



# **GASEIFICAÇÃO DA MACAÚBA**

**ERON SARDINHA DE OLIVEIRA**

**2008**

**ERON SARDINHA DE OLIVEIRA**

**GASEIFICAÇÃO DA MACAÚBA**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação de Mestrado em Engenharia de Alimentos, Área de Concentração em Fenômenos de Transferência na Agroindústria, para obtenção do título de “Mestre”.

**Orientador:**  
**DSc. JADIR NOGUEIRA DA SILVA**

**Co-orientador:**  
**DSc. MODESTO ANTONIO CHAVES**

ITAPETINGA  
BAHIA – BRASIL  
2008

664.842 Oliveira, Eron Sardinha de.

O46g Gaseificação da macaúba / Eron Sardinha de Oliveira. – Itapetinga, BA: UESB, 2008.  
83p.

Dissertação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos da Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia - UESB - *Campus* de Itapetinga. Sob a orientação do Prof. DSc. Jadir Nogueira da Silva e co-orientação Prof. DSc. Modesto Antonio Chaves.

1. Frutas – Desidratação. 2. Gaseificação da macaúba. 3. Gaseificador de biomassa – Macaúba – Desidratação de frutas. I. Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos, *Campus* de Itapetinga. II. Silva, Jadir Nogueira da. III. Chaves, Modesto Antonio. IV. Título.

**CDD(21): 664.842**

Catálogo na Fonte:

Adalice Gustavo da Silva – CRB 535-5ª Região  
Bibliotecária – UESB – Campus de Itapetinga-BA

Índice Sistemático para desdobramentos por Assunto:

1. Gaseificador - Construção
2. Energia renovável – Gaseificação
3. Energia da biomassa - Gaseificação

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO SUDOESTE DA BAHIA – UESB**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA DE ALIMENTOS**

*Área de Concentração em Fenômenos de Transferência na Agroindústria*

*Campus de Itapetinga – BA*

**TERMO DE APROVAÇÃO**

**Título: “GASEIFICAÇÃO DA MACAÚBA”.**

**Autor: ERON SARDINHA DE OLIVEIRA**

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de **Mestre em Engenharia de Alimentos**, área de concentração em **Fenômenos de Transferência na Agroindústria**, pela Banca Examinadora:

---

Prof. DSc. Jadir Nogueira da Silva – UFV  
Presidente

---

Dr. Volkhard Scholz – Leibniz Institut für Agrartechnik – ATB

---

Prof. D.Sc. Evandro Sena Freire - UESC

Data da defesa: 28/11/2008

UESB – Campus Juvino Oliveira, Praça Primavera nº 40 – Telefone: (77) 3261-8629  
Fax: (77) 3261-8701 – Itapetinga – BA – CEP: 45.700-000 – E-mail: ppgeal@uesb.br

## **AGRADECIMENTOS:**

- Ao professor **Jadir** pelo excesso de zelo como orientador. Que cada dia seja um acréscimo de felicidade em sua vida.
- Aos professores do curso, representados por **Modesto**, que, pelo incentivo, ganhou a minha amizade pelo resto de minha vida.
- Aos colegas, com destaque para **Jaime**, que esteve mais perto nas horas difíceis.
- Aos familiares, principalmente **Fabiana, minha esposa e Eronildo Júnior**, que me ajudaram em todos os momentos.
- **Svete**, que todos os passos de tua vida sejam iluminados pela luz de tua mente.

## RESUMO

OLIVEIRA, ERON SARDINHA DE. **Gaseificação da macaúba**. Itapetinga-BA: UESB, 2008. 77p. (Dissertação - Mestrado em Engenharia de Alimentos - Fenômenos de Transferência na Agroindústria).\*

Para desenvolvimento de uma atividade produtiva, com reduzida degradação ambiental, torna-se imperativa a opção por fontes de energia renováveis. A gaseificação vem se destacando entre as formas de se obter energia da biomassa. Ela restringe o oxigênio necessário à combustão completa de um combustível e, em elevadas temperaturas, gera gás combustível de alta qualidade. Este trabalho de pesquisa teve por objetivo a construção de um gaseificador de biomassa e análise de sua viabilidade na geração de ar quente para desidratação de frutas com o uso de macaúba como combustível. A desidratação traz algumas vantagens sobre o consumo de frutas in natura, como redução da taxa de desperdício e aumento da vida de prateleira das mesmas. Visando a atingir tal objetivo, foi construído um gaseificador na Área Experimental do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa. O gaseificador é composto por um reator, um combustor adjacente para queima imediata dos gases produzidos e um misturador dos gases comburidos com o ar atmosférico, para a desidratação de frutas. Antes da realização do experimento, foram verificadas algumas das principais propriedades físicas da macaúba, como massa específica, porosidade e poder calorífico. Testado o equipamento, foi iniciado o experimento com amostras de macaúba, por meio de medições de temperaturas nos cinco pontos principais do conjunto reator-combustor-misturador, variando a área de entrada primária de ar do combustor com a frequência do motor, em esquema fatorial 3X3 com três repetições e intervalo de medições de cinco minutos. Em referência à construção civil, o conjunto teve estabilidade e, com as demais peças e acessórios, reagiu em segurança perante as solicitações de trabalho, principalmente temperaturas. Concluímos com algumas considerações sobre o uso da macaúba como biomassa. Neste sentido, os resultados analíticos da pesquisa nos levam a inferir que a macaúba apresenta potencial, via gaseificação, para a desidratação de frutas.

**Palavras - chave:** Construção, Gaseificação, Macaúba, Desidratação, Frutas.

---

\*Orientador: Jadir Nogueira da Silva, DSc., UFV e Co-orientador: Modesto Antonio Chaves, DSc., UESB.

## ABSTRACT

OLIVEIRA, ERON SARDINHA DE. **Macaúba gasification.** Itapetinga-BA Conquista-BA: UESB, 2008. 77p. (Dissertation – Master Degree in Food Engineering – Transport Phenomena in the Agro industry).\*

For development of a productive activity, with reduced environmental degradation, it is imperative to switch to renewable energy sources. The gasification has been increasing among the ways of obtaining energy from biomass. It restricts the oxygen needed for complete combustion of a fuel and, in high temperatures, it generates high-quality fuel gas. This research study aimed to build a biomass gasifier and to analyze its viability in the generation of hot air for dehydration of fruits using "macaúba" as fuel. The dehydration brings some advantages over the consumption of fruit *in natura*, such as reducing the rate of waste and increasing their shelf-life. Aiming to achieve these goals, a gasifier was built, in Experimental Area of the Department of Agricultural Engineering, Federal University of Viçosa. The gasified is composed by a reactor, an adjacent combustor to immediate burn of the produced gases, and a mixer to mix these gases with the atmospheric air for dehydration of fruits. Before the experimental procedure, some of the main physical properties of "macaúba", such as density, porosity and calorific value were found. The experimental procedure started after the preliminary tests of the equipment. Samples of "macaúba" were used and temperature measurements in the five main points of the set-combustor reactor-mixer were made. The input area of primary air combustor was changed and also the frequency of the engine, in factorial 3X3 experimental design with three repetitions. The temperatures were measured every five minutes. In reference to construction, the set showed stability and with the other parts and accessories, they responded, with security, to the demands of work, mainly temperatures. We conclude with some considerations on the use of "macaúba" as biomass. In this sense the analytical results of the research lead us to infer that the "macaúba" has the potential to be gasified and used for the dehydration of fruits

**Keywords:** Constrution, Gasification, Macaúba, Fruit dehydration.

---

\*Adviser Jadir Nogueira da Silva, DSc., UFV e Co-adviser: Modesto Antonio Chaves, DSc., UESB

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Preços médios, em R\$/kg, de frutas cristalizadas e in natura .....	09
<b>Tabela 2</b> - Produtividade média por hectare de algumas oleaginosas .....	25
<b>Tabela 3</b> - Produtividade agrícola da macaúba .....	26
<b>Tabela 4</b> - Produtos do coco macaúba, segundo a UBCM .....	32
<b>Tabela 5</b> - Propriedades físicas da macaúba .....	40
<b>Tabela 6</b> - Dados do teste de umidade .....	42
<b>Tabela 7</b> - Canais ligados ao sistema de aquisição de dados .....	43
<b>Tabela 8</b> - Frequências utilizadas e aberturas da entrada primária .....	45
<b>Tabela 9</b> - Medição das temperaturas de acordo com a variação entre as frequências e as aberturas laterais .....	47
<b>Tabela 10</b> - ANOVA de Ch0 .....	49
<b>Tabela 11</b> – ANOVA de Ch1 .....	49
<b>Tabela 12</b> – ANOVA de Ch2 .....	49
<b>Tabela 13</b> – Teste de Tukey para Ch2 .....	50
<b>Tabela 14</b> – ANOVA de Ch3.....	50
<b>Tabela 15</b> – ANOVA de Ch4.....	50
<b>Tabela 16</b> – Gaseificação de carvão vegetal (pata de vaca) .....	59
<b>Tabela 17</b> – Gaseificação de eucalipto .....	61
<b>Tabela 18</b> – C1- C2- C3 Resultado das médias das 3 medições .....	71

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 01</b> – Competição de produtos naturais e desidratados e exposição em um mesmo supermercado .....	09
<b>Figura 02</b> – Secadores de bandejas usados na desidratação de frutas .....	10
<b>Figura 03</b> – Conversão energética da biomassa e seus principais produtos .....	11
<b>Figura 04</b> – Denominação dos gaseificadores de leito fixo: contracorrente e concorrente .....	15
<b>Figura 05</b> – Produtos da pirólise da madeira .....	16
<b>Figura 06</b> – Estrangulamento da zona de combustão de um gaseificador concorrente .....	20
<b>Figura 07</b> – Esquema das diferenças entre um gaseificador contracorrente e concorrente .....	21
<b>Figura 08</b> – A) Palmeira da macaúba, B) Cacho na palmeira da macaúba, C) Frutos de macaúba e D) Frutos e Coco secos .....	27
<b>Figura 09</b> – Estrutura do fruto da macaúba: Desenho do fruto em maturação e foto do fruto parcialmente seco .....	28
<b>Figura 10</b> – A) Depósito de macaúba, B) Despolpador e britador da fábrica, C) Óleo da polpa e D) Sabões da amêndoa e do endocarpo .....	29
<b>Figura 11</b> – Macaubeira crescendo em cascas duras britadas, subproduto da macaúba .....	30
<b>Figura 12</b> – Fluxograma de operações, processos e produtos da macaúba na fábrica da UBCM .....	31
<b>Figura 13</b> – Candombás e flor de canela-de-ema.....	32
<b>Figura 14</b> – Etapas da construção do gaseificador. A) Construção da base, B) Construção do reator e C) Saída do gás do reator .....	37
<b>Figura 15</b> – Etapas da construção do combustor e da câmara de mistura. Ventilador acoplado ao final da câmara de combustão e mistura, a fim de succionar os gases provenientes da queima da biomassa .....	38
<b>Figura 16</b> – Gaseificador concorrente finalizado .....	39
<b>Figura 17</b> – A) recipiente adaptado para a medição das propriedades físicas da macaúba; B) coco macaúba selecionado para a medição das propriedades .....	40
<b>Figura 18</b> – Esquema da localização dos canais para coleta de dados .....	44
<b>Figura 19</b> – Janela para visualização da chama piloto (Ch3) .....	44
<b>Figura 20</b> – Saída de ar do gaseificador (Ch4) .....	45
<b>Figura 21</b> – Vista mostrando a posição das aberturas e das <i>frequências</i> .....	46
<b>Figura 22</b> – Abertura A1: entrada de ar primário com a região central aberta .....	46
<b>Figura 23</b> – Abertura A2: entrada de ar primário com as regiões laterais abertas .....	46
<b>Figura 24</b> – Abertura A3: todas as três regiões abertas .....	47
<b>Figura 25</b> – Preparo para gaseificação de carvão vegetal .....	59
<b>Figura 26</b> – Preparo para gaseificação de eucalipto .....	61
<b>Figura B1</b> – Endocarpos da macaúba entre seixos rolados na natureza .....	64
<b>Figura B2</b> – Corte do gaseificador .....	65
<b>Figura B3</b> – Planta do gaseificador (h=30cm) .....	66
<b>Figura B4, B5, B6, B7, B8, B9 e B10</b> .....	67

## LISTA DE SIGLAS

<b>CEFET</b>	Centro Federal de Educação Tecnológica.
<b>CETEC</b>	Centro Tecnológico de Minas Gerais.
<b>DEA</b>	Departamento de Engenharia Agrícola – UFV.
<b>DEF</b>	Departamento de Engenharia Florestal.
<b>GLP</b>	Gás Liquefeito de Petróleo.
<b>PCS</b>	Poder Calorífico Superior.
<b>PCI</b>	Poder Calorífico Inferior.
<b>TECPAR</b>	Instituto de Tecnologia do Paraná.
<b>UBCM</b>	Unidade de Beneficiamento do coco macaúba.
<b>UESB</b>	Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia.
<b>UFV</b>	Universidade Federal de Viçosa.

## SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	i
<b>RESUMO</b> .....	ii
<b>ABSTRACT</b> .....	iii
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	iv
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	v
<b>LISTA DE SIGLAS</b> .....	vi
<b>1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA</b> .....	08
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	13
2.1 Gaseificadores .....	13
2.1.1 Fundamentos .....	14
2.1.2 Classificação de gaseificadores .....	14
2.1.3 Reações de gaseificação .....	15
2.2 Gaseificador concorrente .....	19
2.3 Gaseificação de biomassa .....	21
2.3.1 Combustível .....	22
2.3.2 Vantagens.....	22
2.3.3 Usos.....	23
2.4 Biomassa como fonte alternativa .....	23
2.4.1 Macaúba como combustível sólido .....	24
2.4.2 Candombá .....	32
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	34
3.1 Massa específica aparente .....	34
3.2 Massa específica unitária ou real .....	34
3.3 Porosidade .....	35
3.4 Teor ou conteúdo de umidade .....	35
3.5 Poder calorífico .....	35
3.6 Análise estatística .....	36
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	37
4.1 Construção do sistema de gerador de calor .....	37
4.1.1 Construção do reator.....	37
4.1.2 Construção do combustor.....	37
4.2 Propriedades físicas da macaúba.....	39
4.2.1 Massa específica aparente .....	40
4.2.2 Massa específica real .....	41
4.2.3 Porosidade.....	41
4.2.4. Sondagem da umidade da macaúba .....	42
4.2.5. Cálculo do poder calorífico .....	42
4.3. O Experimento .....	43
4.4. Análises estatísticas dos resultados .....	48
<b>5. RESULTADOS E CONCLUSÕES</b> .....	51
<b>6. RECOMENDAÇÕES</b> .....	52
<b>7. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	53
<b>8. REFERÊNCIAS</b> .....	54
<b>9. ANEXOS</b> .....	59

## 1 – INTRODUÇÃO

A tecnologia de alimentos objetiva o consumo do alimento em época diferente da safra ou em locais onde não é produzido. Para tanto, a tecnologia busca combater a perecibilidade e otimizar o volume para transporte. A perecibilidade é causada por microrganismos que necessitam de água para se multiplicarem. A remoção da umidade diminui a água disponível dos alimentos (atividade de água) e minimiza conseqüentemente o seu volume, facilitando o transporte. Segundo Baruffaldi & Oliveira (1998), os produtos alimentícios secos e os desidratados estão entre os que sofrem pequenas modificações e, principalmente, de ordem física. Definem-se como secos quando perdem água por evaporação e desidratados quando perdem água por vaporização. Os mesmos autores denominam de operações as transformações físicas da matéria prima e utilizam o termo processamento para reações químicas.

Segundo Park *et al* (2007), o objetivo máximo de qualquer processamento é a manutenção das qualidades do produto. É o critério de conservação de qualidade que dita o processo de desidratação.

