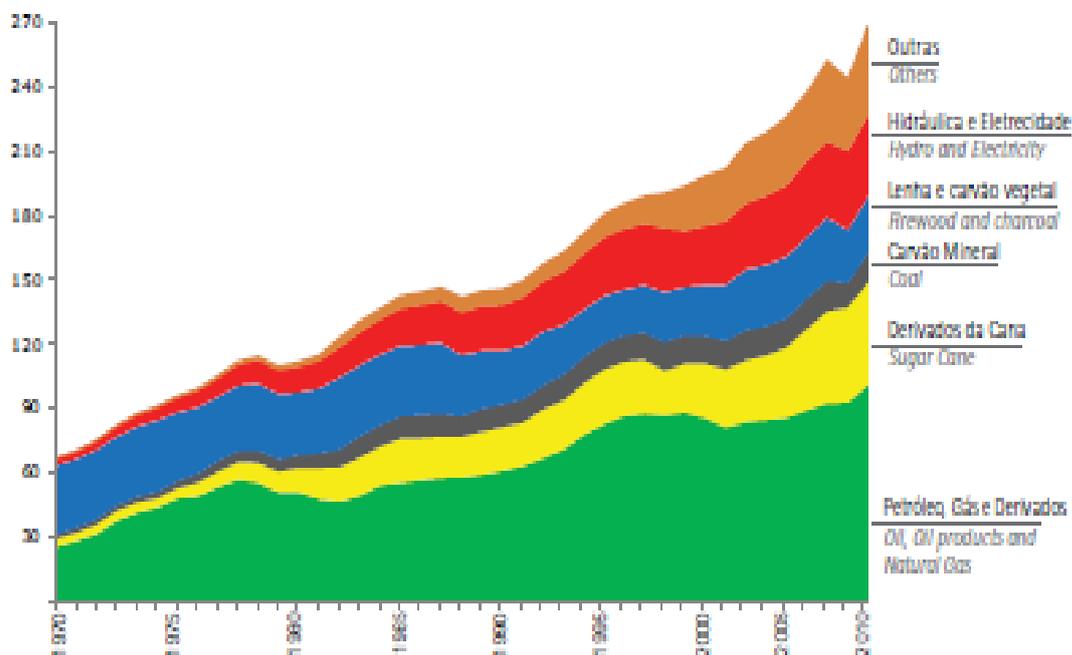
- 1) Amostragem das várias partes da planta da *Terminalia Catappa* L ;
- 2) Realização de estudo físico-químico das várias partes da planta, antes e após compactação (briquetagem);
- 3) Estudo da granulometria, para determinar melhor forma de transporte e armazenamento;
- 4) Estudo de formas de briquetagem em escala piloto;
- 5) Obtenção do biodiesel por esterificação seguida de transesterificação, empregando rota metílica e etílica, a partir do óleo da amêndoa da castanhola;
- 6) Caracterização do biodiesel obtido.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 MATRIZ ENERGÉTICA DO BRASIL

O Brasil é considerado um dos países com maior potencial energético do mundo, por apresentar uma diversidade em matéria prima para produção de energia. Na Figura 1 pode-se observar a oferta interna de energia no Brasil.

**Figura 1:** Oferta interna de energia no Brasil.



**Fonte:** Empresa de pesquisa energética, 2010.

Em 2010 a geração de energia hidráulica contribui com 14 % da energia interna do país, enquanto o gás natural em crescimento representou 10,3 %. A energia nuclear com as usinas Angra I e II participou com 1,4 %. O carvão mineral e seus derivados participaram com 5,2 %. Pode-se verificar que na oferta de energia interna, há percentuais expressivos provenientes de biomassa como os derivados da cana-de-açúcar, a lenha e o carvão vegetal participando com 27,5 % e de derivados do petróleo contribuindo com 37,6 % de energia (EMPRESA DE PESQUISA ENERGETICA, 2010).

### 3.2 CLASSIFICAÇÃO DA BIOMASSA

Karekesi *et al* (2005) classifica a tecnologia de utilização da biomassa em três categorias São elas:

- Tecnologias tradicionais de uso da biomassa: combustão direta de madeira sem processamento, lenha, carvão vegetal, resíduos agrícolas, resíduos de animais e urbanos, para cocção, secagem e produção de carvão.
- Tecnologias “aperfeiçoadas” de uso da biomassa: tecnologias aperfeiçoadas e mais eficientes de combustão direta de biomassa, tais como fogões e fornos.
- Tecnologias modernas de uso da biomassa: tecnologias avançadas de conversão de biomassa em eletricidade e o uso de biocombustíveis.

Por ser um combustível barato e de fácil aquisição à biomassa tradicional é utilizada como fonte de energia primária por cerca de 2,4 bilhões de pessoas em países subdesenvolvidos e em desenvolvimento (IEA, 2002). Nesses países a biomassa é de suma importância para geração de energia e desenvolvimento socioeconômico, bem como a diminuição de níveis de poluição, melhoria na qualidade de vida e geração de emprego e renda (CENBIO, 2010).

O uso da biomassa é freqüente em países da África Subsaariana, correspondendo de 70 % - 90 % da oferta de energia total fornecida. Na Ásia a utilização da biomassa também é evidente onde cerca de 80 % da população rural e 20 % da urbana utiliza biomassa para cocção (KAREKESI, 2005). Avaliamos que a biomassa é de fato uma importante fonte de energia para esses países, sendo necessário apenas um aperfeiçoamento no modo como esse combustível é processado por meio de tecnologias eficientes que possa trazer desenvolvimento econômico e diminuição nos impactos ambientais.

Nogueira (2005) classifica a biomassa pela relação entre oferta e demanda assim a relação consumo/extração pode ser maior do que a capacidade de regeneração da floresta tornando seu uso mais difícil, uma vez que existem critérios para sua sustentabilidade que envolve aspectos sociais, econômicos e ambientais.

### 3.3 APROVEITAMENTO DA BIOMASSA

O aproveitamento da biomassa pode ser feito por diversas formas, desde a combustão direta (com ou sem processos físicos de secagem, classificação, compressão, etc.),

processos termoquímicos (gaseificação, pirólise, liquefação e transesterificação) ou de processos biológicos (fermentação e digestão anaeróbica).

Na presente revisão iremos focar em algumas das principais formas de aproveitamento e beneficiamento de biomassa, que são: compactação (briquetagem, peletização e enfardamento), gaseificação, pirólise, transesterificação e combustão direta em caldeiras.

### **3.3.1 Combustão direta**

Combustão é a transformação da energia química dos combustíveis em calor, por meio das reações dos elementos constituintes com o oxigênio fornecido. Para fins energéticos, a combustão direta ocorre essencialmente em fogões, fornos e caldeiras. Embora muito prático e às vezes conveniente, o processo de combustão direta é normalmente muito ineficiente. Outro problema da combustão direta é a alta umidade e a baixa densidade energética do combustível o que dificulta o seu armazenamento e transporte (ANEEL, 2010).

Existem muitas vantagens na utilização da biomassa diretamente como combustível, por exemplo, as reduzidas emissões de poluentes. Por exemplo, o conteúdo de enxofre em biomassas, geralmente, é baixo, ocorrendo baixas emissões de  $\text{SO}_2$  na combustão. As emissões de  $\text{CO}_2$ , liberadas durante a queima de biomassa, podem ser consideradas praticamente nulas, pois esse gás pode ser reabsorvido no próximo ciclo de vida da planta, no processo de fotossíntese. Além disso, a madeira contém pouca cinza (1% ou menos) o que reduz a quantidade de cinza que precisa ser disposta no meio ambiente, em comparação ao carvão mineral. Entretanto, deve ser observado que em comparação com combustíveis fósseis, biomassas contêm muito menos carbono e mais oxigênio e, como consequência, tem um baixo poder calorífico (COSTA, 2002).

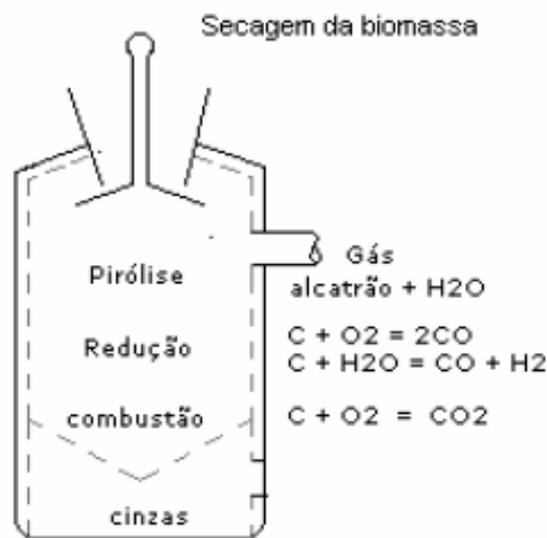
### **3.3.2 Gaseificação**

A gaseificação é um processo exotérmico em que combustível sólido, como por exemplo, a biomassa, é convertida em gás de baixa ou média capacidade calorífica. Os gaseificadores de leito fixo e fluidizado são os mais indicados para sistemas de produção de energia a partir de biomassa. O oxidante para o processo de gaseificação pode ser o ar atmosférico ou oxigênio puro. Os sistemas que utilizam oxigênio puro permitem produzir um gás de maior capacidade calorífica, sendo também mais rápida a sua produção, no entanto, os custos de produção aumentam devido a necessidade de oxigênio puro. A gaseificação oferece

vantagens como: alta eficiência térmica, a energia produzida pela queima dos gases é limpa, os grãos não são contaminados por fumaça ou gases, a demanda por energia pode ser controlada, e conseqüentemente a taxa de gaseificação pode ser controlada. (SILVA, et al, 2004). Apesar do fato da gaseificação apresentar vantagens significativas sobre a queima direta da biomassa, algumas desvantagens podem ser levadas em consideração, tal como manter um cuidado especial com a limpeza dos gases.

O processo de gaseificação ocorre normalmente em quatro etapas físico-químicas distintas, Figura 2, com temperaturas de reação diferentes:

**Figura 2:** Esquema do processo de gaseificação.



**Fonte:** ucsnews.ucs.br.

- *Secagem da biomassa:* apresenta um controle de temperatura para garantir a secagem da biomassa e não a sua decomposição.
- *Pirólise:* é a decomposição química por calor na ausência de oxigênio. O processo consiste da trituração dos resíduos que deverão ser previamente selecionados. Após esta etapa, os resíduos serão destinados ao reator pirolítico, onde por meio de uma reação endotérmica ocorrerão as separações dos subprodutos em cada etapa do procedimento que fornecem a energia necessária para os processos seguintes. As reações de pirólise começam a ocorrer a temperaturas em torno de 400 °C.
- *Combustão:* combinação de uma fonte combustível com o oxigênio, sendo esse processo em geral exotérmico e auto - sustentável. A reação de combustão ocorre em torno de 900 e 1300°C.

- *Redução*: Os gases quentes da zona de combustão passam em seguida para a zona de redução, sempre adjacente, acima ou abaixo, onde na ausência de oxigênio ocorre o conjunto de reações típicas que originam os componentes combustíveis do gás produzido.