O processo de desidratar alimentos é antigo e foi intensamente praticado durante as duas grandes Guerras Mundiais, nas quais enormes quantidades de alimentos foram desidratadas para alimentar as tropas.

Dentre as matérias primas de origem vegetal, as frutas são muito consumidas, devido, principalmente, à sua riqueza em aroma e sabor.

Estudos comprovam que as frutas, ao serem desidratadas, não perdem o seu valor nutricional. Com isso, a demanda por esse tipo de produto tem crescido nos últimos anos, por conta, principalmente, do (a):

- Maior preocupação com a saúde e com a qualidade nutricional dos alimentos
- Minimização das perdas;
- Envelhecimento da população, o que aumenta o grupo das pessoas integrantes da terceira idade, que preferem esse tipo de alimento;
- O processamento, pelo qual o produto passa a proporcionar menor deterioração;
- Preparo rápido e fácil;
- Possibilidade de consumo em qualquer época do ano;
- Redução de volume, facilitando transporte e armazenamento.

Além disso, grande parte dos consumidores já prefere os produtos naturais, como as frutas desidratadas, e, concomitantemente, cresce a importância de buscar alternativas sustentáveis para o processo de desidratação, a fim de satisfazer essas necessidades.

O Brasil é um dos três maiores produtores mundiais de frutas, com uma produção que supera 34 milhões de toneladas. A base agrícola da cadeia produtiva das frutas abrange 2,2 milhões de hectares, gera 4 milhões de empregos diretos (2 a 5 pessoas por hectare) e um PIB agrícola de US\$ 11 bilhões. Além disso, para cada 10.000 dólares investidos em fruticultura,

são gerados três empregos diretos permanentes e dois empregos indiretos, conforme Rodrigues (2004). Apesar dos números gigantescos, essa pesquisadora afirma que o consumo per capita de frutas na Espanha, Itália e Alemanha é o dobro do consumo brasileiro. Observa também que, em 2002, o Brasil importou 172000 t de frutas desidratadas, enquanto a exportação foi de apenas 12000 t.

A prática de desidratação é corriqueira (Figura 1) e extremamente relevante, pois além dos benefícios citados, agrega valor monetário aos produtos agrícolas, tornando-se comum a competição entre produtos naturais e desidratados, conforme se observou em uma visita realizada no dia 26 de agosto 2008, em um supermercado de Vitória da Conquista.



**Figura 01** – Competição de produtos naturais e desidratados e exposição em um mesmo supermercado.

Com o objetivo de verificar a valorização dos preços das frutas cristalizadas, processo posterior à desidratação, relativa ao preço que as mesmas teriam na forma in natura, foi realizada uma pesquisa no mesmo supermercado e no mesmo dia, cujos resultados estão na Tabela 1.

**Tabela 1** – Preços médios, em R\$/kg, de frutas cristalizadas e in natura.

<b>FRUTA</b>	<b>Forma cristalizada</b>	<b>Forma in natura (Bruto)</b>	<b>Forma in natura (Parte consumível)</b>
<i>Abacaxi</i>	25,00	2,35	3,05
<i>Ameixa</i>	26,80	7,74	-
<i>Banana comum</i>	14,90	1,87	2,35
<i>Banana diet</i>	24,40		
<i>Coco seco</i>	26,40 (Ralado)	2,98	4,17
<i>Laranja</i>	21,00	1,12	-
<i>Mamão</i>	18,00	0,89	1,25

<i>Uva</i>	23,80	4,96	-
------------	-------	------	---

Industrialmente, a desidratação é definida como secagem (retirada de água) pelo calor produzido artificialmente sob condições de temperatura, umidade e corrente de ar cuidadosamente controlado. Em resumo, o aumento da temperatura do produto a ser desidratado força a evaporação da água, enquanto a circulação do ar remove a umidade evaporada, de acordo com Rodrigues (2004). Durante a secagem, é necessária, portanto, uma fonte de calor para evaporar a umidade da fruta (transferência de calor) e também um sorvedor para remover o referido vapor (transferência de massa).

A energia calorífica demandada por esse processo pode ser suprida pelo sol, gás, lenha ou energia elétrica, sendo os custos com a fonte energética a parte mais onerosa. Esse gasto energético decorre do uso de equipamentos para a remoção da água, como, por exemplo, os secadores de bandeja (Figura 02).

A desidrataação pode utilizar o ar como meio de aquecimento e de transporte da umidade. No experimento proposto neste trabalho, será utilizada a transmissão de calor na produção de vapor de ar úmido que será lançado diretamente sobre as frutas.

Antes da desidrataação, as frutas passam por uma série de procedimentos, tais como: recepção da fruta, lavagem, sanitização, descascamento, corte etc.



**Figura 02** - Secadores de bandejas usados na desidrataação de frutas

Fonte: <http://www.empregoerenda.com.br> Fonte: [www.codevasf.gov.br](http://www.codevasf.gov.br)

Na secagem de produtos agrícolas, são utilizados, de forma geral, queimadores e fornalhas para aquecimento do ar, utilizando combustíveis como, por exemplo, lenha, Gás Liquefeito de Petróleo (GLP) e carvão vegetal. Nesse processo de secagem, com as fornalhas de fogo indireto, obtém-se ar quente limpo, isento de odor e impurezas, no entanto é um dispositivo que ainda apresenta pouca eficiência térmica. As fornalhas de fogo direto possuem

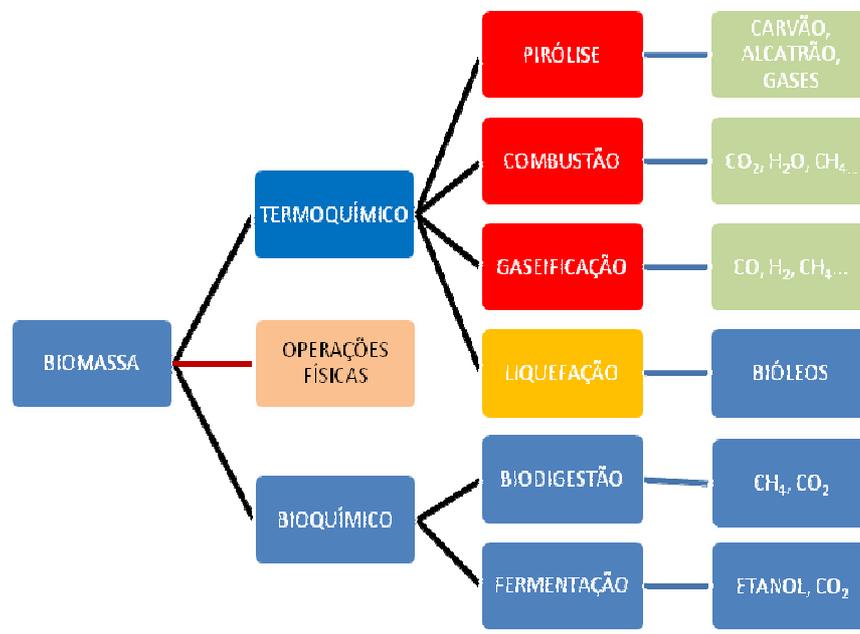
eficiência térmica mais elevada, porém partículas e odores podem estar presentes no ar de secagem, o que desvaloriza o produto.

Diante desse contexto e da necessidade de uma fonte calorífica para o processo de desidratação, os gaseificadores podem proporcionar eficiência energética mais elevada que as fornalhas de fogo indireto, o que torna o processo de gaseificação viável economicamente. Além disso, proporcionam outros benefícios, como obtenção do ar quente necessário através de alternativas que causem menos impactos negativos ao meio ambiente, com o uso de fontes renováveis, evitando a dependência dos combustíveis fósseis. Dessa forma, vários processos ganham sustentabilidade ambiental e econômica, dentre eles, a desidratação de frutas.

Dentre as fontes renováveis de energia, focaremos a biomassa, com designação para materiais de origem orgânica, não fósseis, que, queimados diretamente ou transformados, possuam aproveitamento energético.

Há diversas tecnologias de conversão energética da biomassa, e os combustíveis gerados podem ser sólidos, líquidos ou gasosos, estes dois últimos são decorrentes da transformação da biomassa.

As tecnologias existentes e seus principais produtos são apresentados na Figura 03. Combustão (queima direta) e, principalmente, gaseificação serão focadas durante o desenvolvimento deste trabalho.



**Figura 03** - Conversão Energética da biomassa e seus principais produtos

A gaseificação é definida como o processo de conversão da biomassa, ou de qualquer combustível sólido, em um gás energético, por meio da oxidação parcial a temperaturas

elevadas, segundo Sánchez *et al* (1997). Nesse processo, reduz-se a quantidade de ar usada na combustão até que a biomassa se separe nos seus componentes químicos.

Os principais produtos da gaseificação são os gases combustíveis CO, H<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>, acompanhados dos inertes CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O.

Algumas biomassas que podem ser gaseificadas possuem origem florestal, como a lenha e a madeira. Outras se originam da atividade agrícola, a exemplos da palha, casca, torta, bagaço e resíduos de culturas como cana, milho e café. Também os resíduos urbanos, a exemplo de lixo doméstico, papéis e tecidos, são englobados como biomassa. De forma semelhante aos derivados do petróleo, o gás de biomassa pode ser usado em caldeiras, fornos e secadores, como também em motores de combustão interna.

A valorização da biomassa como insumo energético moderno surgiu na década de 70 com as crises do petróleo em 1973 e 1979. Na ocasião, a biomassa passou a ser considerada como alternativa viável para atendimento às demandas por energia térmica e de centrais elétricas de pequeno e médio porte. Entretanto, a partir de 1985, os preços do petróleo voltaram a despencar, diminuindo novamente o interesse por energias alternativas. Mais tarde, na década de 90, a biomassa volta a ganhar destaque no cenário energético mundial, devido ao desenvolvimento de tecnologias mais avançadas de transformação, à ameaça de esgotamento das reservas de combustíveis fósseis e à incorporação definitiva da temática ambiental nas discussões sobre desenvolvimento sustentável. Outro fator determinante foi à assinatura do Protocolo de Quioto em 1997, no qual ficou estabelecido que os países em desenvolvimento deveriam promover reduções significativas nas emissões de gases de efeito estufa, indicando que a participação de energias renováveis tenderá a ocupar um lugar de destaque na matriz energética mundial, como observam Barros & Vasconcelos (2001).

Visando a contribuir com tecnologias de processamento de biomassa com fins energéticos e que proporcionem o uso racional e inteligente dos recursos naturais, este trabalho objetivou:

- Construir um gaseificador com um combustor adjacente para queima imediata dos gases e, acoplado a este sistema, um misturador de gases de combustão com o ar atmosférico, visando a atingir a temperatura do ar ideal para desidratação de frutas;
- Obter as principais propriedades físicas da macaúba, a saber: massa específica real e aparente, porosidade e poder calorífico;
- Testar o gaseificador construído, utilizando como combustível a macaúba e carvão vegetal (ou o candombá) como combustível de ignição;
- Estimar o potencial do uso da gaseificação da macaúba na produção de ar aquecido para desidratação de frutas tropicais.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Gaseificação

Gaseificação, como o próprio nome diz, é, basicamente, a conversão de combustíveis sólidos (madeira, rejeitos de agricultura, entre outros) em uma mistura gasosa combustível, através de reações termoquímicas, envolvendo vapor e oxigênio do ar. O processo de gaseificação é definido como uma combustão parcial da biomassa. A combustão parcial ocorre quando o ar ou, mais precisamente, o oxigênio está em quantidade inferior ao que seria necessário para uma queima completa da biomassa. Em uma combustão completa, dado que a biomassa contém moléculas de carbono, hidrogênio e oxigênio, obtém-se como produto o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e vapor de água ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Já em uma combustão parcial, produzem-se monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ) e hidrogênio ( $\text{H}_2$ ), ambos combustíveis. Em princípio, qualquer tipo de biomassa pode ser convertido em combustível gasoso por meio desse processo. O gás provindo da gaseificação é popularmente conhecido como gás de baixo poder calorífico, devido à grande porcentagem de nitrogênio, que não é um gás combustível.

O gaseificador é essencialmente um reator químico onde ocorrem várias reações químicas e físicas. Dentro do reator, a biomassa perde umidade, aquece, sofre pirólise, oxida (combustão) e se reduz por toda a extensão do reator até chegar ao final como uma mistura combustível gasosa. Neste trabalho, usamos também o nome gaseificador para o conjunto abrangente reator-combustor-misturador.

Segundo Pinheiro & Valle (1995), a combustão exige uma quantidade estequiométrica de ar chamado teórico. Contudo, para assegurar uma combustão completa, é necessário um excesso de ar, determinante na eficiência combustiva, pois controla o volume, temperatura e entalpia dos produtos da combustão. Os autores recomendam um excesso de ar de 20 a 25% acima do ar estequiométrico (teórico), para queima de madeira em fornalha de grelha. Afirmam ainda que um grande excesso de ar é indesejável, pois aumenta as perdas de calor, reduz a eficiência e diminui a temperatura e comprimento da chama.

Apesar de as perdas de energia na conversão da madeira em gás, a gaseificação ainda é um processo energeticamente competitivo com a combustão direta quando se consideram as eficiências globais de aproveitamento do combustível. Como a combustão da madeira deve ser realizada com grande excesso de ar (até 50 %), para evitar formação excessiva de fumos, a eficiência de queima situa-se entre 60 a 75 %, dependendo da umidade da madeira, do controle de ar e das características da fornalha. Já a queima do gás pode ser feita com pequeno excesso de ar (de 5 a 20 %), com alta eficiência, da ordem de 80 a 90 %. Assim, considerando a eficiência da conversão da madeira em gás de 80 %, tem-se a eficiência global na ordem de 65 a 80 %, equivalente àquela da queima direta, conforme observam D'Ávila & Makray (1981).

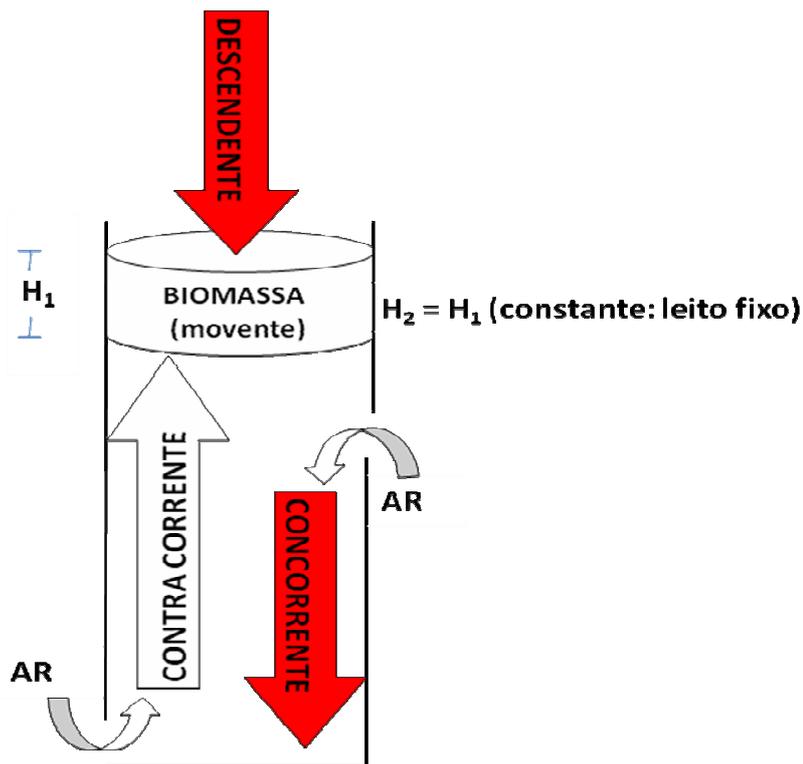
### **2.1.1. Fundamentos**

Segundo Lora apud Santos (2003), a quantidade de oxigênio fornecida ao sistema para que ocorra a gaseificação deve ser na ordem de 20 a 40% da necessidade estequiométrica. Este valor é conhecido como fator de ar, coeficiente estequiométrico, razão de equivalência ou taxa de equivalência. Assim, pode-se afirmar que a gaseificação difere basicamente da combustão pelo fato de não utilizar a massa de ar teórica necessária para a oxidação completa do combustível. Sendo assim, restringe-se a entrada de ar a certos valores, de tal modo que ocorram, além de reações de oxidação (completa e parcial), reações de redução, promovendo a formação do gás combustível de amplo uso.

### **2.1.2. Classificação de gaseificadores**

A gaseificação é uma degradação térmica que transforma um combustível sólido em um gás combustível ou gás de síntese. O tipo de gás fica definido pelos tipos de gaseificador e de biomassa. Para produção do gás de síntese, há exigência de gaseificadores mais sofisticados, que funcionem pressurizados com oxigênio. Para produção de gás combustível, os gaseificadores são mais simples e subdivididos em leito fixo (contracorrentes ou concorrentes) e leitos fluidizados. A biomassa, movendo-se em sentido descendente, estabelece dois subgrupos de gaseificadores de leito fixo, relacionados aos sentidos do agente oxidante: contracorrente, quando o fluxo de ar é ascendente, e gaseificadores concorrentes, quando os fluxos (biomassa e ar) são no mesmo sentido.

O nome “leito fixo” provém do fato de a camada de biomassa mover-se, dentro do reator, com altura constante. “Mover” faz com que o gaseificador seja também conhecido como leito movente, conforme ilustração da Figura 04, abaixo.



**Figura 04** - Denominação dos tipos de gaseificadores de leito fixo: Contracorrente e concorrente.

Os gaseificadores podem ser classificados de acordo com os seguintes fatores:

- Tipo de agente gaseificador: ar, hidrogênio, oxigênio e vapor de água.
- Direção da biomassa e do agente de gaseificação: concorrente, contracorrente, fluxo direto, fluxo cruzado, leito fluidizado.
- Tipo e forma da biomassa: resíduos agrícolas, resíduos sólidos urbanos, biomassa peletizada, entre outros.
- Poder calorífico do gás produzido: baixo, médio e alto.
- Pressão de trabalho: baixa (atmosférica) e pressurizados.

### 2.1.3. Reações de gaseificação

São quatro as reações típicas que ocorrem dentro do reator: secagem da biomassa (operação física), pirólise (desvolatilização), combustão (oxidação) e redução (gaseificação, propriamente dita). Embora existam zonas onde mais de uma reação ocorra, pode-se dizer que, dentro do reator, existem regiões bem definidas para cada uma dessas reações.

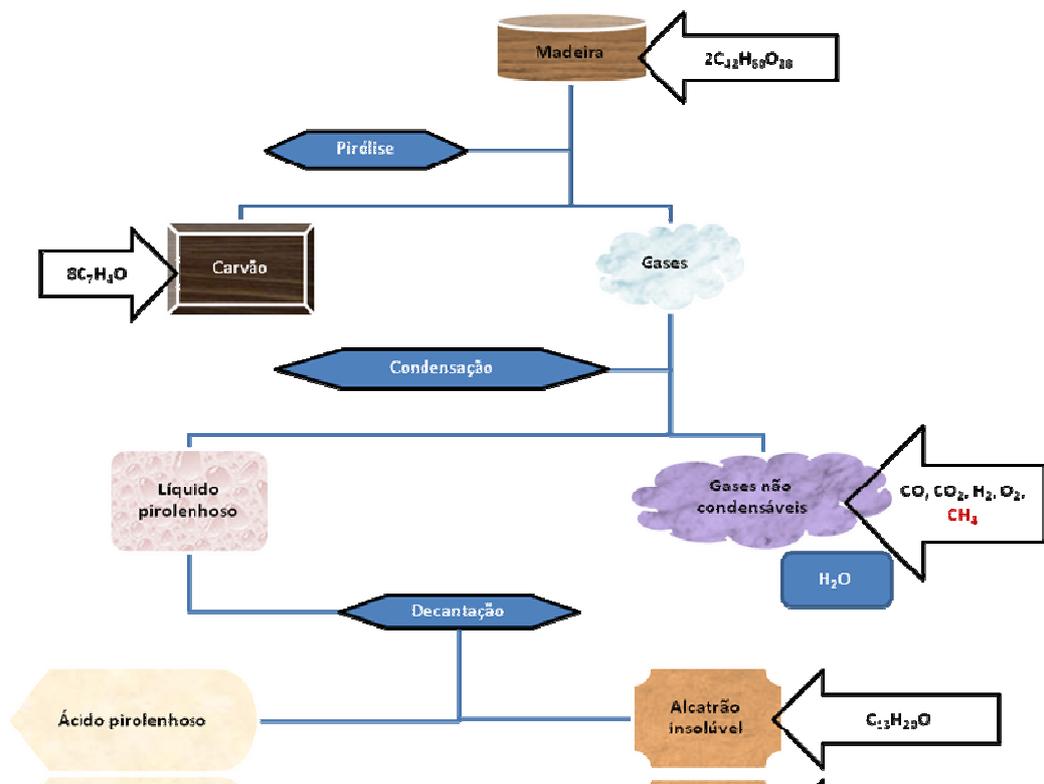
Geralmente, o oxigênio é fornecido pelo ar atmosférico, chamado ar comburente. Então, pirólise é o aquecimento da biomassa na ausência de oxigênio, combustão é a transformação da biomassa em calor e luz, com oxigênio além da quantidade estequiométrica (quantidade mínima

de oxigênio para que haja a combustão), e gaseificação é a transformação com quantidade de oxigênio menor que a estequiométrica.

A gaseificação é um processo complexo, e, segundo Sánchez (2003), todo gaseificador tem uma etapa de pirólise precedendo a etapa de gaseificação. Durante a secagem e a pirólise da biomassa, ocorrem a evaporação da água, a decomposição dos carboidratos em gases não condensáveis ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{O}_2$ ) e, também, a produção de carvão, alcatrão e ácidos leves.

**Biomassa + Calor = Coque+ Gases + Alcatrão + Condensáveis**

- A pirólise, volatilização ou carbonização, ocorre quando há vaporização das partes voláteis e se inicia a fragmentação das partículas sólidas (carboidratos), detalhadas na Figura 05.



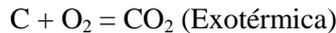
**Figura 05** - Produtos da pirólise da madeira.

A zona de oxidação fica estabelecida pela entrada de oxigênio no reator. O oxigênio queima o carbono através da liberação de energia térmica (reação exotérmica), que fornece calor às demais etapas do processo e produz principalmente  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$ . A gaseificação em si ocorre com a redução dos componentes gasosos, provindos de etapas anteriores por fortes reações endotérmicas. Os gases aquecidos chegam à zona de redução, onde, com restrição de oxigênio, ocorre a formação dos componentes do gás combustível ( $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,...) produzido pela gaseificação. A zona de redução (fase do hidrogênio) fica logo acima ou abaixo da zona de oxidação, a depender do tipo de gaseificador, contracorrente ou concorrente.

Durante os processos de gaseificação, ocorrem principalmente reações exotérmicas de oxidação (combustão) e reações endotérmicas de redução, envolvendo fase sólida e gasosa (SÁNCHEZ, 2003):

➤ Reações heterogêneas gás-sólido.

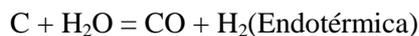
Oxidação do carbono



Reações de Boudouard



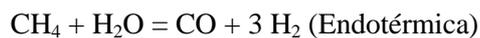
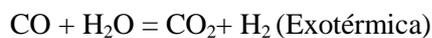
Reação de gás-d'água (Reação de hidrólise)



Formação de metano (Hidrogaseificação)



➤ Reações homogêneas (fase gasosa)



Observando as equações heterogêneas, vemos que o teor de carbono residual diminui com a temperatura, devido à conversão do carbono em gases combustíveis, exceto  $\text{CO}_2$ . O vapor d'água, não excessivo, provindo da umidade da biomassa, aumenta o conteúdo de hidrogênio e óxido de carbono no gás obtido, conforme as reações homogêneas e de gás-d'água.

Além dessas reações, destacaremos o craqueamento do alcatrão, processo de destruição térmica das moléculas dos compostos que formam o alcatrão, com a obtenção de  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  e outros gases como produtos.



Nos reatores concorrentes, deve-se considerar, além das reações oxidantes do carbono com oxigênio, vapor de água, monóxido de carbono e hidrogênio, aquelas correspondentes à decomposição dos pirolenhosos a alta temperatura.

Na realidade, não se conhece exatamente o que acontece dentro de um gaseificador, e ainda há muito a ser descoberto (WANDER, 2001).

No intuito de facilitar a compreensão das reações, representadas por equações termoquímicas acima, ocorridas no processo de gaseificação, serão feitos alguns comentários baseados em Rey (1970) e na Enciclopédia Mirador (1990):

Segundo Rey (1970), o carbono é um ametal sólido que, além de se apresentar na forma de diamante, apresenta-se também como grafite e vários carvões naturais ou artificiais, conduzindo calor. Na oxidação do carbono ( $\text{nox} = 4$  e  $\text{nox} = 2$ ), ele perde elétrons (oxida-se), enquanto o oxigênio ( $\text{nox} = -2$ ) ganha elétrons (reduz-se).

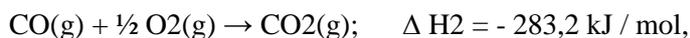
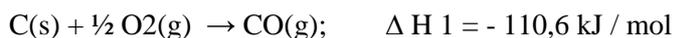
Uma reação é de óxido-redução quando, pelo menos, um dos elementos tem número de valência modificado. No exemplo  $\text{C} + \text{O}_2 = \text{CO}_2$ , os reagentes do primeiro membro tinham valência zero. No segundo membro, o carbono passou a ter valência 4, logo se oxidou, e o oxigênio passou a ter valência -2, logo se reduziu.

O  $\text{CO}_2$ , produto da combustão completa, não pode ser liquefeito sob pressão em  $31^\circ\text{C}$ , temperatura crítica, sendo, portanto, um gás da combustão. A temperatura crítica da água é de  $374^\circ\text{C}$ , abaixo da qual ela é vapor e, acima, torna-se gás. Outras temperaturas críticas de interesse são as dos gases: hidrogênio,  $-140^\circ\text{C}$ ; oxigênio,  $-118^\circ\text{C}$ , e nitrogênio,  $-195^\circ\text{C}$ .

O nitrogênio tem pouca reatividade, porém, acima de  $300^\circ\text{C}$  e sob pressão, combina-se com o oxigênio, formando os  $\text{NO}_x$  ( $\text{N}_2 + \text{O}_2 = 2 \text{NO}$ ,  $\text{N} + \text{O}_2 = \text{NO}_2$ ) e impurezas, a exemplo do  $\text{NH}_3$ . A combustão do enxofre contido na biomassa produz também  $\text{SO}_x$ , a exemplo do anidrido sulfuroso,  $\text{SO}_2$ .

Uma reação será homogênea quando realizada unicamente em uma fase, sólida(s), líquida(l) ou gasosa(g), então misturas gasosas serão sempre homogênea. A reação é endotérmica quando ocorre o ganho de calor (+). No contra-exemplo  $\text{C}(\text{s}) + \text{O}_2(\text{g}) = \text{CO}_2(\text{g})$ , com variação de entalpia  $\Delta H < 0$ , tem-se uma reação heterogênea (C, sólido, e  $\text{O}_2$ , gás) e exotérmica, porque perde calor. Havendo o carvão, pode-se obter o CO pela combustão incompleta, em atmosfera pobre de oxigênio:  $\text{C} + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{CO}$ .

Segundo a Mirador (1990), como o calor de reação acompanha um processo isobárico e isotérmico, ele se identifica com  $\Delta H$ , que é a variação da entalpia na reação. Pela lei de Hess, o calor desenvolvido numa reação química não depende da ocorrência dessa numa só etapa ou em diversas etapas sucessivas. Então:



Conclui-se que a variação da entalpia ou calor de reação de



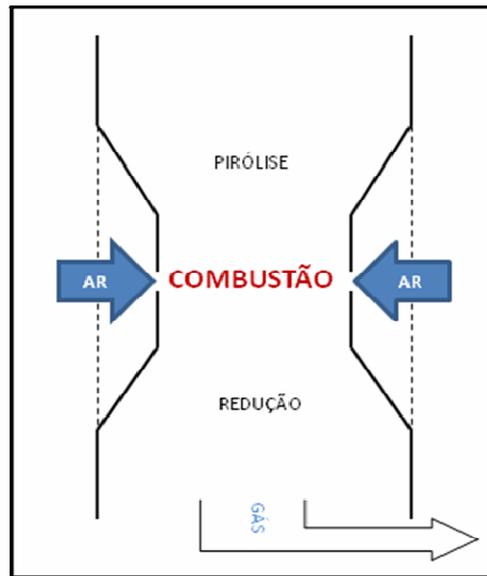
Tendo-se o CO<sub>2</sub> e o fazendo passar pelo carvão aquecido, C, obtém-se também o CO pela reação de Boudouard,  $C + CO_2 = 2CO$ .

Os ametais geralmente não reagem com água a frio, e alguns deles só reagem aquecidos ao rubro:  $C + H_2O = CO + H_2$ , onde o produto dessa transformação química, chamado gás azul ou gás d'água, é obtido industrialmente, fazendo-se passar uma corrente de vapor d'água sobre o carvão aquecido a temperatura próxima de 1000 °C. A equação  $CH_4 + H_2O = CO + 3H_2$  ilustra a obtenção do gás d'água a partir da transformação entre o metano e o vapor d'água.

## 2.2. Gaseificador Concorrente

Em gaseificadores concorrentes, as zonas de combustão e redução localizam-se de forma oposta em relação aos modelos contracorrentes.

Com a alimentação de combustível pelo topo, a alimentação de ar é feita em fluxo descendente (mesmo sentido do fluxo de combustível), passando pelas zonas de combustão e redução. A característica essencial deste gaseificador é que ele é projetado de modo que os alcatrões e voláteis provenientes da zona de pirólise são direcionados a passar pela zona de combustão onde, com condições de operação controladas, serão craqueados. Quando isso acontece, esses alcatrões serão convertidos em fase leve e coque, e a mistura de gases na saída é relativamente livre de alcatrões. Sendo assim, o arranjo da zona de combustão é um elemento crítico nos gaseificadores concorrentes; em muitos casos, o diâmetro interno é reduzido na zona de combustão, criando-se uma garganta. Na garganta (Figura 06), posicionam-se os injetores de ar, arranjados a fim de distribuir o ar da forma mais uniforme possível, cujo objetivo é garantir que seja atingida uma temperatura adequada em toda a seção, (SANCHEZ *et al*, 1997).