### 3.3.3 Pirólise

Pirólise ou carbonização é o mais simples e mais antigo processo de conversão de um combustível (normalmente lenha) em outro de melhor qualidade e conteúdo energético (carvão, essencialmente). O processo consiste em aquecer o material original (normalmente entre 300°C e 500°C), na “quase-ausência” de ar, até que o material volátil seja retirado. O principal produto (carvão) tem uma densidade energética duas vezes maiores que aquela do material de origem e queima em temperaturas muito mais elevadas. (ANEEL, 2005).

A relação entre a quantidade de lenha (material de origem) e a de carvão (principal combustível gerado) varia muito, de acordo com as características do processo e o teor de umidade do material de origem. Em geral, são necessárias de quatro a dez toneladas de lenha para a produção de uma tonelada de carvão. Se o material volátil não for coletado, o custo relativo do carvão produzido fica em torno de dois terços daquele do material de origem (considerando o conteúdo energético).

### 3.3.4 Transesterificação

Transesterificação é um processo químico que consiste na reação de óleos e gorduras de origem animal e vegetal na presença de pequenas quantidades de álcool, tal como metanol ou etanol, produzindo uma mistura de ésteres etílicos ou metílicos (biodiesel) e glicerol. Esta reação pode ser catalisada por enzimas ou ácidos e bases de Bronsted. O biodiesel tem características físico-químicas semelhantes ao do óleo diesel, portanto pode ser usado em motores de combustão interna de uso veicular ou estacionário (MENEGHETTI *et. al*, 2008).

### 3.3.5 Compactação

O principal objetivo da compactação é fazer a aglomeração de partículas de pequenas dimensões, onde se produzirá um sólido com uma forma geométrica definida e dimensões especificadas para determinadas aplicações.

A compactação mostrada na Figura 3 tem a função de aumentar a densidade desses resíduos, proporcionando um formato geométrico desejado e ocasionando menores custos de manuseio, possuindo um poder calorífico maior que na forma da biomassa não compactada, com isso teremos uma eficiência energética na utilização como combustível.

Uma forma eficiente de concentrar energia disponível da biomassa é transformá-la em briquetes, 1,00 m<sup>3</sup> de briquete contém pelo menos 5 vezes mais energia que a mesma quantidade deste resíduo in natura (QUIRINO, 2005).

**Figura 3:** Biomassa compactada.



**Fonte:** agropetrobras.com.br.

Outra forma de compactação de biomassa é o enfardamento visto na Figura 4, no qual o resíduo é comprimido e amassado elevando sua densidade, não exige pré-tratamento do material sendo aconselhado o enfardamento após a secagem.

**Figura 4:** Foto da biomassa na forma de fardos.



**Fonte:** teoriadotudoedonada.com.br.

### 3.3.6 Briquetes

A briquetagem consiste no processo de densificação do resíduo através da compactação utilizando uma prensa. Os resíduos passam por homogeneização, tanto da composição quanto do tamanho de partícula, adição de um aglomerante, quando necessário, e compactação, resultando em um sólido com características combustíveis mais definidas. No caso da casca de arroz, com a sua baixa densidade a granel, o processo de briquetagem é fundamental, pois evita problemas no sistema de alimentação (COSTA, *et. al*, 2002).

O método de briquetagem é definido pela finalidade do combustível e depende das características da biomassa a ser compactada, se em estado *in natura* ou carbonizada (GONÇALVES, 2009).

Os briquetes são produzidos a partir de qualquer biomassa vegetal, matéria-prima que deve ser processada por uma briquetadeira, máquina com capacidade para processar entre 50 e 1000 kg/h de resíduos.

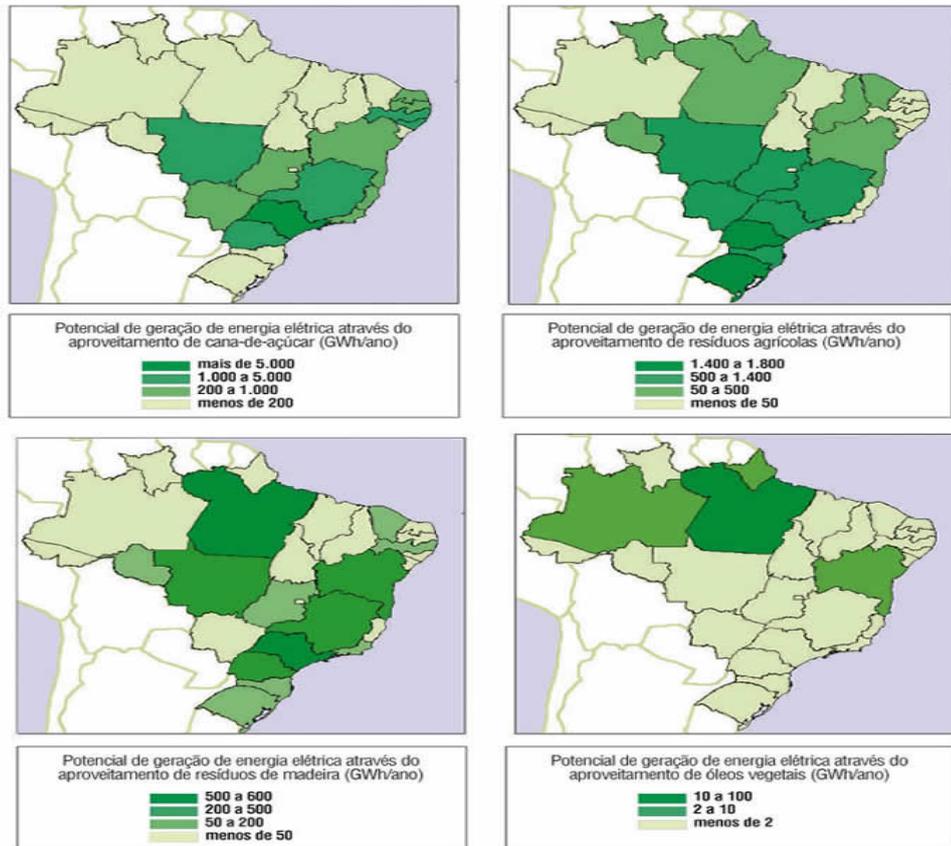
A briquetagem é uma das alternativas tecnológicas para o melhor aproveitamento dos resíduos de biomassa, consistindo num processo de trituração e compactação que utiliza elevadas pressões para transformar os referidos resíduos em blocos denominados de briquetes, os quais possuem melhor potencial de geração de calor (energia) em relação aos resíduos *in natura* (JUNIOR, *et al*, 2003).

## 3.4 BIOMASSA NO BRASIL

No Brasil, a produção de álcool, queima em fornos, caldeiras, e outros oferecem um grande potencial para produção de energia, gerando no setor sucroalcooleiro uma grande quantidade de resíduos, que pode ser aproveitada na produção de energia elétrica. A produção da madeira, em forma de lenha, carvão vegetal ou toras também gera uma grande quantidade de resíduos, que pode igualmente ser aproveitada na geração de eletricidade (ANEEL, 2010).

A quantidade de energia aproveitável a partir da extração vegetal é função do poder calorífico desses resíduos, como mostrado na Figura 5 os estados brasileiros de maior potencial de aproveitamento de resíduos de madeira para geração de energia elétrica são os estados do Pará e São Paulo. Os resíduos agrícolas também apresentam grande potencial energético, dando destaque especial as Regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste, com destaque para os estados do Paraná e Rio Grande do Sul, como pode ser visto na Figura 5.

**Figura 5:** Potencial de geração de energia elétrica a partir de biomassa



Fonte: CENBIO 2000

A seguir veremos algumas das principais fontes de biomassa utilizadas no Brasil para produção de energia.

### 3.4.1 Etanol

O etanol é utilizado como combustível no Brasil desde meados da década de 1970, quando foi instituído pelo governo federal, por meio da Lei nº 76.593, o Programa Nacional do Álcool, o Proálcool. A partir daí investimentos e desenvolvimento tem feito com que as produtividades agrícolas e industriais tenham se elevado continuamente (CENBIO, 2010).

A produção e o uso do etanol no Brasil são hoje o melhor exemplo da introdução de energia renovável com uma escala de grande produção, que exigiu um grande avanço em desenvolvimento tecnológico nos últimos trinta anos. (MACEDO, 2007). O uso deste biocombustível em grande escala tem somado esforços para redução das emissões de gases de efeito estufa, oferecendo uma alternativa renovável ao uso do petróleo (MACEDO, 2007).

O Brasil deverá processar 602 milhões de toneladas de cana-de-açúcar na temporada 2012/13, em um aumento de 5,4 por cento em relação às 571,5 milhões de toneladas do ano anterior, apontou a Companhia Nacional de Abastecimento (Conab) em sua primeira estimativa para o atual ciclo. A moagem de cana da região Centro-Sul, principal região produtora do país, deverá ser de 532 milhões de toneladas, 6,1 por cento maior que a produção da safra anterior. A produtividade média brasileira foi estimada em 70,3 kg por hectare, 2,9 por cento maior que na safra 2011/12, que foi de 68,3 kg por hectare. Já a produção total de etanol (anidro e hidratado) foi estimada em todo o país em 23,96 bilhões de litros, versus 22,9 bilhões de litros da temporada 2011/12 (MONTEIRO, 2012).

O processo de produção de energia elétrica está baseado na queima do bagaço de cana, que por sua vez produz vapor de alta pressão e alta temperatura para alimentar turbo-geradores de energia elétrica. Parte desse vapor pode ser extraída a uma pressão menor, para acionamento das moendas e outros equipamentos. Para que possam operar ao longo de todo o ano, uma alternativa é o armazenamento de biomassa ou, então, o uso de um combustível complementar como as palhas e pontas da cana-de-açúcar.

### 3.4.2 Resíduos agroindustriais

Toda a produção agroindustrial, como por exemplo, a fabricação de açúcar e álcool, gera resíduos que podem ser usados para diversos fins, tais como, a palha deixada no campo auxilia no combate a pragas e ajuda a manter um bom nível de nutrientes no solo. A vinhaça, resíduo do processo produtivo, é utilizada como fertilizante, sendo disposto no solo de acordo com valores estabelecidos. Os resíduos sólidos gerados no processo de colheita podem ser visto como fonte de biomassa que pode ser beneficiado e utilizado para produção de energia (GUARDABASSI, 2006).

A biomassa de origem lenhosa é representada pelos resíduos da madeira, tais como galhos folhas e outros ou mesmo ela própria podendo ser queimada para se produzir o carvão vegetal ou então só a queima sem se produzir carvão. As principais espécies de eucalipto utilizadas são: *Eucalyptus grandis*, *E. urophylla*, *E. urograndis* (híbrido), *E. camaldulensis*, *E. citriodora*, *E. cloeziana*, *E. globulus*, *E. maculata*, *E. paniculata*, *E. pellita*, *E. pilularis*, *E. saligna*, *E. tereticornis*. Outra espécie importante, bastante difundida na região sul do país para produção de carvão vegetal e tanino é a Acácia negra (*Acacia measrnsii*). O uso de biomassa florestal (lenha e carvão vegetal) corresponde a

aproximadamente 12,9% de todas as fontes renováveis da matriz energética, representando a terceira maior fonte de energia nacional (EMBRAPA, 2007).