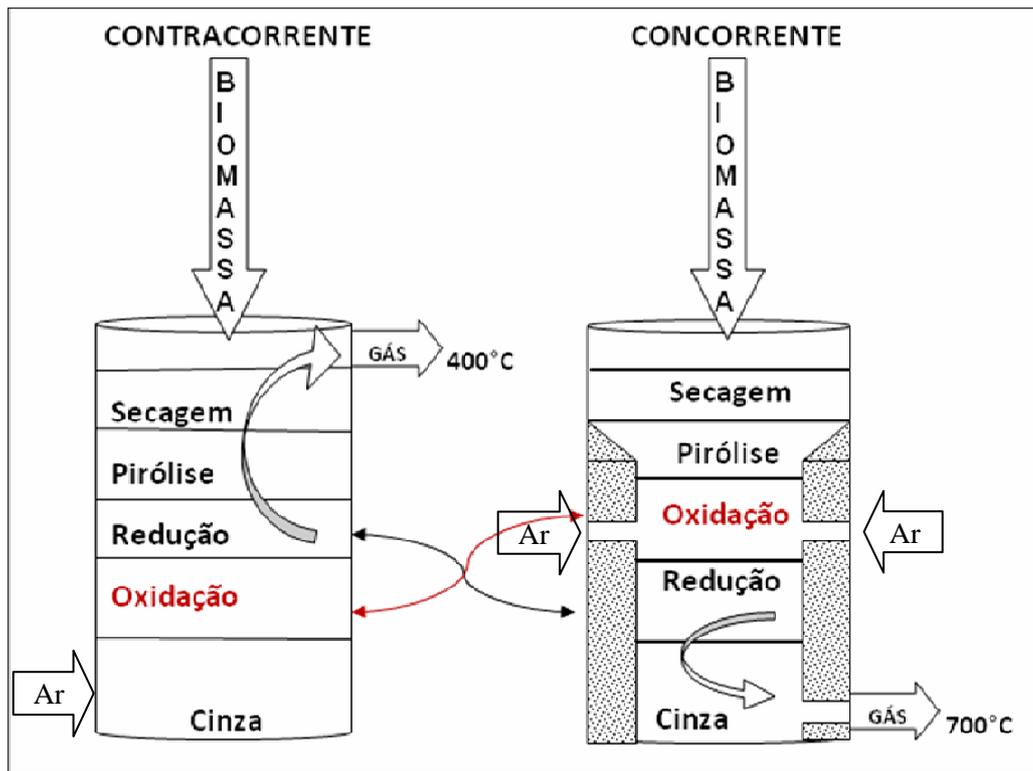
**Figura 06** - Estrangulamento da zona de combustão de um gaseificador concorrente.

No gaseificador contracorrente, o ar entra por baixo e, após processamento, sai por cima (fluxo ascendente), conforme Figura 7. Com tal procedimento, fica estabelecida a vantagem de os gases produzidos em altas temperaturas passarem pela zona de secagem, pré-aquecendo a biomassa, diminuindo sua umidade e, conseqüentemente, aumentando o poder calorífico e estipulando uma alta eficiência térmica.

Como desvantagem, os alcatrões e produtos densos da pirólise não são craqueados (decompostos em hidrocarbonetos mais leves), produzindo um gás menos puro. Dessa forma, os gaseificadores concorrentes, usados para secagem de produtos alimentícios, oferecem vantagens, pois os alcatrões (até 99,9%) e condensáveis destilados na zona de pirólise são forçados a passar pela zona de oxidação (combustão), da mais alta temperatura, onde são destruídos termicamente, resultando na produção de um gás mais limpo.

Por outro lado, como o gás é liberado diretamente da zona de redução, tende a ter quantidades significativas de cinzas e fuligem, em contraste com o que acontece nos gaseificadores contracorrentes, onde estas partículas são filtradas quando o gás passa pelo combustível. A temperatura de saída dos gases também tende a ser maior, por volta de 700 °C, pois não trocam calor diretamente com as zonas de pirólise e secagem (SÁNCHEZ, 2008).

A seguir, esquema da localização das diferentes zonas em um reator de gaseificador concorrente e contracorrente.



**Figura 07** – Esquema das diferenças entre um gaseificador contracorrente e um concorrente.

Outras vantagens dos gaseificadores concorrentes são:

Menor custo de investimento.

- Geralmente dispensam a lavagem dos gases, e, quando não, é menor a quantidade de efluentes líquidos após a limpeza dos gases, o que reduz a poluição;
- Eficiência de gaseificação superior, com relação ao combustível seco, porque os gases são usados bem mais quentes.
- Quando se deseja produzir gás para sínteses químicas, a produção de gás com oxigênio é mais conveniente, uma vez que a relação  $H_2$ : CO em volume é maior.

### 2. 3. Gaseificação de biomassa

Por meio do processo fotossintético, as plantas captam energia do sol e a transformam em energia química. Essa energia pode ser convertida em eletricidade, combustível ou calor. As fontes orgânicas que são usadas para produzir energias por meio desse processo são chamadas de biomassa. Os combustíveis mais comuns da biomassa são os resíduos agrícolas, madeira e plantas, como a cana-de-açúcar, que são colhidos com o objetivo de produzir energia.

Os gaseificadores possuem, em geral, zonas nas quais diversas reações ocorrem:

A primeira etapa, secagem, é mais lenta e significativa para biomassas com teor de umidade mais elevado. A secagem não decompõe a biomassa, remove apenas sua umidade na

forma de vapor. A remoção da umidade absorve calor e influencia, por exemplo, na eficiência térmica global do gaseificador.

Na zona de pirólise, ocorre a vaporização das partes voláteis, e se inicia a fragmentação das partículas sólidas, através de composição térmica das substâncias básicas (carboidratos) da biomassa e produção de alcatrões e ácidos leves.

Na zona de combustão, o carbono da biomassa reage com o oxigênio do ar atmosférico, gerando o calor requerido pelas outras três etapas.

A gaseificação em si ocorre na zona de redução quando o CO<sub>2</sub> e água, provindos da combustão, dióxido, reagem parcialmente com o oxigênio gerando CO e H<sub>2</sub>, gases combustíveis da gaseificação. D'Ávila & Makray (1981) acrescentam outros produtos da gaseificação da madeira: hidrocarbonetos leves e alcatrões de carbono, nitrogênio e vapor de água.

### **2.3.1. Combustível**

Diversos são os tipos de biomassa que podem ser utilizadas no processo de gaseificação. A exemplo, pode-se citar a lenha, o carvão vegetal, resíduos florestais, resíduos agrícolas, bagaço de cana e casca de arroz (CEMIG, 1986). D'Ávila & Makray (1981) afirmam que, em gaseificadores de fluxo concorrente, só é possível gaseificar materiais com até 30% de umidade, uma vez que o excesso de água prejudica a qualidade do gás, tornando instável a zona de combustão. A elevação da umidade da madeira faz decrescer o teor de componentes combustíveis (CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>) no gás, aumentando-se em contrapartida os teores de vapor de água e dióxido de carbono.

As propriedades do combustível são extremamente relevantes na seleção de um gaseificador. Os diferentes modelos de gaseificação precisam de combustíveis com características específicas, tais como uma composição pré-definida da superfície e teor de mistura. Uma operação viável, em longo prazo, é apenas possível quando os parâmetros são observados. Não existem gaseificadores que consigam utilizar todos os tipos de combustíveis e produzir gás limpo.

Um gaseificador ideal produz um gás combustível limpo e de qualidade, a partir de uma variedade de combustíveis, é eficiente, barato e durável. Na prática, cada projeto é individual, relacionando um combustível utilizado ao uso final particular.

### **2.3.2. Vantagens**

A demanda de energia para diversos fins é cada vez mais crescente, e buscar alternativas energéticas que tornem viáveis econômica e ambientalmente os processos torna-se imprescindível na busca por competitividade. Além disso, a gaseificação possui maior eficiência (65 a 80%) que a combustão direta (60 a 75%), já lida em D'Ávila & Makray (1981). O gás

produzido é um combustível limpo perante o ambiente, e os resíduos (cinzas e carbono residual) retidos no cinzeiro do reator minoram a emissão de particulados. Dessa forma, a gaseificação da biomassa a fim de gerar energia para a desidratação de frutas tem sustentabilidade e, ao mesmo tempo, agrega valor ao produto.

### **2.3.3. Usos**

Dentre as pesquisas recentes sobre a utilização da gaseificação de biomassa, pode-se citar Santos (2003) e Silva *et al.* (2000), os quais testaram gaseificadores de biomassa acoplados a combustores do gás produzido, a fim de disponibilizar ar quente e limpo para a secagem de produtos agrícolas. Wander (2001) estudou a geração de energia elétrica com o uso do gás produzido em um motor de combustão interna a partir da utilização de resíduos de madeira e lenha

## **2. 4. Biomassa como fonte alternativa**

A necessidade de energia continuará existindo, uma vez que é imprescindível ao processo de desenvolvimento. Com as fontes fósseis de energia finitas, enquanto a demanda é crescente, aumenta-se a procura e pesquisa por alternativas que sejam renováveis. É necessário também que essas opções possuam um custo de produção viável e, concomitantemente, atendam a necessidade energética cada vez mais intensa.

A Biomassa, fonte de energia não poluente, cada vez mais, ganha espaço no cotidiano brasileiro e é representada por toda matéria orgânica, ainda não fóssil, seja de origem vegetal ou animal, que pode ser usada na produção racional de energia. É proveniente da conversão da luz solar em energia química, sendo, por isso, uma forma indireta de aproveitamento da energia do sol que as plantas absorvem; além disso, a capacidade de renovação é uma importante vantagem da biomassa. Cana-de-açúcar, eucalipto, lixo orgânico, lenha, carvão vegetal e alguns óleos vegetais, como o de amendoim e o dendê, estão entre as principais matérias primas representantes da biomassa.

As energias renováveis não são esgotáveis e ainda apresentam vantagens como:

- Diminuição de impactos locais, regionais e globais;
- Surgimento de oportunidades de emprego com a possibilidade de produção local, principalmente de biomassa.
- Maior diversidade dos mercados fornecedores de energia e segurança no fornecimento, já que não depende da importação dos combustíveis não renováveis.

Inserida nesse contexto, a produção de biomassa deve ser mais incentivada, pois o seu uso é sustentável, visto que possui um ciclo de renovação curto, além de ser uma fonte de renda extra para os agricultores. Além disso, apresenta vantagens como:

- A quantidade de CO<sub>2</sub> emitida na combustão é equivalente à absorvida pelas plantas na fotossíntese, sendo, portanto, neutra em relação às emissões de carbono para a atmosfera.
- Não libera teor de enxofre para a atmosfera. (ANTUNES & ALMEIDA 2003).
- A produção fortalece a zona rural.
- A bioenergia pode ser armazenada.
- Proporciona economia de recursos fósseis.
- Independe de importações, uma vez que tem origem agrícola e na silvicultura.

Em qualquer lugar onde ocorra uso da biomassa, é necessário considerar as restrições de ordem econômica, ecológica e tecnológica, pois, dessa forma, a biomassa que é realmente disponível poderá ser considerada uma reserva. Pode ser obtida a partir de vegetais não lenhosos, de vegetais lenhosos, dos resíduos orgânicos, agrícolas, urbanos e industriais.

A indústria tem sido beneficiada com a utilização de energia decorrente de fontes não fósseis, que se traduz em maiores escalas de produção, redução dos custos e, conseqüentemente, maior competitividade. O uso de alternativas para a geração de energia é estratégico para um país como o Brasil, que dispõe de inúmeras riquezas naturais e grandes dimensões. No entanto, é necessário conciliar o equilíbrio ambiental, a exploração sustentável dos recursos utilizados, o crescimento e geração de renda, sempre respeitando as limitações de cada ambiente, a fim de evitar impactos negativos.

A devastação da vegetação nativa para ampliação de áreas cultiváveis de plantas energéticas é uma desvantagem do uso de biomassa. Outra desvantagem é o aumento de preço dos alimentos, pela redução da oferta, sacrificando as populações mais pobres, que, nos países subdesenvolvidos, direcionam aos alimentos a maior porcentagem de seus rendimentos.

#### **2.4.1. Macaúba como combustível sólido**

A palmeira bocaiúva (*Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. ex Mart.) é espécie nativa das florestas tropicais, e sua característica principal é a presença de espinhos escuros, longos e pontiagudos na região dos nós. Os frutos são esféricos ou ligeiramente achatados, em forma de drupa globosa, com diâmetro variando de 2,5 a 5,0 cm (LORENZI & NEGRELLE, 2006).

A drupa da palmeira macaúba é uma opção de biomassa que apresenta grande tendência de uso como combustível, devido ao seu grande potencial calorífico e à sua alta produtividade. Planta perene e de produção secular, além das referidas vantagens, a macaúba é uma palmeira rústica, exige pouca água, concorrendo com outras palmeiras exóticas, a exemplo do dendê. Segundo Motta *et al* (2002), a exploração da macaúba vem sendo feita de forma extrativista e com baixa produtividade, pois a instalação de lavouras comerciais convive com dificuldade na quebra de dormência da semente, baixo crescimento inicial, além do desconhecimento de suas exigências ecológicas.

O engenheiro florestal José de Castro, da Universidade Federal de Viçosa, diz que a soja, indicada para o biodiesel, está na faixa de 2,5 mil quilos por hectare. Já a macaúba produz até 28 toneladas de fruto por hectare, com produção aproximada de 5 mil litros de óleo. Mas há um problema: o longo tempo necessário para que uma plantação comece a produzir comercialmente (O Popular On-line, 2007).

A planta, que tem o nome científico de *Acrocomia aculeata*, tem como um dos maiores entraves em sua cultura a difícil propagação da espécie, devido à grande resistência tegumentar, o que compromete a germinação das sementes (MARTINS, 2007).

A macaúba só não é mais produtiva que o dendê (*elaeis guineensis*), mas, quando se considera que o dendê, ao contrário da macaúba, já vem sendo melhorado geneticamente há décadas, o potencial produtivo da macaúba se torna ainda maior, pois essa planta ainda se encontra em seu estado silvestre. (MOURA, 2008). Outra consideração é que o dendê exige alta pluviosidade, enquanto a macaúba é produtiva também em regiões secas.

A seguir, encontram-se Tabelas que comparam a produtividade da macaúba com a de culturas de outras oleaginosas tradicionais.

**Tabela 2** – Produtividade média de óleo por hectare de algumas oleaginosas.

<b>Oleaginosa</b>	<b>Litros de óleo por hectare</b>
babaçu	1.500 a 2.000
dendê/palma	5.500 a 8.000
pinhão manso	3.000 a 3.600
pequi	2.600 a 3.200
<b>macaúba</b>	3.500 a 4.000
soja	400 a 650
girassol	800 a 1.000
mamona	400 a 1.000
amendoim	800 a 1.200
algodão	250 a 500
colza/canola	650 a 1000

**Fonte:** Furigo Júnior, 2006

<b>Tabela 3 – Produtividade agrícola da macaúba</b>		
<b>Palmeiras por hectare</b>	<b>Rendimento de óleo (kg/ha)</b>	
	Hipótese A	Hipótese B
100	1470-1840	1840-2300
123	1808-2263	2264-2829
156	2293-2870	2870-3588
216	3175-3974	3974-4968