### **3.4.3 Carvão vegetal**

O carvão vegetal é obtido a partir da transformação de biomassa, por exemplo, a lenha, em fornos ou reatores pelo processo de pirólise ou carbonização. Quando produzido de forma sustentável pode ser considerado um combustível renovável, sendo mais calórico que a lenha sua queima gera menos fumaça. Atualmente sua produção é feita através de fornos de alvenaria capazes de aumentar o rendimento em carvão e produzir mais carvão vegetal com uma mesma massa de lenha enfiada. A maior parte do carvão vegetal produzido no Brasil é produzida em fornos redondos, principalmente pelo custo de produção e baixa produtividade (CENBIO, 2010).

### **3.4.4 Biodiesel**

Biodiesel é um combustível biodegradável derivado de fontes renováveis, que pode ser obtido por diferentes processos tais como a esterificação ou pela transesterificação. Pode ser produzido a partir de gorduras ou de óleos de origem animal ou vegetal, existindo diversas espécies vegetais no Brasil que podem ser utilizadas, tais como mamona, dendê, girassol, amendoeira, pinhão manso, soja, dentre outros.

Segundo a Lei nº 11.097, de 13 de janeiro de 2005, biodiesel é um “biocombustível derivado de biomassa renovável para uso em motores a combustão interna com ignição por compressão ou, conforme regulamento para geração de outro tipo de energia, que possa substituir parcial ou completamente combustíveis de origem fóssil” (ANP, 2009).

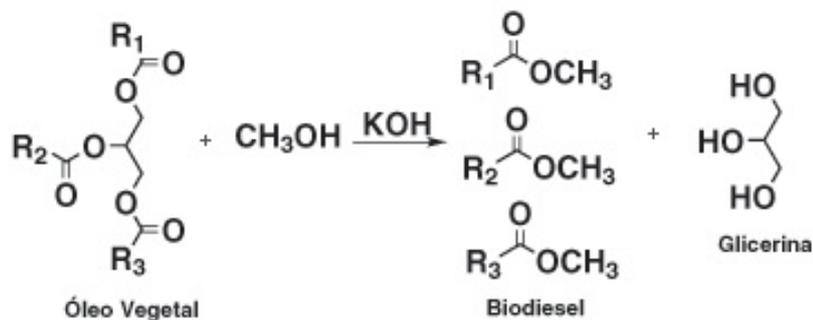
O biodiesel, além de ser uma fonte de energia renovável, proporciona grande vantagem em relação ao óleo diesel com relação a emissão de gases do efeito estufa, produzindo cerca de 78% a 100% menos gases (dependendo do tipo de álcool empregado no processo), 98% menos óxidos de enxofre e 50% menos material particulado. Somente no caso dos NOx ocorre aumento (13%), o que pode contribuir para agravar a ocorrência local de ozônio e do smog fotoquímico.

### **3.4.5 Obtenção do biodiesel por reação de transesterificação/esterificação**

O biodiesel é obtido através da transesterificação (reação na qual um éster é transformado em outro através da troca dos grupos alcóxidos) dos triglicerídeos de óleos e

gorduras de origem vegetal ou animal com um mono-álcool de cadeia curta, tipicamente metanol ou etanol, na presença de um catalisador, produzindo uma mistura de ésteres alquílicos de ácidos graxos e glicerol. A transesterificação mostrada na Figura 6 é uma reação reversível, porém o glicerol formado por não ser solúvel no biodiesel inviabiliza este processo. A imiscibilidade do glicerol ao biodiesel garante um maior rendimento da reação, no entanto favorece a formação de emulsões estáveis, devendo haver um grande período de repouso para obtenção de fases de biodiesel e glicerol.

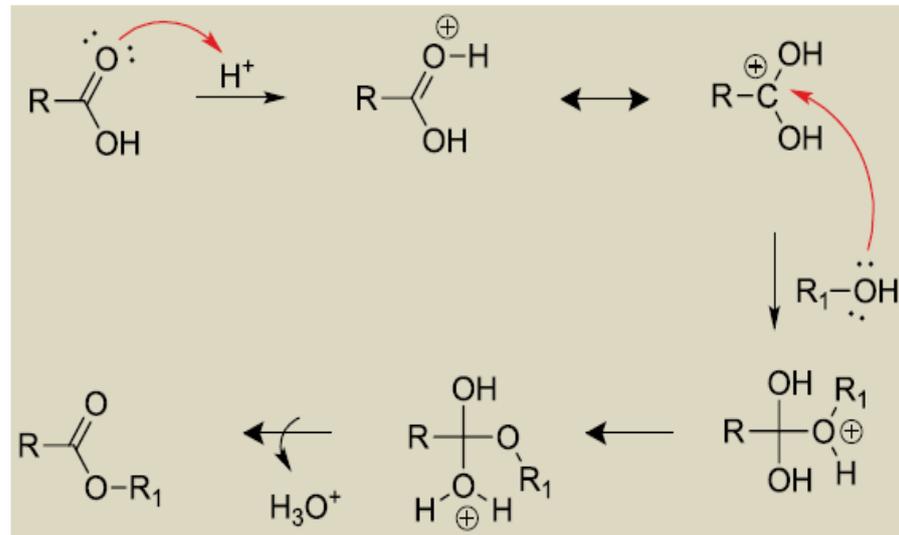
**Figura 6:** Esquema da transesterificação de um triglicerídeo com metanol



Fonte: econuz.com

A reação de transesterificação é geralmente catalisada por ácidos ou bases, entretanto a reação catalisada por bases (hidróxido de sódio ou alcóxidos de sódio ou potássio) apresenta uma vantagem, pois pode ser realizada a temperatura ambiente e mesmo assim ainda ser mais rápidas que se fosse utilizado catalisador ácido que necessita de temperatura elevadas (170°C).

A reação de esterificação de ácidos graxos adota grande valor para a produção de biodiesel ao serem consideradas matérias-primas de alta acidez. Estudos cinéticos da reação de esterificação metílica e etílica de ácidos graxos, utilizando o ácido sulfúrico como catalisador, mostraram que o estado de equilíbrio do sistema pode ser atingido em menos de 1h de reação. A Figura 7 mostra o mecanismo de esterificação de ácidos graxos, onde R e R1 representam, respectivamente, as cadeias carbônicas hidrofóbicas do ácido graxo e do álcool.

**Figura 7:** Mecanismo de esterificação de ácidos graxos.

Fonte: Adaptado de Ramos *et al*, 2011.

Do ponto de vista químico, o óleo vegetal usado na produção de biodiesel é um triglicerídeo, ou seja, um triéster derivado da glicerina. Sob a ação do catalisador básico e na presença de metanol ou etanol, o óleo sofre uma transesterificação formando três moléculas de ésteres metílicos ou etílicos dos ácidos graxos, que constituem o biodiesel em sua essência, liberando molécula de glicerol ou glicerina. O biodiesel é miscível ao diesel podendo ser misturado ou usado na forma pura em motores de automóveis. A lei brasileira 11097/05 tornou obrigatória a adição de 2% de biodiesel ao diesel (Biodiesel B2), nesta ocasião, também ficou estabelecido que, a partir do dia 8 de janeiro de 2008, todo o óleo diesel comercializado em território nacional deveria conter, obrigatoriamente, 2 % de biodiesel (B2) e que, a partir de 1º de janeiro de 2013, o teor da mistura seria aumentado para 5 % (B5) (ANP, 2009).

No final do mês de dezembro de 2007, foi anunciado que a implementação da mistura B2 passaria a entrar em vigor em 1º de janeiro de 2008, e não no dia 8, como proposto inicialmente. Em março de 2008, apenas três meses depois do início do PNPB, a Resolução nº 2 do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) aumentou de B2 para B3 a mistura obrigatória de biodiesel no diesel, com início a partir de junho de 2008. Finalmente, no final de fevereiro de 2009, o governo federal anunciou o aumento da mistura obrigatória de B3 para B4 a partir de julho deste ano, bem como a antecipação do uso de B5 para janeiro de 2010.

### 3.5 UTILIZAÇÃO DE BIOMASSA EM FORNOS CERÂMICOS

Ao longo dos anos, o setor cerâmico vem ganhando destaque na construção civil brasileira e integra uma das áreas consideradas prioritárias pelo Governo Federal: a Tecnologia Industrial Básica. Atualmente, existe no mercado forte demanda por produtos de cerâmica vermelha, com alto valor agregado e destinados a acabamento e revestimento: pisos, soleiras, tijolos, blocos, placas cerâmicas etc. Neste sentido, a indústria cerâmica brasileira vem despontando como uma das mais criativas e competentes do mundo (VIEIRA, 2009).

De acordo com a Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimento (ANFACER), em 2007, o Brasil está entre os principais produtores mundiais de cerâmica, atrás da China (com 3,5 bilhões de m<sup>2</sup>) e da Espanha (com 685 milhões de m<sup>2</sup>). Com produção de 637 milhões de m<sup>2</sup>, ultrapassa as produções da Itália (563 milhões de m<sup>2</sup>) e Índia (360 milhões de m<sup>2</sup>). A Indústria Cerâmica tem papel de relevância para a economia nacional, contribuindo de forma significativa para o PIB (produto interno bruto). Além da importância econômica, a indústria da construção civil tem relevante papel social, tanto pela capacidade de diminuição do déficit habitacional brasileiro como por seu potencial de geração de emprego e renda.

Atualmente existe uma série de restrições quanto ao funcionamento de uma indústria cerâmica, além das restrições impostas pela concorrência do mercado, com a necessidade de maior produção e menor custo, outras restrições vêm surgindo para o setor. As restrições estão voltadas ao meio ambiente, no sentido de sua proteção. Com o mercado cerâmico mais competitivo existem maiores restrições quanto à qualidade do produto, citando-se aqui o Programa Brasileiro de Qualidade e Produtividade no Habitat (PBQP-H), definindo resistência mecânica, percentual de absorção, dimensões, entre outras características. As restrições ambientais referem-se à extração das argilas, matéria-prima do setor, à emissão de poluentes e principalmente restrição quanto aos combustíveis usados. O conhecimento de que a biomassa seja um combustível renovável e que a produção de dióxido de carbono durante a queima seja compensada pela sua absorção pela planta em crescimento, torna seu uso mais aceitável, pois grande parte da indústria de cerâmica vermelha está baseada na lenha e seus derivados como combustível. Entretanto esta lenha tem origem de matas nativas e não de reflorestamentos. Neste sentido tem-se observado nos últimos anos uma grande fiscalização atuante no setor, quanto ao uso de madeira ilegal para queima em fornos.

Em Alagoas, o segmento da indústria de cerâmica destaca-se pela produção de telhas e blocos cerâmicos. Atualmente, são 34 pequenas empresas formalizadas e associadas ao Sindicato das Indústrias Cerâmicas em Alagoas (Sindiccer). Juntas, elas atendem cerca de 40% da demanda do mercado local. Esse quadro poderia ser maior, porém ainda que haja espaço para o crescimento do setor no mercado interno, é necessário criar políticas de reflorestamento e desenvolvimento sustentável. Devem ser tomadas medidas voltadas a melhoria da qualidade dos produtos e a adequação das empresas às normas técnicas do Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (Inmetro). Em função disso, entre os anos de 2008 e 2010, 18 empresas cerâmicas conseguiram a legalização junto ao Instituto do Meio Ambiente (IMA) e ao Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) (SEBRAE, 2010).

O setor cerâmico do Estado de Alagoas tem buscado novas alternativas como fonte de energia uma vez que a lei federal 9.605 de 12 de fevereiro de 1998 julga como crime ambiental o desmatamento ou qualquer infração contra a flora, multando em até R\$ 50 milhões a empresa que for pega com madeira ilegal. Assim essas cerâmicas tem se interessado em pesquisas com o uso da biomassa provenientes de resíduos agroindústrias. Cabe salientar que uma alternativa viável seja o uso de madeira produzido a partir do reflorestamento.

Wiltsee (1999) avaliou 20 plantas de 10MW até 79MW, localizadas na sua maioria nos EUA, e elegeram os seguintes pontos de importância a serem considerados quanto ao uso de biomassa:

- Fontes combustíveis – Para diminuir custos, a biomassa deve localizar-se nas proximidades da fonte geradora.
- Manuseio do combustível - A alimentação de biomassa e o pátio de estoque devem ser cuidadosamente planejados para evitar mau cheiro, pragas e fungos. É preciso separar os contaminantes metálicos e evitar flutuação da umidade da biomassa.
- Flexibilidade - A sazonalidade dos produtos agrícolas exige que o sistema seja projetado para processar diferentes biomassas.
- Localização - Os resíduos de biomassa são combustíveis de baixa densidade comparados com os fósseis. O custo de transporte pode se tornar muito alto além de 30 km e proibitivo para 150 km. A localização também deve levar em conta a vizinhança, em razão do cheiro e do barulho.

### 3.6 CASTANHOLA

A espécie *Terminalia Catappa* L., pertencente à família Combretáceae, é conhecida popularmente como castanheira, castanhola, castanholeira, chapéu-de-sol e sete-copas, como pode ser vista na Figura 8.

**Figura 8:** Foto da castanhola.



Fonte: [http:// www.ufersa.edu.br](http://www.ufersa.edu.br)

Sendo uma árvore originária da Índia, pode chegar a uma altura de cerca de 30 a 45 m e 50 a 150 cm de diâmetro, com tronco de retilíneo a tortuoso, possui grandes folhas observado na Figura 9 e possui fruto comestível. A semente é muito dura, encerra amêndoa alongada, apresenta boa adaptação nos terrenos arenosos e salgados, sendo bastante resistente aos efeitos do vento (CAVALCANTE *et al*, 1986), (IVANI *et al*, 2008).

**Figura 9:** Foto das folhas e frutos da castanheira.



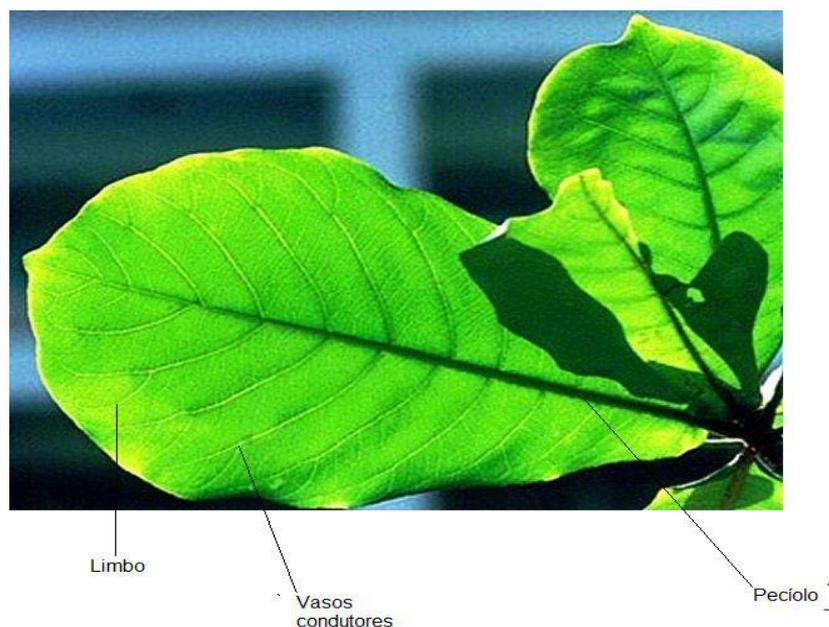
Fonte: [www.cgalgarve.com](http://www.cgalgarve.com)

A *Terminalia Catappa* L. tem seu crescimento de forma rápida e espontânea sendo desta forma muito utilizada para ornamentação e reflorestamento. Sua produção ainda não é considerada comercial, contudo, por se apresentar adaptável a regiões tropicais como no Brasil, a castanhola se torna uma alternativa no processo de desenvolvimento agroindustrial do país (CAVALCANTE *et al*, 1986).

Originária da Índia, supõem-se duas trajetórias para chegada desta espécie no continente americano. Uma delas supõe que as sementes tenham se misturado à areia tomada da Ásia e utilizada como lastro dos navios dos portugueses. A segunda suposição é de que as árvores eram cortadas e utilizadas nos lastros dos navios, por ser uma espécie típica de praias, suas sementes resistem a longos períodos de imersão nas águas dos mares onde permanecem boiando até serem jogadas pela maré a beira da praia. Por ser de fácil germinação espalhou-se por toda costa brasileira sendo hoje frequentemente utilizada para fazer sombra em áreas urbanas (SANCHES *et al*, 2007).

Segundo Ivani *et al* (2008), a castanhola tem seus frutos carnosos, glabros, de coloração verde a vinácea, com a projeção das nervuras carpelares evidentes, possuindo, em geral, uma semente e, raramente, duas, apresentando uma semente de formato axial e eixo radicular proeminente. Os frutos possuem alto teor nutricional podendo ser acrescentado na alimentação humana, de pássaros, morcegos e roedores. Na Figura 10 é apresentada a morfologia da folha da castanhola.

**Figura 10:** Morfologia da folha da *Terminalia Catappa* L.



**Fonte:** autora desta dissertação.

## 4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo iremos descrever todo procedimento experimental realizado para determinação das caracterizações físico-química de algumas partes da castanhola (folha, galho, amêndoa), tais como: poder calorífico, densidade, umidade, teor de cinzas.

### 4.1 PROCEDIMENTOS GERAIS

As amostras foram coletadas do chão, próximas as árvores da Universidade Federal de Alagoas, localizada no Campus A. C. Simões (latitude sul  $9^{\circ} 29' 45''$  e longitude oeste  $35^{\circ} 49' 54''$ ) e posteriormente foram feitas as caracterizações físico-químicas (determinação de poder calorífico, densidade, umidade e teor de cinzas) da matéria seca sem necessidade de nenhum tratamento prévio. O período de amostragem foi de janeiro a dezembro de 2011, período em que a castanhola gerou frutos no ano de desenvolvimento deste trabalho.

Foram coletados folhas e frutos da castanhola, nas quantidades aproximadas a seguir: 1,0 kg das folhas e 10,0 kg da amêndoa para retirada da polpa e de aproximadamente 3,0 kg de castanha. Todas as amostras foram trituradas com o auxílio de uma ferramenta de corte.

As diversas partes foram manipuladas conforme descrição a seguir:

Amêndoa: a polpa foi separada da casca e em seguida ambas foram secas durante 15 dias ao sol protegendo contra a ação do clima para viabilizar o processo de retirada da amêndoa e favorecer a diminuição da umidade. A amêndoa foi retirada por esmagamento da casca utilizando uma pressão de aproximadamente 3,0 bar, logo após as amêndoas foram armazenadas sob refrigeração (aproximadamente  $15^{\circ}\text{C}$ ), para posterior extração do óleo e caracterização.

Folha: foi deixada sob ventilação a temperatura ambiente durante 15 dias para retirada da umidade, em seguida foi retirado o pecíolo das folhas para que fossem feitas as análises físico-químicas (teor de cinzas, densidade, umidade, poder calorífico superior). Para análise da folha todas as amostras foram trituradas em partículas de aproximadamente 0,5 cm, não foi necessário nenhum tratamento para amostra.

O pecíolo e limbo foram caracterizados individualmente para cada parâmetro físico-químico (densidade, teor de cinzas, umidade e poder calorífico superior).

## 4.2 CARACTERIZAÇÕES FÍSICO-QUÍMICAS DA BIOMASSA DE CASTANHOLA

Determinação do teor de umidade do resíduo (% p/p), segundo a norma ABNT NBR 8112: foi pesada aproximadamente 1,0 g do combustível, com precisão 1mg em um cadinho sem tampa. Colocamos na estufa a  $105 \pm 5$  °C durante 90 minutos. Em seguida retiramos da estufa e colocamos no dessecador até atingir temperatura ambiente. Logo após pesamos com a mesma precisão.

Determinação do teor de cinzas (%p/p), obedecendo a norma ABNT 8112. Colocou-se 1,0 g de combustível, isento de umidade e de granulometria inferior a 0,210 mm, em um cadinho sem tampa, previamente seco e tarado. Colocamos o cadinho com a amostra de combustível na mufla previamente aquecida a  $700 \pm 10$ °C. Deixamos o cadinho na mufla até que o resíduo se queime completamente. Retiramos a amostra da mufla, deixamos esfriar no dessecador e determinamos a massa final, em balança de precisão. Para determinação do teor de cinzas foi utilizado os seguintes cálculos:

$$\%C = \frac{m_c \cdot 100}{m_a}$$

Em que:

$m_a$  – Massa da amostra

$M_c$  – Massa da cinza

%C – Teor de cinzas

Determinação da densidade natural do resíduo ( $\text{g/cm}^3$ ): Para o resíduo, foram pesadas 5,0 g da amostra em balança semi-analítica, transferindo-as para um balão volumétrico de 250 mL. A seguir, o volume foi completado com água destilada e sua massa foi medida. A determinação da densidade foi feita através do quociente entre a massa de resíduo e o volume resultante da diferença entre a massa da mistura e a massa de 250 mL de água ( $d = 1,0$  g/mL).

Determinação da densidade de um briquete ( $\text{kg/cm}^3$ ): No caso dos briquetes, o procedimento será realizado através da imersão de unidades de massa conhecida em um volume preestabelecido de água, utilizando-se uma proveta graduada. O método de empuxo permitirá a determinação da densidade, através do quociente entre a massa utilizada e o volume deslocado por esta.

Determinação do poder calorífico (J/g) do resíduo antes e após briquetagem: o poder calorífico foi determinado utilizando como padrão a norma da ABNT 8633. Define-se

o poder calorífico ou capacidade calorífica como a energia térmica total disponível no combustível medido em kcal/kg. Este poder calorífico total é também chamado de poder calorífico superior. O poder calorífico inferior (PCI) é uma base mais realística para a comparação entre combustíveis, pois decorre do fato de o hidrogênio contido no combustível formar vapor d'água ao queimar-se, diminuindo a energia térmica disponível.

O poder calorífico foi determinado em um calorímetro visto na Figura 11, composto por uma bomba calorimétrica (IKA-C200): a amostra da substância foi colocada num pequeno cadinho no interior da bomba calorimétrica. Essa câmara de combustão de aço inox, capaz de resistir a grandes pressões, tem válvula para a admissão de oxigênio e também contatos elétricos para provocar a inflamação da amostra. Depois de a amostra ser inserida, a bomba foi hermeticamente fechada e recebeu carga de oxigênio sob pressão de aproximadamente  $30 \text{ kgf/cm}^2$ . A bomba calorimétrica é então imersa no calorímetro, (vaso que apresenta excelente isolamento térmico) que contém massa de água conhecida, sob agitação. O sistema trabalha em condições adiabáticas, não havendo perda nem ganho de calor do calorímetro para as vizinhanças. Quando todos os componentes dentro do calorímetro atingem uma temperatura uniforme e constante, provoca-se, mediante uma corrente elétrica que passa por um fio condutor que fica em contato com a amostra, a inflamação dessa amostra. O calor liberado na combustão é absorvido pelo conteúdo do calorímetro e causa a elevação da temperatura da água. Essa temperatura é cuidadosamente medida, com um termômetro de precisão de Beckmann, antes da reação e depois de a reação terminar, quando a temperatura no interior do calorímetro é novamente constante. A variação de temperatura  $\Delta T$ , observada no calorímetro é proporcional ao calor que a reação liberta ou absorve.