Fonte: CETEC 2006

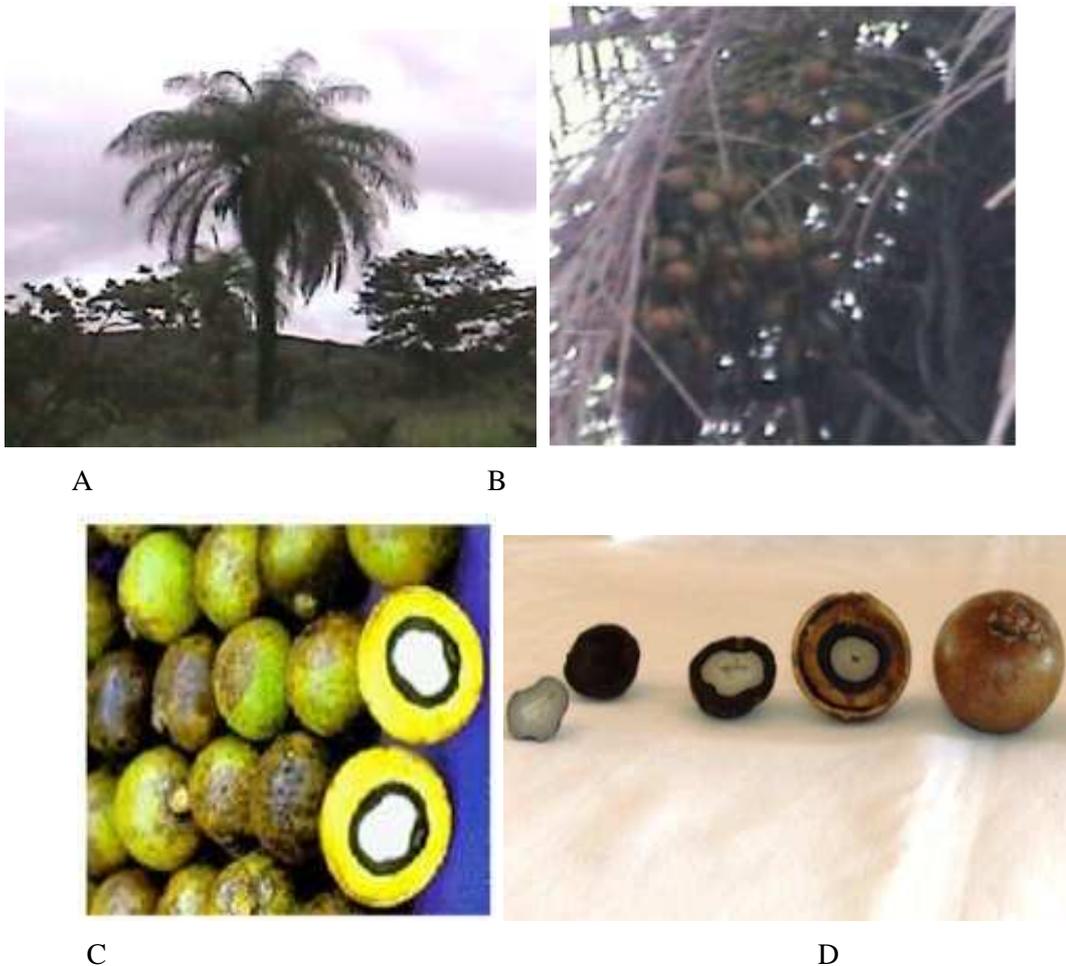
Hipótese A.: 4 cachos/palmeira, (400;500) frutos /cacho

Hipótese B.: 5 cachos/palmeira, (400;500) frutos/cacho

No Brasil, é considerada como a palmeira de maior dispersão, com ocorrência de povoamento natural dessa espécie em quase todo território. Entretanto, as maiores concentrações estão localizadas em Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul, sendo amplamente espalhada pelas áreas de Cerrado (BONDAR, 1964; SILVA, 1994; HENDERSON et al., 1995). No passado, ela ocorria em abundância também em São Paulo, mas as populações naturais foram sistematicamente substituídas pelo cultivo do café (NOVAIS, 1952), citados por Lorenzi & Negrelle, (2006).

Motta et al (2002) caracterizaram três grandes regiões em Minas Gerais de ocorrência da macaúba: Alto Paranaíba, Zona Metalúrgica e Montes Claros. Segundo os pesquisadores, a região de Montes Claros, além de mais quente, é mais seca que as outras, porém as diferenças microclimáticas regionais não chegaram a representar um fator limitante à ocorrência de macaúba. Mencionam que agricultores, extensionistas e pesquisadores do Estado de Minas Gerais utilizam a macaúba como planta indicadora de terrenos férteis, citando Rocha (1946) e Lorenzi (1992), como opiniões concordantes, embora Novaes (1952), ao contrário, afirma ser a palmeira adaptada a solos pobres, cobertos por cerrados, no estado de São Paulo.

Na Figura 08, vemos a palmeira e o coco macaúba.



**Figura 08** – A) Palmeira da macaúba; B) Cacho na palmeira da macaúba C) Frutos em maturação e D) Cocos e frutos secos.

Várias oleaginosas apresentam resultados satisfatórios na extração do óleo, no entanto a produção ainda é baseada na forma extrativista, como é o caso da macaúba, e não há plantios comerciais, a fim de avaliar precisamente toda a sua potencialidade na produção de óleo.

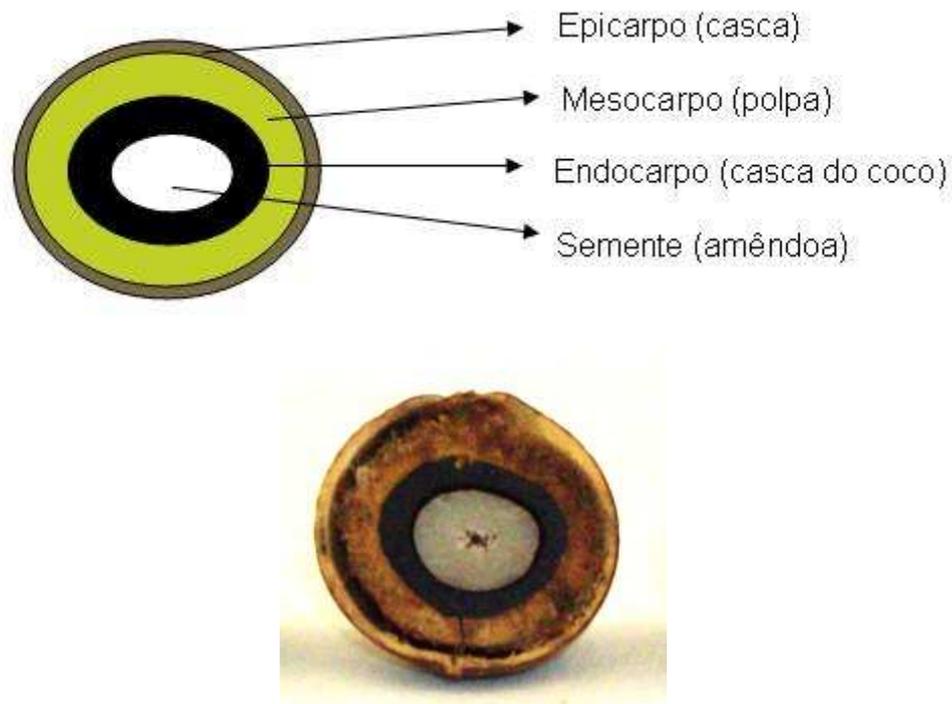
A macaúba é uma planta perene, e o seu cultivo exige grande investimento inicial, porém, com isso, pode-se produzir por mais de noventa anos a pequenos custos de manutenção.

No entanto, a macaúba apresenta duas características menos favoráveis: sazonalidade e maturação irregular dos frutos no cacho. Isso exigiria um cultivo alternativo com safras de outras espécies para manter o funcionamento de uma fábrica de produção de óleos. A maturação irregular da macaúba reduz o teor de óleo nos frutos, pois uma colheita única incluiria frutos maduros, semimaduros e imaturos, o que resulta em muito menos óleo do que os cálculos sugerem (TECPAR 2008).

A palmeira da macaúba apresenta frutos fechados das angiospermas, esféricos, de epicarpo (casca) liso, e a síntese de pigmentos torna-os marrom-amarelados ao atingirem a maturidade. Também na maturação, a polpa mesocárpica mucilaginosa (estrutura de

polissacarídeos), quando processos químicos modificam aparência e composição, torna-se amarelada, ao mesmo tempo em que acumula substâncias nutritivas e outras aromáticas, para atrair os animais. A hidrólise do amido produz açúcares, tornando a polpa propícia para o consumo in natura, fabricação de doces, sucos, sorvetes e outras aplicações culinárias de exigências sensoriais, a exemplo de farinha para pães e bolos.

Na Figura a seguir, tem-se a composição das partes integrantes do fruto da macaúba.



**Figura 09** – Estrutura do fruto macaúba : Desenho do fruto em maturação e foto do fruto parcialmente seco.

Do endocarpo, revestimento externo da amêndoa ou semente, duro e espesso, é fabricado artesanalmente, bijuterias, entre outros. Graças ao envoltório que a protege, a semente fica imune à ação de animais que se alimentam da fruta e, com as fezes, depositam-na em condições de germinação, perpetuando a vida da planta. A disseminação torna-se facilitada devido à grande quantidade de frutas produzidas e às várias espécies de animais que as consomem. A semente, parte lignificada, é usada como substituto da brita no concreto e confecções de botões (LORENZI & NEGRELLE, 2006). Tal aplicação está no argumento do anexo B.

Na amêndoa ou semente, oleaginosa, fonte de fibra e potássio, encontra-se o embrião adormecido, miniatura da nova planta, e o endosperma, que é uma reserva para a germinação. Da amêndoa, é produzido um azeite refinado, transparente e incolor, comparável ao azeite de

oliva e já bastante requisitado pelas indústrias de cosméticos e alimentos. Assim como o dendê, a macaúba fornece óleo da polpa e da amêndoa.

A fábrica da UBCM (Unidade de Beneficiamento do coco Macaúba) em Riachão, Montes Claros – MG, produz dois tipos de óleos (da polpa e da amêndoa), dois tipos de tortas e dois tipos de sabões. As Figuras seguintes ilustram a armazenagem, equipamentos e produtos da fábrica.



**A**

**B**



**C**

**D**

**Figura 10-** A) Depósito de macaúba e caixa com capacidade para 20/kg. B) Despolpador e britador da fábrica. C) Óleo e torta da polpa. D) Sabões da amêndoa e da polpa da macaúba.

Apesar de o endocarpo (casca dura do coco) ser matéria prima de vários produtos, a exemplo de carvão ativado, na UBCM, é por enquanto um resíduo do coco britado. De pouca utilidade, os cacos de cocos são abandonados nos arredores da fábrica, como se pode ver na Figura 11 abaixo.

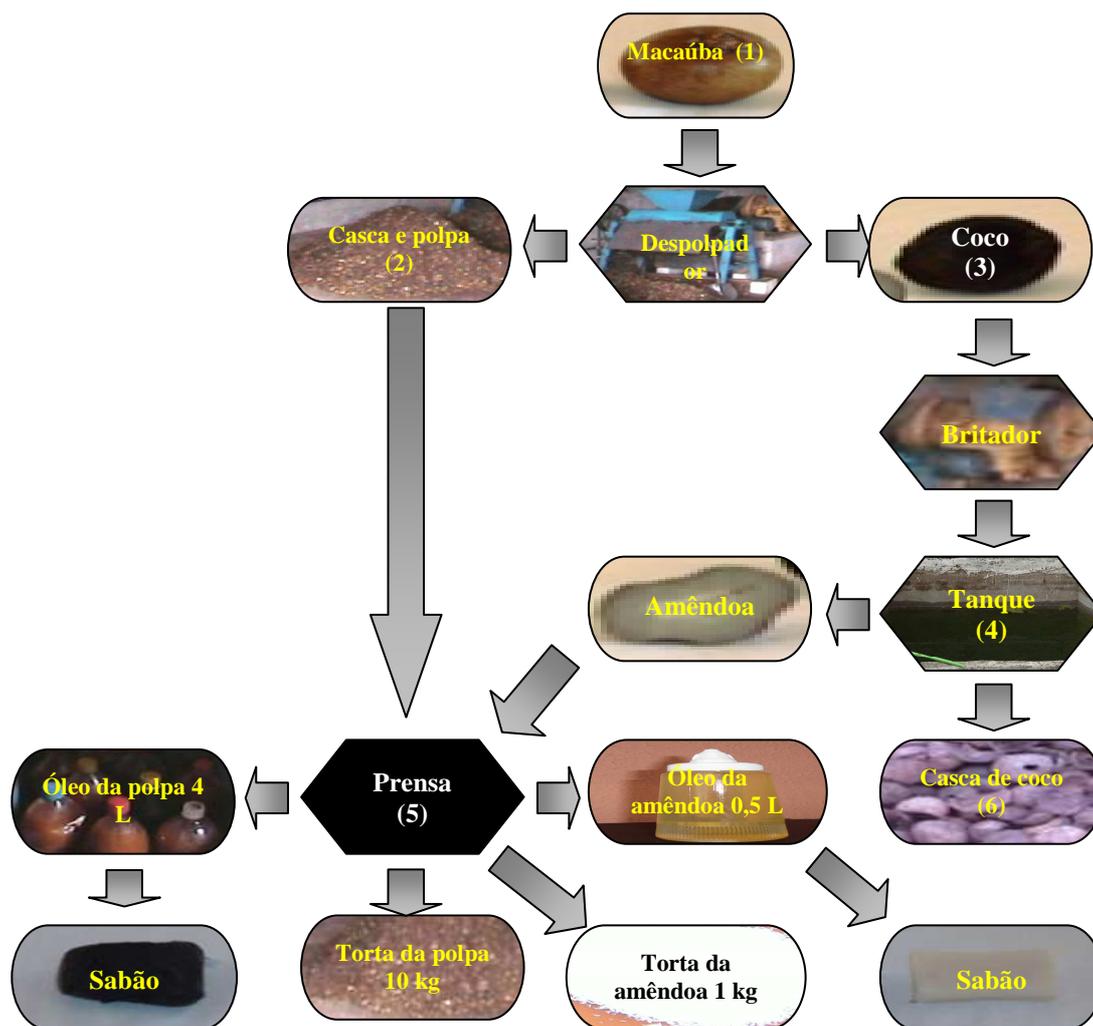


**Figura 11** - Macaubeira crescendo em cascas duras britadas, subproduto da macaúba.

Na região de Montes Claros, a colheita extrativista da macaúba é de outubro a março, e a produção da macaubeira é, em média, 60 kg /pé, com aproveitamento aproximado de 40 kg /pé.

A fábrica da UBCM, em operações e processos da macaúba, emprega direta e indiretamente uma quantidade relevante dos associados.

A Figura12 mostra o fluxograma da transformação da macaúba na indústria da UBCM.



**Figura 12** - Fluxograma de operações, processos e produtos da macaúba na fábrica da UBCM.

- (1) Fruto da macaúba seca (20 kg).
- (2) Pericarpo + Mesocarpo (10 kg).
- (3) Endocarpo + Amêndoa.
- (4) Tanque com solução de tabatinga, para separar a amêndoa dos cacos de coco.
- (5) Prensa usada alternadamente com amêndoa ou com a polpa.
- (6) Endocarpo (Subproduto ainda de pouco aproveitamento).

A Tabela 4 abaixo explicita o rendimento da macaúba na fábrica. Devemos salientar que, em se tratando de uma operação de prensagem, o óleo das polpas não é extraído em sua totalidade.

**Tabela 4** – Produtos do coco Macaúba segundo a UBCM

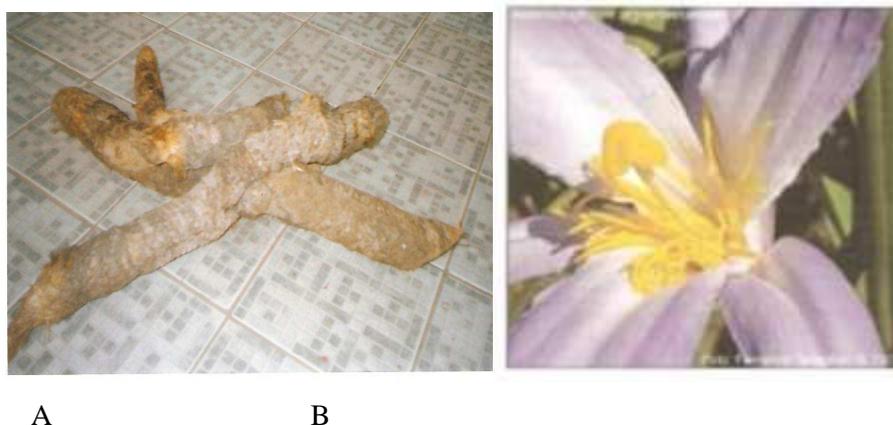
Macaúba Caixa 20 kg ( 650 frutos)	Torta de polpa	10kg
	Torta da semente	1kg
	Óleo da polpa	4 L
	Óleo da semente	0,5 L
	Endocarpo	5kg

A agricultura tem papel fundamental na geração de emprego e renda, por isso, além do potencial produtivo das matérias primas usadas como fontes energéticas, deve-se priorizar, também, aquelas que propiciem maior geração de emprego na agricultura familiar e que absorvam mão de obra de regiões à margem do processo de desenvolvimento. A macaúba e UBCM são exemplares deste parágrafo.