**Figura 11:** Calorímetro, IKA<sup>®</sup>-C200.



Fonte: autor próprio.

## 5 EXTRAÇÃO DO ÓLEO

Para extração do óleo da amêndoa observado na Figura 10 foi realizado o seguinte procedimento: a amêndoa foi previamente seca em uma estufa a temperatura de 60 °C durante 24 horas. Pesou-se uma determinada massa de amêndoas e o óleo foi então extraído com o auxílio de uma prensa hidráulica conforme Figura 12, em que as amostras foram compactadas e esmagadas por um cilindro de aço inox até uma pressão de 14 bar, o óleo recolhido foi armazenado em um recipiente de vidro escuro e foi mantido sob refrigeração a aproximadamente 5 °C. A torta obtida após compactação foi recolhida, pesada em seguida foi extraído o óleo restante via ultrassom, procedimento no qual a torta da castanhola foi deixada sob hexano na proporção de 1:3 em um erlemeyer de 1000 mL hermeticamente fechado e levado para sonicar durante uma hora em banho ultrassônico a 50 °C. Após esta etapa o sólido foi filtrado com papel de filtro e a mistura hexano/óleo foi levada para um evaporado rotativo no qual o hexano foi separado por destilação a 60 °C. Todo óleo obtido foi filtrado em funil de fundo esmerilhado, sob sílica, em seguida foi homogeneizado e armazenado em um vidro escuro de 1,0 L, para posteriores análises.

**Figura 12:** Prensa hidráulica utilizada na extração do óleo da castanhola.



Fonte: autora desta dissertação.

Após a extração do óleo por solvente a torta da amêndoa foi analisada quanto as suas propriedades físico-químicas (densidade, poder calorífico, umidade e teor de cinzas) tanto na forma in natura quanto na forma de briquetes.

## 5.1 CARACTERIZAÇÕES DO ÓLEO E DO BIODIESEL ETÍLICO E METÍLICO

O óleo e o biodiesel foram caracterizados quanto a sua densidade, viscosidade cinemática, a sua acidez, seu poder calorífico, sua estabilidade a oxidação e corrosividade ao cobre.

### 5.1.1 Viscosidade

As análises físico-químicas, de viscosidade, índice de acidez e massa específica, são importantes e necessárias para determinar a característica do óleo a ser usado na produção do biodiesel. A acidez é uma variável que está sujeita as condições do terreno em que foi plantado a oleaginosa, extração e das condições em que o produto foi armazenado. A viscosidade cinemática está diretamente relacionada às interações intermoleculares e intramoleculares, como as forças de Van der Waals, existente entre as moléculas, e o tamanho das cadeias carbônicas e ao número de insaturações e das conformações presentes nos ácidos graxos. As alterações na viscosidade e densidade, por exemplo, ocorrem por causa do acréscimo no número de insaturações e das conformações *cis* ( $z$ ) nas cadeias dos ácidos graxos, como o ácido oléico, linoléico e linolênico.

Os ácidos graxos saturados por possuir uma cadeia linear têm uma maior área de contato para a interação das forças de Van der Waals, como a força de dispersão, aumenta a viscosidade, pois o agrupamento das cadeias são maiores por não possuir nenhum impedimento da conformação (DANTAS, 2010).

A viscosidade cinemática foi realizada conforme a norma da ASTM D-445 que prevê a viscosidade a 40 °C, para este procedimento foi medido em pipeta volumétrica 8,5 mL da amostra e transferido para um viscosímetro capilar Cannon-Fenske no qual o volume da amostra é succionado até o menisco superior do viscosímetro e monitorado com um cronômetro enquanto a amostra transcorre o viscosímetro sob ação da gravidade através de um capilar até o menisco inferior. Foram realizados seis repetições a fim de se obter maior precisão nos resultados. O viscosímetro usado tem uma constante fixa que será multiplicada pelo valor do tempo em segundos.

### 5.1.2 Massa Específica

Do mesmo modo que a viscosidade, a densidade está diretamente relacionada, com o tamanho da cadeia carbônica, as insaturações e as conformações que interferem nas interações intermoleculares e intramoleculares que dificultam a aproximação das interações de força de dispersão, diminuindo a agregação e dificultando o empacotamento das cadeias carbônicas, aumentando o espaçamento e o volume entre as moléculas e, por consequência, diminui a densidade (DANTAS, 2010).

A densidade foi determinada segundo método ASTM D4052 e NBR 14065, a amostra foi colocada em um banho de gelo até que sua temperatura ficasse inferior a 20 °C, em seguida a amostra foi succionada em um densímetro digital de fabricação *Anton Paar* e o valor da densidade foi captado a 20 °C, as análises foram feitas em duplicada.

### 5.1.3 Índice de Acidez em ácido oléico

O índice de acidez foi realizado segundo a Norma da ABNT NBR 14448, foi pesado 0,5 g da amostra em um erlemeyer de 150 mL e dissolvido em 10 mL de uma solução de éter/isopropanol (2:1), em seguida adicionamos 2 gotas de fenolftaleína a solução, logo após titulou-se a mistura com uma solução 0,1 mol/L de KOH até o aparecimento de uma coloração rósea. Para determinação do índice de acidez se utilizou os seguintes cálculos:

$$\frac{V \times F \times M \times 28,2}{P} = \text{acidez em ácido oléico, por cento, m/m}$$

No qual:

V = número de mL de solução de hidróxido de potássio 0,1 mol/L gasto na titulação

F = fator da solução de hidróxido de potássio

P = peso em g da amostra

### 5.1.4 Estabilidade Oxidativa

A estabilidade oxidativa do biodiesel está inteiramente ligada ao grau de insaturação dos alquilésteres presentes no combustível, e com a posição das duplas ligações na cadeia carbônica. Quanto maior o número de insaturações, mais sujeito está a molécula à degradação térmica e oxidativa, formando desta forma produtos insolúveis que ocasionam

problemas de formação de depósitos e entupimento do sistema de injeção de combustível do motor (LOBO, 2009).

A estabilidade a oxidação a 110 °C foi realizada segundo a norma EM 14214 e na RANP 07/08, para esta análise uma amostra do biodiesel foi mantida em um vaso reacional, a 110 °C sob um fluxo de ar, até que se comecem a formação de peróxidos, principais produtos formados na primeira etapa de oxidação do biodiesel. Na segunda etapa são formados compostos orgânicos voláteis, dentre estes, ácidos orgânicos de baixa massa molecular sendo então transportados pelo fluxo de ar para outro recipiente contendo água destilada, onde na presença dos ácidos orgânicos são então detectados pelo aumento da condutividade no sistema.

### **5.1.5 Corrosividade ao cobre**

A análise de corrosividade ao cobre é de suma importância para determinar a capacidade do combustível causar corrosão em peças metálicas, que podem ser do motor ou do tanque de armazenamento. Esta propriedade está associada à presença de ácidos ou de compostos de enxofre. A necessidade deste parâmetro tem sido discutida uma vez que no biodiesel o teor de enxofre é muito baixo (LOBO, 2009).

A análise de corrosividade ao cobre foi realizada segundo a norma da ASTM D130, neste procedimento uma lâmina de cobre previamente polida é submersa no combustível a 50°C, durante 3 horas. Logo após a placa foi lavada e comparada com lâminas padrões que representam diferentes graus de corrosão, aos quais são atribuídos valores de 1 a 5.

## **5.2 REAÇÃO DE OBTENÇÃO DO BIODIESEL ETÍLICO/METÍLICO**

Os ésteres foram sintetizados em um reator batelada de vidro com agitador mecânico em duas etapas. Inicialmente, o óleo da castanhola, foi dissolvido no álcool e depois foi adicionado o ácido sulfúrico na proporção de 1: 6: 0,2 respectivamente. A mistura foi mantida sob refluxo suave durante 2 horas, em seguida, a mistura reacional foi lavada com uma solução 5 % de bicarbonato de sódio por três vezes. Em seguida, a fase biodiesel/óleo foi dissolvida em hexano, mantido sobre sulfato de magnésio por 2 horas em um agitador mecânico, finalmente foi filtrado e os voláteis foram removidos sob vácuo. Na segunda etapa, a fase biodiesel/óleo obtido após a primeira etapa foi misturado com uma solução de

hidróxido de potássio e a mistura foi mantida sob a condição de agitação por 2 horas em temperatura de 60 °C. Após as duas horas a mistura foi deixada em repouso e as duas fases foram separadas. O excesso de álcool na fase éster foi removido no rota-evaporador a 70 °C. Em seguida o biodiesel foi lavado com ácido fosfórico (5 % v/v) e três vezes com salmoura até pH neutro. A conversão em biodiesel foi detectada por RMN.

### **5.3 RENDIMENTO EM BIODIESEL**

A análise de conversão do biodiesel foi realizada por RMN  $H^1$ , na qual uma pequena alíquota da amostra foi diluída em clorofórmio deuterado, e faixa de detecção foi ajustada para determinação dos hidrogênios presentes no composto, que definiu a porcentagem de triglicerídeos convertidos.

### **5.4 DETERMINAÇÃO EM ÁCIDO GRAXO DO ÓLEO DA *TERMINALIA CATTAPA* L.**

A composição dos ácidos graxos foi determinada por cromatografia em fase gasosa, sendo empregado um cromatógrafo da Shimadzu, modelo ZB-WAX plus com detector de ionização em chama. Os compostos foram separados em coluna capilar de sílica fundida SP 2340 de 60 m de comprimento, com diâmetro interno de 0,32 cm e espessura do filme de 0,25  $\mu$ m. Foram obedecidas as seguintes condições de operação: pressão de 71,9 Kpa, fluxo total de 96 mL/min; fluxo da coluna de 3 mL / min; ; gás de arraste: hidrogênio; velocidade linear do gás de arraste: 65,4 cm/s.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Várias partes da planta foram analisadas a fim de se determinar seu potencial energético. Para tanto, todas as amostras estavam secas e foram trituradas em pedaços de aproximadamente 0,5 cm.

### 6.1 DENSIDADE

A densidade da biomassa não está diretamente relacionada à sua capacidade calorífica, porém sua análise é de suma importância para definir condições de transporte e armazenamento (NOGUEIRA, 2007).

Na Tabela 1 estão apresentados os resultados da densidade da folha e da amêndoa da castanhola.

**Tabela 1:** Medidas da densidade da folha, polpa, pecíolo da folha e casca da castanhola

	Material	Densidade (g/cm <sup>3</sup> ) <i>in natura</i>	Densidade (g/cm <sup>3</sup> ) Briquete
Folha	Limbo	0,349	0,484
	Pecíolo	0,561	
Amêndoa	Polpa	0,556	0,558
	Casca	0,423	0,431
Galho	Madeira	0,554	0,557
Torta	Amêndoa	0,625	0,627

**Fonte:** autora desta dissertação.

A densidade das espécies *in natura* estudadas apresentou valores entre 0,349 g/cm<sup>3</sup> a 0,625 g/cm<sup>3</sup>, porém não podemos relacionar diretamente tais valores por se tratar de materiais diferentes, porém podemos atribuir a densidade ao volume a ser queimado, preferindo-se as biomassas de maior compactação para queima por apresentarem maior concentração energética. Podemos observar que para biomassas compactadas na forma de briquetes a densidade se apresentou relativamente mais elevada devido à maior compactação da amostra.

## 6.2 TEOR DE UMIDADE

É importante que o teor de umidade da biomassa a ser usada como combustível seja reduzido, diminuindo assim o manejo e o custo de transporte, agregando valor ao combustível.

Segundo Quirino *et al.* (2005) o percentual de umidade máxima que uma biomassa pode ter para ser queimada no forno está em torno de 65 % a 70 % em base úmida. A quantidade máxima de água que a biomassa pode conter para entrar em combustão tem sido calculada em aproximadamente 65 % na base úmida (o resto corresponde ao material sólido). Desta forma, biomassa muito úmida, com teor de umidade acima deste limite, necessitará de calorias de origem externa para secar e entrar em combustão. Segundo o autor, quanto maior o conteúdo de umidade da biomassa, menor é o seu poder de combustão, devido ao processo de evaporação da umidade, no qual absorve energia em combustão.

Na Tabela 2 estão apresentados os resultados de umidade observados para a castanhola.

**Tabela 2:** Resultados da umidade da castanhola

	Material	Umidade (%) <i>In natura</i>	Umidade (%) Briquete
Folha	Limbo	10,90	9,22
	Pecíolo	14,52	
Amêndoa	Polpa	11,36	nd
	Casca	15,01	10,38
Galho	Madeira	9,23	8,56
Torta	Amêndoa	4,02	3,76

nd = não determinado

Fonte: autora desta dissertação.

Os resultados apresentados na Tabela 2 mostram que a umidade *in natura* varia em torno de 4,02 % a 15,01 %, valores considerados satisfatórios uma vez que o teor de umidade está diretamente relacionado à capacidade energética do material. Dessa forma não serão necessários processos de secagem por apresentarem valores de umidades dentro do que pode ser encontrado na literatura (LIMA, 2008). Para amostra na forma de briquetes os valores encontrados são satisfatórios com baixos teores de água contidos neles.

### 6.3 TEOR DE CINZAS

A determinação dessa propriedade é imprescindível para a caracterização da biomassa, pois indica a porcentagem de material inerte, que não produz calor.

A Tabela a seguir mostra os resultados de teor de cinzas obtidos a partir da queima de algumas partes da Castanhola.

**Tabela 3:** Teor de Cinzas da Castanhola

	Material	Teor de Cinzas (%)	Teor de Cinzas(%)
		<i>In natura</i>	Briquete
Folha	Limbo	5,07	6,54
	Pecíolo	4,63	4,98
Amêndoa	Polpa	4,87	5,03
	Casca	2,89	3,14
Galho	Madeira	3,76	4,27
Torta	Amêndoa	2,96	3,56

**Fonte:** autora desta dissertação.

Observa-se que o teor de cinzas, para as espécies analisadas seja ela *in natura* ou na forma de briquetes, se situou entre 2,89 % a 6,54 %, se destacando a torta da castanhola por apresentar o teor e cinzas 2,96 % valor considerado aceitável de acordo com a literatura, que é de 4,5 % (Araujo, 2006). Desta forma não seria necessário a instalação de filtros para retenção das partículas geradas pela queima desta biomassa. No entanto as demais podem gerar particular suspensas, sendo necessário o uso de equipamentos para separação de partículas dos gases da combustão. Na Figura 13 podemos observar o aspecto das cinzas obtidas a partir das biomassas, após queima na mufla.

**Figura 13:** Foto das amostras após queima na mufla a 710 °C



Cinzas da casca (amêndoa)



Cinzas do limbo (folha)



Cinzas do pecíolo (folha)

**Fonte:** Autora desta dissertação.

Podemos observar que as cinzas apresentam aspectos bastante distintos, por se tratar de partes diferentes de uma mesma espécie. As cinzas da folha apresentam-se com um aspecto floculado e disperso, já as cinzas do pecíolo tem uma aparência mais concentrada, no entanto as cinzas da casca se apresentaram com menor quantidade de partículas sobressalente e mais compactada.

Uma alternativa viável quanto ao emprego das cinzas geradas a partir da queima desses resíduos sólidos seria sua utilização como fertilizante. A aplicabilidade desse resíduo torna-se mais propícia, ao se avaliar que a maior parte dos solos em uso nos plantios com fins industriais foi, originalmente, ocupada por vegetação de cerrados, de baixa fertilidade. Além disso, deve-se considerar também a crescente elevação dos custos de aquisição e aplicação de fertilizantes minerais, que levam os silvicultores a procurar meios alternativos de manejo florestal (MORO *et al*, 1995).

#### 6.4 PODER CALORÍFICO SUPERIOR (PCS)

Para que uma biomassa seja competitiva no mercado ela deve apresentar valores de poder calorífico superior compatível as já utilizadas. Portanto vários estudos estão sendo feitos para determinação de espécies que possam agregar um alto teor de energia associadas ao processo de combustão. Neste trabalho foram obtidos os valores de PCS da Castanhola para avaliar seu potencial energético e a Tabela 4 apresenta os resultados obtidos.

**Tabela 4:** Poder Calorífico Superior da Castanhola

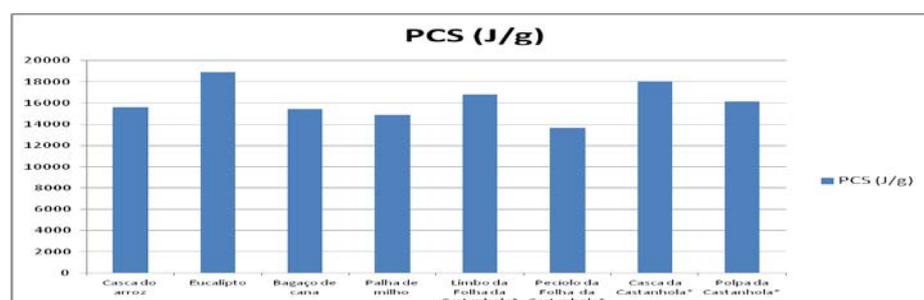
	Material	PCS (J/g) <i>In natura</i>	PCS (J/g) Briquete
Folha	Limbo	16 795	14 903
	Pecíolo	13 643	
Amêndoa	Polpa	16 170	Nd
	Casca	17 172	18 040
Galho	Madeira	17 464	17 622
Torta	Amêndoa	18 620	18 842

nd = não determinado

Fonte: autora desta dissertação.

O poder calorífico superior das espécies estudadas apresentou valores entre 13 643 J/g a 18 842 J/g, resultados que são considerados ótimos, motivo pelo qual essas biomassas podem vir a substituir a lenha na produção de calor e energia. Percebe-se que para as amostras na forma de briquetes o poder calorífico superior foi maior como descrito na literatura (JUNIOR, *et. al*, 2003), devido a sua maior compactação a amostra agrega maior quantidade de energia. Se observarmos a Figura 14, podemos perceber que a biomassa oriunda da Castanhola é bastante competitiva em relação a outras biomassas já existente no mercado, podendo ser uma fonte de energia alternativa viável.

**Figura 14:** Poder Calorífico Superior de resíduos ligno-celulósico.



**Fonte:** alguns valores foram obtidos de Quirino, 2005 e confrontados com dados experimentais obtidos nesse estudo (marcados com \*).

Cabe salientar que o poder calorífico obtido constitui considerável indicador do potencial energético da biomassa, tal fator depende da composição química do material, da sua qualidade, e da sua natureza que pode variar até mesmo em uma única amostra de biomassa. Porém o que determina a energia disponível por unidade de massa de combustível após a queima é o poder calorífico inferior (PCI), que pode ser obtido a partir do poder calorífico superior, conhecendo-se a composição química elementar da biomassa (GONÇALVES, *et. al*, 2009).

Tanto o PCS quanto o PCI podem ser utilizados nos cálculos de desempenho de sistemas a combustão, a única diferença está no fato de que o PCI pode determinar a parcela relativa à entalpia de evaporação da massa total de água passada aos produtos de combustão, por já considerá-la no estado vapor.

O PCI foi calculado a partir da expressão (1) em função da umidade e do PCS (RENDEIRO *et al*, 2008).

$$\text{PCI} = \text{PCS} - 2440 (9\text{H} + \text{U}) \quad (1)$$

No qual:

PCI – Poder calorífico inferior

PCS – Poder calorífico superior

U – Umidade da amostra em %

H - Teor de hidrogênio

Usou-se para a variável H o valor de 6,5 %, pois em biomassas o teor de hidrogênio varia entre 6 – 6,5 % (RANADE & KAWRE, 2010).

A Tabela 5 apresenta os resultados dos cálculos para o PCI das amostras referentes à castanhola.

**Tabela 5:** Poder Calorífico Inferior da Castanhola

	Material	PCI (J/g) <i>In natura</i>	PCI (J/g) Briquete
Folha	Limbo	14 356	13 475
	Pecíolo	11 276	
Amêndoa	Polpa	13 800	nd
	Casca	15 673	16 612
Galho	Madeira	16 036	16 194
Torta	Amêndoa	16 464	17 414

nd = não determinado

**Fonte:** autora desta dissertação.

Esses valores indicam as quantidades reais de energia disponível em cada biomassa citada e percebe-se que não há uma diferença considerável em relação ao PCS, porém gera uma maior confiabilidade nos resultados apresentados e sugere o potencial energético real da biomassa.

## 6.5 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO ÓLEO

O teor do óleo contido na amêndoa foi de 50%, o que permite uma possibilidade de extração com viabilidade econômica. A composição em ácido graxo do óleo é apresentada na Tabela 6, em que se faz uma comparação com o óleo de soja.

**Tabela 6.** Composição em ácido graxo do óleo da *Terminalia Catappa* L. e do óleo de soja.

Ácido graxo	Óleo da <i>Terminalia Catappa</i> <sup>a</sup> L	Óleo de Soja <sup>b</sup>
Mirístico	0,1	--
Palmítico	28,3	11,0
Palmitoléico	0,9	--
Estearico	4,9	4,0
Oléico	30,0	24,0
Linoléico	32,8	54,0
Linolênico	1,7	7,0

<sup>a</sup> Resultados experimentais**Fonte:** autora desta dissertação.<sup>b</sup> Meneghetti, (2008)

A composição química do óleo ou gordura é essencial, visto que influencia nas propriedades físicas do óleo, como a viscosidade, densidade, a estabilidade térmica e oxidativa, entre outros. Esta também pode servir de base para uma análise preliminar sobre a viabilidade ou não, da matéria prima para a produção de um biocombustível que atenda totalmente os parâmetros de qualidade da norma vigente (DANTAS, 2010).