#### 2.4.2. Candombá

A fênix do reino vegetal é brasileira, vive por muitos séculos e se chama Candombá. Da raiz, extrai-se uma resina para fazer incenso e, quando “queima sem pegar fogo”, renasce das cinzas. A tradição popular ainda afirma que o caule, se enterrado, resiste por 40 anos. A parte que se queima fica protegida pelas folhas e não se molha com a chuva e, quando em chamas, soltam fagulhas que facilitam a propagação do fogo na lenha.

Segundo Almeida (2006), o candombá, *Vellozia sincorana* L.B. Sm & Ayensu, é endêmica da Chapada Diamantina. Possui um caule fibroso (Figura 13) com grande resistência às queimadas, entretanto produz também uma resina que queima facilmente, mesmo quando úmida, favorecendo a propagação de incêndio.



**Figura 13** -A) Candombás; B) Flor de canela-de-ema

Canela de Ema é a designação comum a muitas espécies da família Velloziaceae, de grandes flores ornamentais. A canela de ema é considerada endêmica do Brasil Central, onde os solos são rasos, com afloramentos rochosos e pobres em nutrientes. A espécie capta H<sub>2</sub>O da umidade do ar e cresce lentamente 1cm por ano e chega a atingir 6m de comprimento.

O candombá será testado como combustível de ignição do combustor.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

Para a realização dos testes, foi construído um gaseificador adaptado do modelo desenvolvido por Martin et al. (2006), e o experimento foi conduzido na Área Experimental do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa. Foi projetado e construído um reator para gaseificação de biomassa, de fluxo concorrente, ao qual foi acoplado um combustor para queima do gás produzido e um motor.

A fonte de biomassa para abastecer o gaseificador foi a drupa da macaúba e, visando a caracterizar o combustível usado, procedeu-se a determinação das propriedades físicas da macaúba. Para isso, foi construído um recipiente maior, Figura 10, do que o convencional utilizado na medição das propriedades físicas de grãos, devido ao tamanho da macaúba. Esse recipiente adaptado foi preenchido com o produto a ser medido e, através de um paquímetro comum, medidas como altura, comprimento e largura foram feitas de cada unidade contida no recipiente. Repetiu-se esse procedimento três vezes, Tabelas 4, 5 e 6, e, para os cálculos das propriedades físicas da macaúba, foi utilizada a média dessas três repetições, Tabela 7. As propriedades físicas mensuradas foram: massa específica aparente, massa específica real, porosidade e poder calorífico.

As propriedades físicas, como massa específica aparente, massa específica real e porosidade, são definidas como descrito a seguir.

#### 3.1. Massa específica aparente

É a relação entre a massa do produto e seu volume aparente, ou seja, o volume real do produto acrescido do volume dos espaços vazios que existem quando o produto é colocado em algum recipiente.

A massa específica aparente é dada por:

$$r_a = (\text{massa do produto}) / (\text{volume do recipiente}) \quad \text{equação 1}$$

#### 3.2. Massa específica unitária ou real:

É a relação entre a massa do produto e seu volume real.

A massa específica real é dada por:

$$r_u = (\text{massa unitária}) / (\text{volume unitário}) \quad \text{equação 2}$$

O volume unitário ( $V_u$ ), por sua vez, é definido como:

$$V_u = \pi A B C / 6 \quad \text{equação 3}$$

Onde:

A = comprimento do coco macaúba, em cm;

B = largura do coco, em cm, e

C = altura do coco, em cm.

### 3.3. Porosidade

É o espaço vazio ocupado pelo ar existente dentro de uma massa de grãos. A porosidade influi na facilidade de escoamento do ar, além de influenciar na capacidade do silo. Grãos quebrados aumentam a porosidade, mas diminuem as dimensões dos poros, dificultando o escoamento de ar. A porosidade é menor em grãos maiores, porém as dimensões dos poros são maiores, e, como consequência, é mais fácil escoar o ar (PARK, 2007). Matematicamente, a afirmativa “A porosidade é menor em grãos maiores” é contestável.

$$\text{Porosidade (\%)} = 1 - r_a / r_u \quad \text{equação 4}$$

### 3.4. Teor ou conteúdo de umidade

O conteúdo de umidade é a quantidade de água que pode ser removida do material sem alteração da estrutura molecular do sólido (PARK, 2007). Chamada de água livre, ela é facilmente evaporada, pois existe também a água de constituição, quimicamente presa ao material. Para operação de secagem, supõe-se que o material é formado por matéria seca e água. O conteúdo ou teor de umidade tem influência negativa sobre o poder energético de uma biomassa. Parte da energia contida na biomassa é usada para aquecer e vaporizar a água da biomassa.

A percentagem de umidade influencia significativamente na qualidade de combustão e no poder calorífico da biomassa, como é o caso da madeira, em que seu poder calorífico duplica-se, caso o seu teor de água seja reduzido em 50% (ANTUNES & ALMEIDA, 2003).

A secagem é a remoção de uma substância volátil (comumente, mas não exclusivamente, água) de um produto sólido. O objetivo final do estudo-avaliação dos processos de secagem é o dimensionamento dos secadores (PARK, 2007).

### 3.5. Poder Calorífico

A energia liberada no processo de combustão normalmente é quantificada pelo Poder Calorífico de um combustível, o qual é definido como a quantidade de calor despreendido pela combustão completa de uma unidade de volume ou massa do combustível. Quando a quantidade de calor é medida com os produtos de combustão na fase gasosa, denomina-se de Poder Calorífico Inferior (PCI). No entanto, caso a água dos produtos de combustão seja considerada na fase líquida, ou seja, com os produtos de combustão à temperatura ambiente, o calor liberado é denominado de Poder Calorífico Superior (PCS). A diferença entre os dois valores é a entalpia

de vaporização da água, tanto a que é formada na combustão como a que está presente no combustível como umidade (JOSÉ, 2004).

O Poder Calorífico é a principal característica dos combustíveis. O carbono e o hidrogênio são os elementos que mais contribuem para o poder calorífico dos combustíveis. Já a água encontrada nos combustíveis diminui o poder calorífico dos mesmos, pelo fato de aumentar a energia necessária à pré-ignição e diminuir o calor liberado pela combustão (LOPES et al., 2001; SÁNCHEZ, 2005). A umidade, portanto, é um parâmetro negativo no poder calorífico do combustível, pois parte da energia contida no combustível é utilizada para aquecer e vaporizar a própria umidade.

Como no ambiente de combustão o vapor d'água não se condensa e todo o produto resultante da combustão do hidrogênio permanece em estado de vapor, na prática, adota-se nos cálculos o PCI (MARTIN, 2005). Em combustíveis que não tenham hidrogênio em sua composição, não há formação de água e, em consequência, não há energia gasta para sua vaporização. Nesse caso,  $PCI = PCS$ , e, então, de modo geral, vale a afirmação  $PCS \geq PCI$ .

Em estudo da produção de carvão dos endocarpos das palmeiras babaçu e macaúba, comparados ao carvão de eucaliptos, Silva et al (1986) concluíram que o carvão do endocarpo das palmáceas pode ser considerado superior ao carvão da madeira de eucalipto.

O biocoque, carvão vegetal de alta qualidade, obtido do endocarpo da macaúba, tem alto poder calorífico, superior ao carvão convencional (Cocal Brasil 2008).

O poder calorífico da macaúba foi determinado no Laboratório de Energia da Madeira, no Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa.

### **3. 6. Análises Estatísticas**

Considerando a homogeneidade das condições ambientais e do material experimental, optou-se pelo Delineamento inteiramente casualizado (**DIC**). Os tratamentos foram organizados em esquema fatorial 3x3, com 3 repetições, combinados com as aberturas primárias do combustor e frequências do motor.

Foi feita a análise de variância (ANOVA) dos dados balanceados (temperaturas com mesmo número de repetições) fornecidos pelos termopares dos canais Ch0, Ch1, Ch2, Ch3 e Ch4 nas aberturas A1, A2 e A3 e frequências F1, F2 e F3.

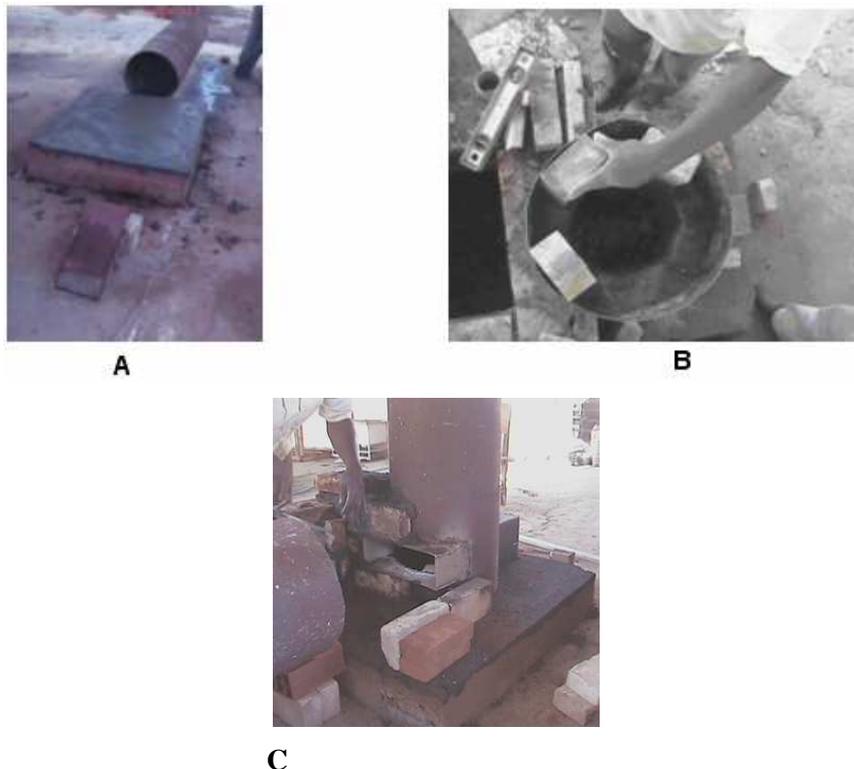
## 4. RESULTADO E DISCUSSÕES

### 4.1. Construção do sistema de gerador de calor

#### 4.1.1. Construção do reator

A construção do sistema teve início pela base do gaseificador, na qual foi colocado um tubo de ferro de 0,39 m e 0,72 m de altura, que compõe o reator. Nesse, encontravam-se 4 orifícios de 0,051m (2") de diâmetro. Acoplado ao corpo do reator, havia cinzeiro, que propiciou a retirada das cinzas, e a tampa, que, durante o funcionamento, permaneceu fechada, a fim de não proporcionar a entrada de ar na parte superior.

O gás decorrente da queima foi succionado através de um sistema de ventilação que possibilitou a passagem do gás do reator para a câmara de combustão. A Figura 14 mostra as etapas de construção.

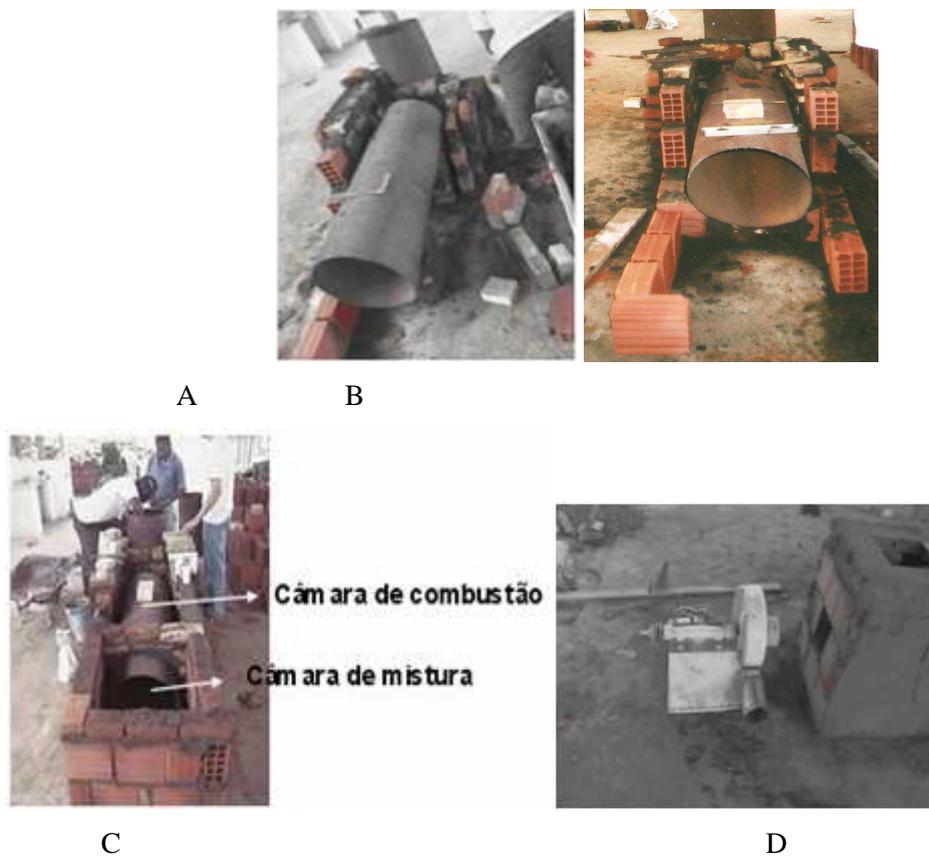


**Figura 14:** Etapas da construção do gaseificador. A) Construção da base. B) Construção do reator. C) Saída de gás do reator.

#### 4.1.2. Construção do Combustor

A câmara de combustão do gás foi revestida com tijolo refratário e posicionada após a saída do gás do reator através da grelha. Era composta de duas entradas de ar primário, a primeira, através da janela na parte superior, e a segunda, lateralmente. Posteriormente, seguia um tubo metálico que se encontrava no interior de um corpo de alvenaria, no qual havia entradas de ar secundário. O ar quente que saía do combustor consistia numa mistura de produto

decorrente da combustão com o ar do trocador de calor. Nas Figuras a seguir, têm-se as etapas de construção do combustor e da câmara de mistura.



**Figura 15** – A, B e C. Etapas da construção do combustor e câmara de mistura. D) ventilador acoplado ao final da câmara combustão-mistura, a fim de succionar os gases provenientes da queima da biomassa.

A Figura a seguir mostra o gaseificador concluído, com seus equipamentos, inclusive o anel que envolve a tampa do reator, suporte de um selo de areia para evitar escapamento de calor. Planta, corte, especificações, fotos e outros detalhes encontram-se no anexo B.



**Figura 16-** Gaseificador concorrente finalizado e testado.

#### **4.2. Propriedades físicas da macaúba**

O recipiente construído a fim de atender a metodologia de medição das propriedades físicas da macaúba está na Figura 17, a seguir.



**A**                      **B**

**Figura 17** – A) recipiente adaptado para a medição das propriedades físicas da macaúba; B) macaúba selecionada para a medição das propriedades.

As três repetições feitas das medidas de comprimento, largura e altura, realizadas com a macaúba, contida nesse recipiente construído, estão na Tabela a seguir.

<b>Tabela 5 – Propriedades físicas da macaúba</b>					
<b>Dimensões (cm)</b>					
<b>Amostra</b>	<b>Massa Total (g)</b>	<b>Massa Unitária (g)</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
<b>1</b>	<b>2591,58</b>	<b>19,06</b>	<b>4,26</b>	<b>4,22</b>	<b>4,38</b>
<b>2</b>	<b>3852,5</b>	<b>27,52</b>	<b>4,44</b>	<b>4,4</b>	<b>4,39</b>
<b>3</b>	<b>3218,88</b>	<b>23,33</b>	<b>4,09</b>	<b>4,05</b>	<b>4,24</b>
<b>Médias usadas no cálculo das propriedades</b>					
	<b>3220,99</b>	<b>23,30</b>	<b>4,26</b>	<b>4,22</b>	<b>4,34</b>

#### **4.2.1. Massa específica aparente**

O recipiente utilizado tem capacidade de 11,55L, e a massa de macaúba presente no recipiente adaptado teve média de 3220,99 g, portanto, de acordo com a equação 1:

$$r_a = 3220,99g / 11,55 L = 280,08kg/m^3$$

<b>Massa Específica Aparente = 280,08 kg/m<sup>3</sup></b>
--

#### 4.2.2. Massa específica real

A média dos valores de comprimento, largura e altura foram, respectivamente:

- A = 4,26cm; B = 4,22cm; C = 4,34cm.