A composição em ácidos graxos está de acordo com a composição determinada em estudos anteriores (MENEGHETTI, 2008). Em comparação à composição do óleo de soja, observa-se um maior grau de saturação para o óleo de *Terminalia catappa* L. indicando uma perspectiva de maior estabilidade à oxidação. Observa-se uma predominância dos ésteres saturados palmítico (16:0), e oléico (18:0) uma vez que a estabilidade oxidativa é menor quando existe uma menor quantidade de ésteres insaturados, o maior percentual de ésteres saturados indica que o biodiesel da *Terminalia Catappa* L. deve possuir boa estabilidade a oxidação.

Algumas propriedades físico-químicas do óleo da *Terminalia Catappa* L. foram determinadas e comparadas ao óleo de soja, ver Tabela 7.

**Tabela 7:** Propriedades físico-químicas do óleo da *Terminalia Catappa* L. e do óleo de soja

Propriedades	Óleo da <i>Terminalia Catappa</i> L.	Óleo de soja
Massa específica 20°C (kg/m <sup>3</sup> )	913	914
Viscosidade Cinemática 40° C (mm <sup>2</sup> /s)	36,8	32,6
Acidez (ácido oléico %)	5,1	0,3

**Fonte:** autora desta dissertação.

Podemos observar que a densidade do óleo da *Terminalia Catappa* L. é ligeiramente inferior à observada para o óleo de soja. A viscosidade cinemática do óleo da *Terminalia Catappa* L. (36,8) mostrou-se superior à observada para o óleo de soja, provavelmente devido a sua composição em ácido graxo.

O conteúdo de ácido graxo livre determinado em porcentagem (%) de ácido oléico de acordo com o método Ca 5a-40 para o óleo da *Terminalia Catappa* L. é considerada alta

(5%). Este resultado indica que a reação de transesterificação em presença de bases de Bronsted não será a mais indicada para a obtenção do biodiesel, pois nesse caso haveria formação de sabão. Sendo assim foi necessária, para a produção do biodiesel a partir do óleo da castanhola uma reação de esterificação para conversão dos ácidos graxos livres em biodiesel, seguida de uma reação de transesterificação para completa conversão dos triglicerídeos.

## 6.6 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO BODIESEL ETÍLICO E METÍLICO

O rendimento em ésteres, para o biodiesel etílico e metílico, mostrou-se superior a 99%, o que evidencia que o biodiesel obtido a partir da *Terminalia Catappa* L. é uma alternativa viável na produção de bicombustíveis.

Além disso, o biodiesel obtido foi analisado quanto: (i) a sua viscosidade cinemática segundo a norma ASTM D-445; (ii) densidade de acordo com a norma NBR 14065 e (iii) poder calorífico conforme a norma da ABNT 8633; (iv) estabilidade a oxidação segundo a norma EM 14214 e (v) corrosão ao cobre conforme a norma ASTM D-130. Podemos observar os resultados encontrados na Tabela 8, comparativamente as especificações da ANP ([www.anp.gov.br](http://www.anp.gov.br)).

**Tabela 8.** Propriedades do biodiesel metílico e etílico, obtidos a partir do óleo da *Terminalia Catappa* L.

Propriedades do Biodiesel ↓	Biodiesel Etílico	Biodiesel Metílico	Especificação <sup>a</sup>
Massa Específica 20°C (kg/m <sup>3</sup> )	878	879	850 – 900
Viscosidade Cinemática 40°C (mm <sup>2</sup> /s)	5,3	4,3	3,0 – 6,0
Poder Calorífico (J/g)	38 587	38 527	nd
Corrosão ao Cobre	1	1	1
Estabilidade à oxidação (h)	7,54	-	6,0

nd = não determinado

**Fonte:** autora desta dissertação.

<sup>a</sup> de acordo com a Resolução nº 07 da ANP.

O biodiesel por ser um combustível derivado de óleos e gorduras animais ou vegetais está sujeito à oxidação, devido a longos tempos de armazenamento, exposições ao ar e presença de traços de peróxidos que podem aumentar a oxidação e assim diminuir a qualidade do biodiesel. A estabilidade oxidativa do biodiesel depende das quantidades de ácidos graxos saturados e insaturados presentes no óleo utilizado na sua produção. Ácidos graxos saturados são mais estáveis que os insaturados, pois estes favorecem o processo oxidativo. Sendo assim é importante conhecer estabilidade oxidativa do biodiesel para poder estabelecer condições de armazenamento e transporte deste produto (DANTAS, 2010). O biodiesel etílico da *Terminalia Catappa* L. mostrou-se resistente a oxidação, com um tempo de 7,54 horas de estabilidade, este fato se deve as propriedades do óleo da *Terminalia Cattapa* L. que apresenta em sua composição relativa porcentagem de ácido graxo saturado que proporciona maior estabilidade oxidativa do biodiesel.

A corrosão do biodiesel pode afetar todos os materiais em contato com o combustível, principalmente os componentes do motor, e equipamentos de armazenamento e manutenção. Uma quantidade de enxofre contida no combustível é altamente corrosiva e é conhecido como enxofre ativo. Ácidos graxos também podem causar corrosão. Observa-se que para o biodiesel obtido a partir da *Terminalia Cattapa* L. a corrosividade ao cobre atende as normas vigentes de produção de biocombustíveis (ANP, Nº 7), o que indica que teremos um menor percentual de problemas relacionados a armazenamento e manutenção.

O poder calorífico é um importante parâmetro na seleção do combustível e normalmente são encontrados valores inferiores para o biodiesel quando comparados ao diesel de petróleo, devido ao seu conteúdo de oxigênio (FERREIRA, *et al*, 2010). No caso do biodiesel obtido a partir do óleo da *Terminalia Cattapa* L., o poder calorífico foi considerado competitivo tornando este combustível viável em termos de quantidade de energia fornecida após a queima em motores de automóveis.

A viscosidade do biodiesel aumenta com o comprimento da cadeia carbônica, com o grau de saturação e devido às interações intermoleculares presente na molécula, como já foi dito anteriormente. Para o biodiesel da *Terminalia Cattapa* L. a viscosidade se mostrou de acordo com as normas estabelecidas para produção de biodiesel. Podemos observar que o biodiesel metílico apresentou uma viscosidade inferior ao biodiesel etílico, podemos atribuir essa diferença ao tamanho das cadeias de ambos os biodiesel, pois para o biodiesel etílico temos um radical etílico tornando assim a cadeia maior, que pode tornar o combustível mais viscoso que o grupo metílico do biodiesel metílico.

Os valores relativos aos parâmetros físico-químicos aqui estudados, obtidos para o biodiesel em estudo, mostraram que o mesmo atende às especificações de qualidade do biodiesel, segundo a Resolução nº 07 da ANP. Em termos de poder calorífico, os valores obtidos são comparáveis aos observados em outros óleos vegetais de composição em ácidos graxos convencional.

## CONCLUSÕES

A partir dos estudos realizados pode-se concluir que a *Terminalia Catappa* L. pode ser considerada uma promissora fonte de energia renovável, pois agrega uma quantidade de energia comparável as biomassas já existentes.

O poder calorífico observado para a castanhola pode ser comparada com diversas fontes de biomassas já existentes no mercado segundo a literatura, além de ser uma fonte de energia menos poluente se comparadas ao diesel de petróleo.

Suas emissões ao ambiente são menos agressivas, e seus resíduos podem ser aproveitados como nutrientes para novas culturas.

A plantação da castanhola ainda não é considerada comercial, porém esta espécie se mostrou bastante adaptável à região nordestina podendo ser promissora sua plantação em larga escala para aproveitamento energético.

O óleo da castanhola foi obtido a partir dos grãos com bom rendimento (50%), permitindo a possibilidade de exploração econômica. Sua cadeia de ácidos graxos apresenta um maior percentual de saturações o que torna o óleo mais resistente a processos de degradação e torna o óleo de melhor qualidade. O biodiesel obtido a partir do óleo da castanhola apresentou resultados físico-químicos satisfatórios. O biodiesel etílico e metílico apresentaram poder calorífico excelente mostrando seu potencial para produção de energia, além de ser resistente a oxidação e a corrosividade.

Com base nos resultados obtidos neste estudo sobre propriedades de combustível da *Terminalia Catappa* L. pode-se concluir que este material pode ser utilizado como um combustível separado (B100) ou como uma mistura.

## REFERÊNCIAS

- AMIT KUMAR; JAY B. CAMERON; PETER C. FLYNN. Biomass power cost and optimum plant size in western Canada. **Biomass & Bioenergy**, vol. 24, pg. 445-464, 2003.
- ANEEL, Banco de Informações de Geração. Disponível em <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/GeracaoTipoFase.asp?tipo=2&fase=3>>. Acesso em: fevereiro de 2010.
- ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Biodiesel, 2009. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/?id=472>>. Acesso em: 15/02/2009.
- ARAÚJO A. A.S.; MERCURI L. P.; SEIXAS S. R.; MATOS J. R. Determinação dos teores de umidade e cinzas de amostras comerciais de guaraná utilizando métodos convencionais e análise térmica. **Revista brasileira de ciências farmacêuticas**. Vol. 42, n. 2, abr/jun., 2006.
- ARRUDA, F. P.; BELTRÃO, N. E. M.; ANDRADE, A. P.; PEREIRA, W. E.; SEVERINO, L. S. Cultivo de pinhão-manso (*Jatropha curcas* L.) como alternativa para o semi-árido nordestino. **Revista de oleaginosas e fibrosas**, v. 8, p. 789-799, 2004.
- BOOG, G. E.; BIZZO, A. W.; VALE, L. T. "Avaliação do potencial energético dos resíduos de campo da cultura da mandioca. **Revista Raízes e Amidos Tropicais** v. 3, 2007. Disponível em <<http://www.iac.br/Tecnologias/Rtanolmandioca/mandioca.pdf>>. Acesso em setembro de 2010.
- CARNIELLI, F. **O combustível do futuro**. Boletim Técnico, Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG. 2003.
- CASTILLO, M.E.U. Determinacion del poder calorífico de 20 espécies florestales de La Amazônia peruana. **Revista Florestal do Peru**. V. 12(1-2): p. 98-117. 1994.
- CAVALCANTE, M. A.; MAIA, G. A.; FIGUEIREDO, R. W.; TEIXEIRA, E. A. M. Características Físicas e Químicas da Castanhola, *Terminalia Catapa* L. **Ciência Agronomia**, Fortaleza, V.17 (1): pág. 111-116, Junho, 1986.
- CENBIO, Biomassa no Brasil. Disponível em: <[www.cenbio.com.br](http://www.cenbio.com.br)>, acesso em: 15/09/2010 às 14:30
- CORTEZ, L.A.B; LORA, E.E.S.; AYARZA, J.A.C. **Biomassa no Brasil e no mundo**. São Paulo: Editora da UNICAMP, 2008.
- COSTA, D. F. Biomassa como fonte de energia, conversão e utilização. Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia (PIPGE) do Instituto de Eletrotécnica e Energia (IEE) da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2002.
- CUNHA, M.P.S.C.; et al. Estudo químico de 55 espécies lenhosas para geração de energia em caldeiras. In: **Anais 3º Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeiras**, v.2, p. 93-121, São Carlos, 1989.
- DANTAS, M. B. **Blendas de biodiesel**: propriedades de fluxo, estabilidade térmica e oxidativa e monitoramento durante armazenamento (Tese do doutorado), João Pessoa, 2010.
- DELLA, V. P.; KÜHNA, I. Reciclagem de resíduos agro-industriais: cinza de casca de arroz como fonte alternativa de Sílica. **Cerâmica Industrial**, v. 10 (2) Março/Abril, 2005.
- EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Centro Nacional de Milho e Sorgo. Boletim agrometeorológico ano agrícola. Sete Lagoas, 2004.
- EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Centro Nacional de Milho e Sorgo. Documentos 81. Produção de haplóides androgenéticos em milho. Sete Lagoas, MG, 2009. Disponível em <[http://www.cnpms.embrapa.br/publicacoes/publica/2009/documento/Doc\\_81.pdf](http://www.cnpms.embrapa.br/publicacoes/publica/2009/documento/Doc_81.pdf)>. Acesso em 05/01/2010.
- EPE, Empresa de pesquisa energética. Disponível em: [www.epe.gov.br](http://www.epe.gov.br). Acesso em 15/02/2012.

- ESTEVEES, M. **Parcerias para obter Etanol de Batata-doce**. Disponível em <<http://www.embrapa.gov.br/imprensa/noticias/2008/agosto/3a-semana/parceria-para-obter-etanol-de-batata-doce>>. Acesso em: 10/05/2011.
- FARINHAQUE, R. Influência da umidade no poder calorífico da madeira de Bracatinga (*Mimosa scabrella*, Benth), e aspectos gerais de combustão. **FUPEF**; Série Técnica; n. 06, Curitiba, jan. 1981.
- FERREIRA W. L. S.; et al. Characterization of *Syagrus coronata* (Mart.) Becc. Oil and properties of methyl esters for use as biodiesel. **Industrial Crops and Products** **32**, pág. 518–521, 2010
- GOLDEMBERG J., et al. The sustainability of ethanol production from sugarcane. **Energy Policy**, v 36, 2086– 2097, 2008.
- GONÇALVES J. E.; SARTORI M. M. P.; LEÃO A. L. Energia de briquetes produzidos com rejeitos de resíduos sólidos urbanos e madeira de *Eucalyptus grandis*. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.13, n.5, p.657–661, 2009.
- GUARDABASSI, P. **Sustentabilidade da biomassa como fonte de energia perspectivas para países em desenvolvimento** (Dissertação mestrado) Programa Inter-unidades de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- GUARIZ, H. R.; PICOLLI, M. H. S. CAMPANHAR, W. A.; RODRIGUES, B. P.; **Uso de Cinzas de fornos cerâmicos como fonte de nutrientes para aproveitamento na agricultura**. CONGRESSO BRASILEIRO DE RESÍDUO ORGÂNICO, 2010.
- HALL, D.O.; et al. **Uso da Biomassa para Produção de Energia na Indústria Brasileira**. Campinas: Editora da UNICAMP, 2005.
- HAMELINCK, C.N. Ethanol from lingo-cellulosic biomass: techno-economic performance in short, middle and long-term. **Biomass and Bioenergy**, v 28. p 384-410, 2005.
- IEA (International Energy Agency) Energy Balances of non-OECD countries 2002- 2003, Paris, 2005.
- IEA, 2002. World Energy Outlook, 2002. Paris, France, 2002.
- IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. **A Madeira como Combustível**. Publicação 65, Boletim nº 17, 1937.
- IVANI, S. A.; SILVA, B. M. S.; OLIVEIRA, C.; E MÔRO, F. V. **Rev. Bras. Frutic.**, Jaboticabal - SP, v. 30, n. 2, p. 517-522, Junho 2008.
- JARA, E. R. P. **O Poder Calorífico de Algumas Madeiras que Ocorrem no Brasil**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, (Comunicação técnica), 1989.
- JUNIOR F. T. A.; et al. **Utilização de biomassa para briquetagem como fonte de energia alternativa e a disponibilidade deste recurso na região do Cariri-CE**. XXIII Encontro Nac. de Eng. de Produção - Ouro Preto, MG, Brasil, 2003.
- KAREKESI, S., COELHO, S. T., LATA, K. **Traditional Biomass Energy: Improving its Use and Moving to Modern Energy Use**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE FOR RENEWABLE ENERGIES, 2004, Bonn. Thematic Background Paper, Alemanha, 2004.
- KAUTZ, J.; LYSYK, G.; DOCA, M. G. M.; CLEMENTIN, R. M. **Extração do Óleo de Tungue (*Aleuritis fordii*) para a produção de biodiesel**. XVI ENCONTRO DE QUÍMICA DA REGIÃO SUL. RS. 2008.
- LIMA E. A.; ABDALA E. M.; WENZEL A. A. **Influência da Umidade no Poder Calorífico Superior da Madeira**. Comunicado técnico ISSN 1517-5030 Colombo, PR Dezembro, 2008.
- LORA, E.E.S. CORTEZ, L.A.B; LORA, E.E.S.; GOMEZ, E.O. **Biomassa para energia**. Campinas: Editora da UNICAMP, 2008.
- LUENGO, C. A.; BEZZON, G. Energéticos derivados da biomassa. **In: ?Tecnologias de conversão energética da biomassa**. Manaus: EDUA, EFEI, cap 8, 1997.

- LOBO, J. M. C.; LOBO, P.C. **Avaliação do potencial energético de resíduos de biomassa Amazônica**. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, n. 4. 2002, Campinas. Anais eletrônicos. Disponível em: <[http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=MSC000000022002000100026&lng=pt&nrm=abn](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC000000022002000100026&lng=pt&nrm=abn)>. Acesso em 05/11/2010.
- LÔBO, I. P.; FERREIRA, S. L. C.; CRUZ, R. S. Biodiesel: Parâmetros de Qualidade e Métodos Analíticos. **Quim. Nova**, Vol. 32, N° 6, 1596-1608, 2009.
- MACEDO, I. C. (org) **A Energia da Cana-de-açúcar: Doze estudos sobre a agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil e sua sustentabilidade**. São Paulo: Editora Berlendis & Vertecchia, 2005.
- MACEDO, I. C. et al. Greenhouse gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: The 2005/2006 averages and a prediction for 2020. **Biomass and Bioenergy**, v. 32 (4), 2008.
- MENEGHETTI S.M.P.; SANTOS I.C.F; CARVALHO S.H.V., SOLLETTI J.I, W. FERREIRA DE LA SALLES C, K. TEIXEIRA DA SILVA DE LA SALLES C, Studies of *Terminalia Catappa* L. oil: Characterization and biodiesel production . **Bioresource Technology** 99 6545–6549, 2008.
- MONTEIRO, P. Conab eleva moagem de cana 12/13 do país a 602 mi t. Thomson Reuters, BRASIL. Terça-feira, 10 de abril de 2012 11:23 BRT.
- MORO, L.; GONÇALVES, J. L. M. Efeitos da "cinza" de biomassa florestal sobre a Produtividade de povoamentos puros de *Eucalyptus Grandis* e avaliação financeira. **IPEF** n.48/49, p.18-27, jan./dez.1995.
- MOTA C. J. A., SILVA C. X. A. E GONÇALVES V. L. C. Gliceroquímica: novos produtos e processos a partir da glicerina de produção de biodiesel. **Quim. Nova**, Vol. 32, No. 3, 639-648, 2009.
- NOGUEIRA, L. A. H. **Bioenergias e Sustentabilidade: nexos e métodos**. São Paulo Editora: LTC, 2005.
- NETO E. M. L.; SOUZA R. M. Comportamento e características das espécies arbóreas nas áreas verdes públicas de Aracaju, Sergipe. **Scientia plena** vol. 7, num. 1, 2011.
- QUIRINO, W. F.; VALE, A. T.; ANDRADE, A. P. A.; ABREU, V. L. S.; AZEVEDO, A. C. S. Poder calorífico da madeira e de materiais ligno-celulósicos. **Revista da Madeira**, nº 89 pag. 100-106, abril 2005.
- RANADE, P.; KAWRE, J. P. **A seminar report on hydrogen from biomass**, 2010. Disponível em: <<http://www.scribd.com/doc/7365674/hydrogen-from-biomass>>. Acesso em: 18 dez. 2010.
- RAMOS L. P., SILVA F. R. MANGRICH A. S. CORDEIRO C. S. Tecnologias de Produção de Biodiesel. **Rev. Virtual Quim.** Vol 3, No. 5, 385-40, 2011.|
- RENDEIRO, G. Energia – **Fontes alternativas** – Brasil. Recursos energéticos – Brasil. 3. Biomassa florestal. 4. Biomassa vegetal. I.II. Brasil. Ministério das Minas e Energia. III. ISBN 978-85-98341-05-7, 2008.
- RINALDI, R.; et al. Síntese de biodiesel: uma proposta contextualizada de experimento para laboratório de química geral. **Quim. Nova**, Vol. 30, No. 5, 1374-1380, 2007.
- SANTOS, E. C. S.; SOUZA, R. C. R. **Avaliação de biomassa para uso energético na indústria oleira no município de Iranduba, estado do Amazonas, Brasil**: um estudo de caso. Resumo apresentado ao Núcleo de Eficiência Energética - NEFEN, Faculdade de Tecnologia, Universidade Federal do Amazonas, 2009.
- SANTOS O. I. B.; RATHAMANN R.; BORBA R. F. C.; PADULA R. O. **Panorama atual da cadeia produtiva do biodiesel no Brasil**: Uma proposta de estrutura analítica para a produção de Combustível renovável a partir de oleaginosas. XLV CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA, 2007.

- SANCHES J. H.; MAGRO T. C.; SILVA D. F. Distribuição espacial da *Terminalia catappa* L. em área de restinga no Parque Estadual da Serra do Mar, Núcleo Picinguaba, Ubatuba/SP. **Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Florianópolis, Brasil, 21-26 abril 2007, INPE, p. 1831-1838.
- SILVIA A. I. SILVA B. M. S.; C. O. MÔRO F. V. Morfologia de frutos, sementes e plântulas de castanheira (*Terminalia Catappa* L. – COMBRETACEAE). **Rev. Bras. Frutic.**, Jaboticabal - SP, v. 30, n. 2, p. 517-522, Junho 2008.
- Vieira S. A.. **Análise do processo produtivo dos tijolos cerâmicos No estado do Ceará da extração da Matéria-prima à fabricação** (Monografia submetida à Coordenação do Curso de Engenharia Civil) da Universidade Federal do Ceará em 2009.
- SILVA J. N., SOBRINHO J. C., SAIKI E. T. Utilização de biomassa na secagem de produtos agrícolas via Gaseificação com combustão adjacente dos gases produzidos. **Eng. Agríc., Jaboticabal**, v.24, n.2, p.405-411, maio/ago. 2004.
- SILVERSTEIN, R. M.; WEBSTER, F. X.; KIEMLE, D. J. **Identificação Espectrométrica de Compostos Orgânicos**. 7 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.
- TEIXEIRA C. S.; BEATRIZ M. M.; ROCHA K. M.; ADRIAN G. **Atlas de Bioenergia do Brasil** – São Paulo Projeto Fortalecimento Institucional do CENBIO, Convênio 007/2005 – MME, 2008.
- VALE, A. T.; BRASIL, M. A. M.; LEÃO, A. L. Quantificação e caracterização energética da madeira e da casca de espécies do cerrado. **Ciência Florestal**. V.12, n.1, p. 71-80, 2002.
- WILTSEE, G.A. **Lessons learned from existing biomass power plants**. California, biomass, a growth opportunity in green energy and value-added products. Proceedings of the 4th biomass conference of the Americas, 1999.