Pela equação 3, temos:

$$V_u = \pi \times 0.0426 \times 0.0422 \times 0.0434 / 6 = 4,085 \times 10^{-5} \text{ m}^3 = 0,04085\text{L}$$

Através da equação 2, obtemos a massa específica real:

$$r_u = 23,30\text{g} / 0,04085\text{L} = 570,38\text{kg} / \text{m}^3$$

<b>Massa Específica Real = 570,38 kg/m<sup>3</sup></b>
--

#### 4.2.3. Porosidade

De acordo com a equação 4, obtemos a propriedade física porosidade:

$$\text{Porosidade} = 1 - 280,08 / 570,38 = 0,5089 = 50,89\%$$

<b>Porosidade = 50,89 %</b>
-----------------------------

Couto *et al.* (1999) investigaram o efeito do teor de umidade nos valores da massa específica real e aparente e nos valores da porosidade de grão de café de duas variedades (Catuaí, I e II, e Timor), dois graus de maturação (verde e cereja) e cinco valores do teor de umidade para cada amostra. Concluíram que a massa específica aparente do café variou de 391,3 (Catuaí verde com 17,2% b.u.) a 606,6kg m<sup>-3</sup>, (Catuaí cereja com 67,9% b.u.), que é menor em relação à apresentada pela maioria dos grãos agrícolas. A massa específica aparente para a macaúba foi de 208,08kg m<sup>-3</sup>, valor que também é inferior quando comparado com o de produtos agrícolas.

Ainda de acordo com Couto *et al.* (1999), a porosidade variou de 38,8% (Catuaí verde com 12,7% b.u.) a 53% (Timor verde com 41,5% b.u.), o que está de acordo com os valores obtidos para a maioria dos grãos. A porosidade determinada para a macaúba de 50,89% está dentro de faixa de variação, portanto essa propriedade física da macaúba é compatível com a apresentada por outros grãos.

Goneli *et al.* (2005) avaliaram o efeito da variação do teor de água nas propriedades físicas dos frutos de mamona, variedade Guarani. A variação da massa específica aparente foi de 358,80kg m<sup>-3</sup> a 309,06kg m<sup>-3</sup>, para a faixa de umidade de 71,36% a 11,63%. Com o valor dessa propriedade física para a macaúba de 280,08 kg. m<sup>-3</sup>, podemos observar que está abaixo quando comparado com o da mamona para uma faixa de umidade próxima.

A porosidade da macaúba de 50,89% foi inferior à variação da porosidade da mamona encontrada pelos autores, que foi de 68,47% a 52,80%, para a faixa de umidade de 71,36% a 11,63%.

#### 4.2.4. Sondagem da Umidade da Macaúba

Para o experimento objetivado neste trabalho, usou-se como combustível a macaúba secada em terreiros e armazenada em galpão da Área de Armazenamento do Departamento da Engenharia Agrícola da UFV-MG.

Tendo a macaúba novamente absorvido umidade durante a armazenagem antes do seu uso como combustível, mesmo com o rigor do método direto de estufa até a massa constante, a determinação da umidade não seria confiável, devido a condições ambientais que provocam, por exemplo, a Histerese.

Quatro amostras da macaúba que seria usada foram submetidas a uma estufa em 105°C durante vinte e quatro horas. Os resultados obtidos no laboratório do mesmo departamento estão explicitados na Tabela 6 a seguir.

**Tabela 6 – Dados dos testes de umidade**

AMOSTRAS	MASSA INICIAL (g) 08/04/08/11: 00	MASSA FINAL 09/04/08/11: 00	ÁGUA *
1	318,81	229,47	89,34
2	273,75	207,44	66,31
3	293,27	264,18	29,09
4	285,73	231,09	54,64
Total	1171,56	932,18	239,38

\* (Quando se desseca uma amostra, não se perde apenas água, outras substâncias voláteis também se evaporam).

Porcentagem evaporada nas 24 horas:

- a) 20,43% em relação à massa inicial de 08/04/08.
- b) 25,68% em relação à massa final de 09/04/08.

No experimento, usou-se a macaúba nas condições de umidade aproximada do dia 08/04/08.

#### 4.2.5. Cálculo do Poder Calorífico

O Poder Calorífico Superior (PCS) é definido também pela energia liberada na forma de calor adicionada à energia gasta na vaporização da água que se forma numa reação de

oxidação. O Poder Calorífico Inferior (PCI) restringe-se à primeira parcela, ou seja, a energia gasta na forma de calor.

Após a análise do PCS no Laboratório de Energia da Madeira-DEF-UFV e a conversão de Cal/g para kJ/kg (uma caloria é igual 4,1868 J), os resultados para a macaúba foram:

- Casca dura (endocarpo): 21 547.90kJ / kg.
- Fruto integral (drupa): 20 243.74kJ / kg.

Observação: Teor de cinzas, 12 e 4%, respectivamente.

Em 28 de novembro de 2007, mediu-se o Poder Calorífico Superior do Candombá no mesmo Laboratório, usando-se uma bomba calorimétrica (Atmosphere Oxygen), pressão de 25 atm. Duas amostras secas providas de estufa, moídas e peneiradas (fração 40 / 60 mesh), foram analisadas e apresentaram PCS médio de 21 535.36 kJ / kg.

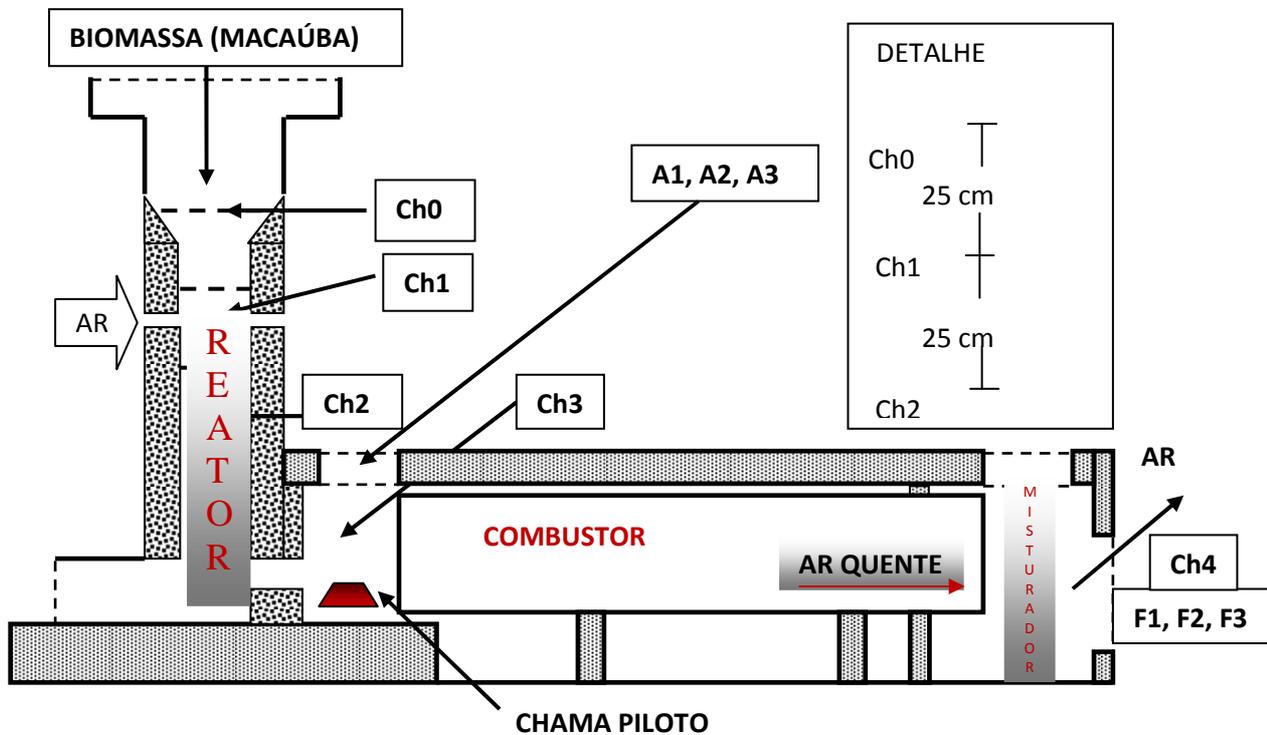
### 4.3. O Experimento

Para a coleta de dados, um sistema de aquisição foi acoplado ao gaseificador através de termopares, em diferentes pontos conectados a um computador. As posições desses termopares estão identificadas na Tabela abaixo.

**Tabela 7** – Canais ligados ao sistema de aquisição de dados

<b>Canal</b>	<b>Localização</b>
Ch0	Zona de secagem/pirólise
Ch1	Zona de oxidação
Ch2	Zona de redução
Ch3	Chama piloto
Ch4	Saída de ar

Através das Figuras 18, 19 e 20, podemos identificar a posição dos termopares para a coleta de dados no gaseificador.



**Figura 18** – Esquema da localização dos canais (termopares) para a coleta de dados.

A Figura 19 detalha o visor, em vidro refratário, da chama piloto entre a saída do reator e entrada dos gases no combustor. A Figura 20 mostra o sistema de exaustão em duas faces: motor e saída do ar de secagem.



**Figura 19** – Janela para visualização da chama piloto (Ch 3).



**Figura 20** – Motor e saída de ar do sistema (Ch4).

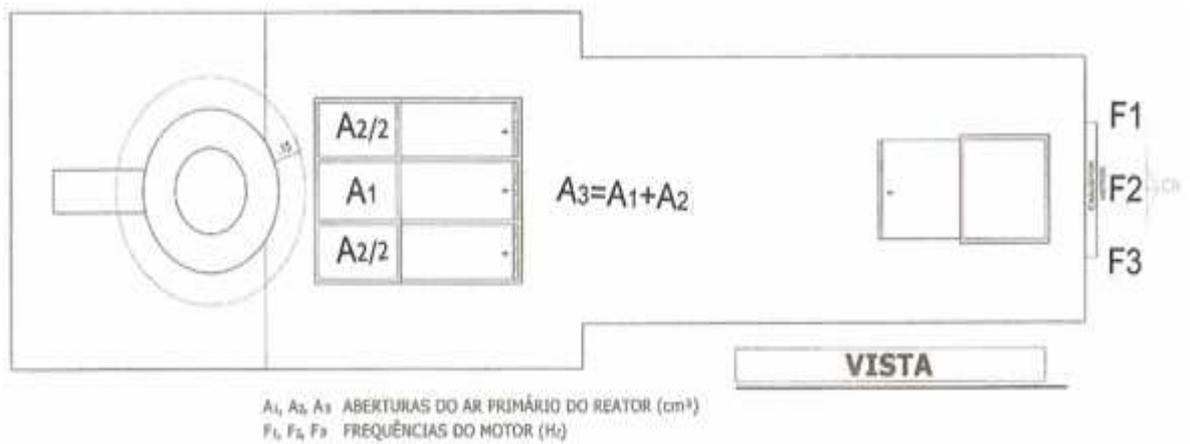
Junto ao motor acoplado no gaseificador, foi conectado um inversor de frequência, o qual proporcionou controlar a velocidade do motor de acordo com as frequências definidas. Variações de abertura da entrada primária de ar foram combinadas com essas diferentes frequências, a fim de avaliar as mudanças de temperatura na saída de ar do sistema e identificar as combinações que proporcionaram temperaturas adequadas ao processo de desidratação de frutas. Sendo possível, dessa forma, estimar-se o potencial do uso da gaseificação da macaúba na produção de ar aquecido para desidratação de frutas tropicais.

As frequências e aberturas de entrada de ar primário do combustor estão demonstradas na Tabela a seguir.

**Tabela 8** – Frequências utilizadas e Aberturas da entrada primária

	<b>Frequências (Hz)</b>		<b>Aberturas (cm<sup>2</sup>)</b>
<b>F1</b>	50	<b>A1</b>	Região Central aberta
<b>F2</b>	55	<b>A2</b>	Regiões laterais abertas
<b>F3</b>	60	<b>A3</b>	Todas as três regiões abertas

A Figura 21 a seguir é uma vista de cima da posição das aberturas e das frequências.



**Figura 21** - Vista que mostra a posição das aberturas e simulação das frequências.

Os detalhes das variações na abertura da entrada de ar primária estão mostrados e quantificados nas Figuras a seguir:



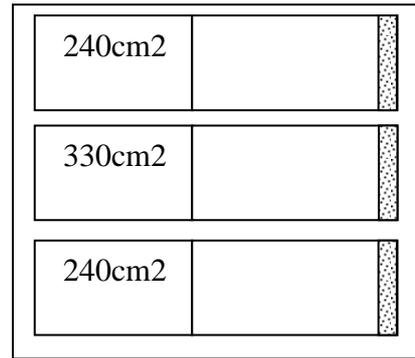
Fechad	
330cm <sup>2</sup>	
Fechad o	

**Figura 22** – Abertura A1: entrada de ar primário com a região central aberta.



240cm <sup>2</sup>	
Fechad o	
240cm <sup>2</sup>	

**Figura 23** – Abertura A2: entrada de ar primário com as regiões laterais abertas.



**Figura 24** – Abertura A3: todas as três regiões abertas.

Os resultados obtidos da coleta de dados com as diferentes combinações entre frequências e abertura da entrada de ar primário encontram-se na Tabela abaixo.

**Tabela 9** – Medição das temperaturas de acordo com a variação entre as frequências e as aberturas (Furos do Reator semi-abertos).

	<b>Ch0</b>	<b>Ch1</b>	<b>Ch2</b>	<b>Ch3</b>	<b>Ch4</b>	<b>T.Amb.</b>
F1A1	150	765	652	115	87	25
F1A2	143	850	636	74	86	25
F1A3	121	845	635	139	88	25
F2A2	120	844	615	76	87	25
F2A3	149	821	609	111	80	25
F2A1	217	977	610	111	81	25
F3A3	244	663	653	136	80	25
F3A1	254	966	690	130	80	25
F3A2	243	963	714	170	81	25
F2A1	86	670	690	126	96	25
F2A2	76	660	670	186	102	25
F2A3	70	513	670	95	101	25
F3A2	70	623	691	86	100	25
F3A3	67	651	718	181	94	25
F3A1	68	690	734	175	89	25
F1A3	69	681	687	126	80	25
F1A1	71	688	695	153	79	25
F1A2	71	656	690	75	77	25

F3A1	82	672	759	184	80	25
F3A2	90	611	710	60	70	25
F3A3	108	624	653	92	66	26
F1A2	114	603	662	57	64	26
F1A3	146	600	630	68	60	26
F1A1	139	450	577	98	54	26
F2A3	161	430	590	58	65	25
F2A1	168	564	560	76	67	25
F2A2	164	594	564	49	61	25

- Data: 19 de abril de 2008. Biomassa: 12 kg de macaúba.
- Início de medição: 9h 20 min. Intervalo de medições: 5 min.

Usou-se uma tela metálica sobre a grelha do reator, objetivando impedir que os endocarpos das macaúbas ultrapassassem a grelha para as cinzas.

#### 4.4. Análises estatísticas dos resultados

Não houve efeito simultâneo das aberturas e das frequências sobre a temperatura, os fatores atuaram independentemente.

Contudo, mesmo que a interação não tenha sido significativa (estatisticamente, não houve interferência), observou-se significância de efeito principal nas frequências do canal Ch2. Por meio do teste de Tukey, foi comprovado um contraste estatisticamente diferente de zero entre duas médias.

As Tabelas de 10 a 15 abaixo detalham a análise estatística:

- Número de dados: 27.
- FV (fontes de variação); GL (grau de liberdade); QM (quadrado médio); F (calculado).

<b>Tabela 10: ANOVA de Ch0 (entre os canais de secagem e pirólise)</b>			
<b>FV</b>	<b>GL</b>	<b>QM</b>	<b>F</b>
FREQUÊNCIA	2	1407.37	0.30
ABERTURA	2	605.04	0.13
FREQ. X ABERT.	4	340.48	0.07
RESÍDUO	18	4635.30	-
TOTAL	26	-	-
Média Geral: 128.19 Coeficiente de Variação: 53.11			

<b>Tabela 11: ANOVA de Ch1 (canal da zona de oxidação)</b>			
<b>FV</b>	<b>GL</b>	<b>QM</b>	<b>F</b>
FREQUÊNCIA	2	4850.93	0.19
ABERTURA	-	13152.15	0.51
FREQ. X ABERT.	4	11560.87	0.45
RESÍDUO	18	25798.37	-
TOTAL	26	-	-
Média Geral: 691.63 Coeficiente de Variação: 23.22			

<b>Tabela 12: ANOVA de Ch2 (canal da zona de redução)</b>			
<b>FV</b>	<b>GL</b>	<b>QM</b>	<b>F</b>
FREQUÊNCIA	2	15649.93	<b>** 8.32</b>
ABERTURA	2	491.81	0.26
FREQ. X ABERT.	4	1003.09	0.53
RESÍDUO	18	1881.00	-
TOTAL	26	-	-
**significativo a 5% de probabilidade pelo teste F. Média Geral: 657.93 Coeficiente de Variação: 6.60			

<p><b>Tabela 13:</b> Teste de Tukey para Ch2 (1881.00 resíduos)          FREQ Descrição Dados Médias Comparações 5%</p> <p>F 3: 9702.44a</p> <p>F 1: 9651.56ab</p> <p>F 2: 9619.78b</p> <p>Q (0.05; 18) = 3.61    DMS = 52.19</p>
---

<b>Tabela 14:</b> ANOVA de Ch3 (chama piloto)			
<b>FV</b>	<b>GL</b>	<b>QM</b>	<b>F</b>
FREQUÊNCIA	2	3741.59	2.23
ABERTURA	2	3118.48	1.86
FREQ. X ABERT.	4	1007.70	0.60
RESÍDUO	18	1678.96	-
TOTAL	26	-	-
Média Geral: 111.37. Coeficiente de Variação: 36.79.			

<b>Tabela 15:</b> ANOVA de Ch4 (saída do ar de secagem)			
<b>FV</b>	<b>GL</b>	<b>QM</b>	<b>F</b>
FREQUÊNCIA	2	156.48	0.69
ABERTURA	2	7.81	0.03
FREQ. X ABERT.	4	6.54	0.03
RESÍDUO	18	227.52	-
TOTAL	26	-	-
Média Geral: 79.81. Coeficiente de Variação: 18.90.			

## 5. RESULTADOS E CONCLUSÕES

As propriedades físicas da macaúba: massa específica aparente, massa específica unitária ou real e porosidade apresentaram valores típicos, compatíveis com os de outras biomassas; e, como destaque, o poder calorífico, superior ao de muitas biomassas tradicionalmente usadas como combustíveis.

A revisão do estudo teórico e empírico desenvolvido ao longo desta pesquisa, que teve como objetivo a construção e desenvolvimento de um gaseificador de biomassa, em fluxo concorrente, foi realizada a fim de que se melhor compreendesse sobre a produção de ar quente e limpo para a desidratação de frutas tropicais.

A pesquisa foi desenvolvida em três etapas: 1) construção do gaseificador, em fluxo concorrente; 2) pré-experimentos e 3) experimentos definitivos.

A construção do gaseificador, em fluxo concorrente, acoplado ao combustor e misturador, foi efetivada no galpão do setor de Armazenamento do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa.

Na etapa de pré-experimentos, testou-se o gaseificador (reator) com as biomassas eucalipto, carvão e macaúba. Foi possível observar que uma das vantagens da macaúba em relação aos outros combustíveis é que ela não exigiu os freqüentes adensamentos (socagem, conforme se observa no anexo A). Com a macaúba, houve melhor fluidez deste combustível no interior do reator. Deduzimos que essa característica (fluidez) elimina uma das desvantagens da gaseificação que é a exigência de combustíveis uniformes. Ainda nesta etapa de pré-experimentos, testou-se, no início do processo, a biomassa candombá como combustível de ignição, que nos forneceu bons resultados para a combustão dos gases provindos da gaseificação (conforme anexo A).

Na terceira etapa, experimento definitivo organizado em esquema fatorial 3x3, com 3 repetições, o gaseificador foi testado com drupas de macaúbas.

Durante os testes (pré e definitivos), o gaseificador mostrou-se estável perante as temperaturas às quais foram submetidas, sem apresentação de rachaduras ou mesmo trincas.

A temperatura média do ar de secagem (canal Ch4) foi próxima de 80°C, podendo ser facilmente controlada através da abertura do misturador: misturando-se o ar quente com o ar atmosférico, pode-se atingir a temperatura ideal, a depender da fruta a ser desidratada (como, por exemplo, para a secagem de abacaxi, banana, mamão, caju e café, para os quais se recomenda uma temperatura em torno de 70°C).

Os resultados da pesquisa levam-nos a inferir que a macaúba constitui-se uma biomassa de grande potencial como combustível, via gaseificação com combustão adjacente dos gases produzidos, para desidratação de frutas.

## **6. RECOMENDAÇÕES:**

- As condições locais ditam o tipo de combustível utilizado na gaseificação. Em comunidades isoladas, que ainda não processam a macaúba (com o uso de despoldadores e britadores), essa biomassa poderia ser utilizada integralmente. Em regiões que venham a possuir unidades de processamento, a exemplo da UBCM (Unidade de Beneficiamento do Coco Macaúba), podem ser testados, para uso como combustível, a torta (epicarpo + mesocarpo) ou o endocarpo (casca dura do coco), sem prejuízo da extração de produtos mais nobres, como o óleo da amêndoa.
- No intuito de otimizar a gaseificação da macaúba para melhor aproveitamento de seu potencial energético em forma de calor, sugerimos um estudo estatístico comparativo da macaúba (integral, torta ou subproduto) com outra biomassa, de características e propriedades conhecidas e já utilizada.
- Não foram feitos, nesta pesquisa, testes da qualidade do ar quente para a desidratação de frutas tropicais. Nesse sentido, em caso de utilização prática da proposta contida neste trabalho, recomendamos uma análise química quantitativa e qualitativa do ar de secagem, com vistas a diagnosticar possíveis resíduos prejudiciais ao meio ambiente e à saúde de modo geral.

## **7. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Como contribuições da pesquisa, acreditamos que, com o uso da energia renovável, a macaúba contribuirá como um combustível coadjuvante na demanda energética do País.

Em relação ao gaseificador, pensamos que esse poderá ser usado para experimentos com outros tipos de biomassa, não sendo, portanto, exclusivo da macaúba. Poderá servir ainda de modelo para a construção de instrumentos similares, com as mesmas finalidades em outros centros de pesquisas ou, de maneira prática, para geração de energia, como eletricidade e calor.

De todo este quadro, observamos que os resultados não podem ser generalizados, dado que consideramos como limitações do estudo o reduzido número da amostra.

Como implicações de ordem particular, agradecemos, porque acreditamos na importância que tem este estudo para o próprio desenvolvimento profissional do pesquisador (orientando), que, de um resumido conhecimento anterior, obteve ampliações relevantes, que lhe acrescentaram realização e satisfações pessoais.

Finalmente, pensamos ter alcançado os objetivos propostos para este trabalho. Entretanto, acreditamos que percorremos apenas algumas etapas e que outras tantas ficam por percorrer em investigações futuras.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, R. O. de, **Candombá**: Aprendizagens sobre o Canbombá... E Sobre as Relações entre sujeitos... E entre Sujeitos e Candombás... Revista Virtual. v. 2. n. 1, jan-jun . Salvador 2006. p. 37- 49.

ANTUNES, B. M. F.; ALMEIDA, E. D. F.. **Biomassa**: Produção e Planejamento de Energia Elétrica. FCTUC: Faculdade de Ciências e Tecnologias. Universidade de Coimbra. Coimbra, 2003.

BARROS, D. M.; VASCONCELOS, E. C. **Termelétricas a lenha**. IN: MELLO, M. G. Biomassa – Energia dos trópicos em Minas Gerais. Belo Horizonte: LABMÍDIA/FAFICH/UFMG, 2001. p. 221-241.

BARUFFALDI, R.; OLIVEIRA, M. N. de. **Fundamentos de tecnologia de Alimentos**. V.3 São Paulo: Livraria Atheneu, 1998.

CEMIG – COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS. **Gaseificação de Biomassa**. Belo Horizonte: Divisão de análise e desenvolvimento energético, 1986.

CETEC. Macaúba. Disponível em: [HTTP://www.biodiesel.gov.br](http://www.biodiesel.gov.br). Acessado em: 15/03/2008.

CENBIO - Centro Nacional de Referência em Biomassa. **Estado da Arte da Gaseificação**. Comparação entre Tecnologias de Gaseificação de Biomassa existentes no Brasil e no Exterior e Formação de Recursos Humanos na Região Norte. São Paulo, 2002.

COUTO, S. M.; MAGALHÃES, A. C.; QUEIROZ, D. M. de; BASTOS, I. T.. **Massa Específica Aparente e Real e Porosidade de Grãos de Café em Função do Teor de umidade**. In: Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande. v.3. n.1. p. 61-68. 1999.

Cocal Brasil. **Produtos**. Disponível em: <http://www.cocalbrasil.com.br/products.htm>. Acessado em: 01/03/2008.

D'ÁVILA, S. G.; MAKRAY, Z. T.; **Gaseificadores de madeira – aspectos técnicos e econômicos.** IN: PENEDO, W. R. **Gaseificação de madeira e carvão vegetal.** Belo Horizonte: CETEC. 1981. p. 53-72. (Série de publicações técnicas, 4).

FURIGO JÚNIOR, A. **Biodiesel.** Universidade Federal de Santa Catarina. CTC Centro Tecnológico. Florianópolis. Santa Catarina. 2006.

GONELI, A. L. D.; CORREIA, P. C., RESENDE, O.; BOTELHO, F. M.. **Propriedades Físicas dos Frutos de Mamona durante a Secagem.** IN: II CONGRESSO BRASILEIRO DE MAMONA. Universidade Federal de Viçosa. 2005. Universidade Federal de Rondônia. 2005.

JOSÉ, H. J. **Combustão e Combustíveis:** Apostila Química Tecnológica Geral. Universidade Federal de Santa Catarina. CTC. Centro Tecnológico. EQA Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos. 2004. p. 12-13.

LORA, E. S.; HAPP, J. F. **Balço de massa e energia nos processos de combustão.** IN: CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. S. **Tecnologias de conversão energética da biomassa.** Manaus: EDUA/EFEI. 1997. p 61-90.

LORA, E. S.; HAPP, J. F. **Classificação e balanço térmico das fornalhas para a combustão de biomassa.** IN: CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. S. **Tecnologias de conversão energética da biomassa.** Manaus: EDUA/EFEI, 1997b, p 91-132.

LORA, E. S.; HAPP, J. F.; CORTEZ, L. A. B.; **Caracterização e disponibilidade da biomassa.** IN: CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. S. **Tecnologias de conversão energética da biomassa.** Manaus: EDUA/EFEI. 1997. p 5-38.

LORENZI, G. M. A. C.; NEGRELLE, R. R. B.. **Acrocomia aculeata (JACQ.) LODD. EX MART. : Aspectos Ecológicos, Usos e potencialidades.** Departamento de Botânica da Universidade Federal do Paraná. Disponível em: [gmlorenzi@uol.com.br](mailto:gmlorenzi@uol.com.br). Acesso em 12 de junho de 2006.

MARTIN, S.. **Desenvolvimento de um Gasificador de Biomassa de Fluxo Concorrente.** 2005. Tese (Magister Scientiae) Universidade Federal de Viçosa. Viçosa Minas Gerais Brasil 2005.

MARTIN, S.; SILVA, J. N.; TINÔCO, I. F. F.; VIEIRA, A. C.; ZANATTA, F. L.; MELO, L. D.. **Projeto e construção de um gaseificador de biomassa de fluxo concorrente.** R. Engenharia na Agricultura, Viçosa, MG, v.14, n.4, 258-267, Out./Dez, 2006.

MARTINS, José P. Biodiesel: **Pesquisadores da UFV desenvolvem equipamentos para processar coco da macaúba.** Disponível em: [HTTP://news.andifes.org.br/index.php?shonews=862](http://news.andifes.org.br/index.php?shonews=862). Acessado em: 06/03/2008.

MENDES, L. M.; SILVA, J. R. da; TRUGILHO, P. F. **Gaseificação de carvão vegetal ou madeira para geração de energia em pequena escala.** Lavras: UFLA/FAEPE, 1998.

MIRADOR. Enciclopédia Mirador Internacional. **Termoquímica.** Encyclopaedia Britannica do Brasil. v. 19. São Paulo - Rio de Janeiro. Brasil 1990.

MOTTA, P. E. F da; CURTI, N.; OLIVEIRA FILHO, A. T. de; GOMES, J. B. C.; **Ocorrência da Macaúba em Minas Gerais: Relação com atributos climáticos, pedológicos e vegetacionais.** R. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.37, n.7, Julho 2002.

MOURA, Elisa F. **Indução e caracterização anatômica da embriogênese somática em macaúba (Acrocomia aculeata).** Disponível em: [HTTP://ufv.br/dbg/resumos/elisa.htm](http://ufv.br/dbg/resumos/elisa.htm). Acessado em 06/03/2008.

O Popular On-line. **Coco macaúba poderá ser fonte alternativa.** Disponível em: [HTTP://jornaldotocantis.globo.com/anteriores/15abr2007/campo/ultima.htm](http://jornaldotocantis.globo.com/anteriores/15abr2007/campo/ultima.htm). Acessado em: 05/03/2008.

PARK, K. J.; ANTONIO, G. C.; OLIVEIRA, R. A. de; PARK, K. J. B.. **Conceitos de Processo e Equipamentos de Secagem.** CAMPINAS 2007.

PETRUCCI, E. G. R.. **Concreto de Cimento Portland.** 8ª ed. Editora Globo Porto Alegre Rio de Janeiro 1981.

PIANCA, J. B.. **Manual do Construtor.** v. 1 . Ed. 17. Porto Alegre Ed. Globo 1979.

PINHEIRO, C. C. P.; VALLE, R. M.. **Controle de combustão: Otimização do Excesso de Ar.** Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG. Belo Horizonte Mg. .1995.p. 157-162.

REY, A. B.. **Física / Química Modernas**. Química Fundamental. v. II e Físico/Química Básica. v. IV. São Paulo. Fortaleza. 1970.

RODRIGUES, M. G. V. – **Frutas desidratadas: produção e mercado de frutas desidratadas**, 2004. Disponível em [www.todafruta.com.br/todafruta](http://www.todafruta.com.br/todafruta) Acessado em: 13/08/2008.

SÁNCHEZ, C. G.; LORA, E. S.; GÓMES, E.O. **Gaseificação**. IN: CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. S.. **Tecnologias de conversão energética da biomassa**. Manaus: EDUA/EFEI. 1997. p 255-347.

SÁNCHEZ, C. G.. **Tecnologia da gaseificação**. Capítulo III. **Estequiometria das reações Químicas**. UNICAMP. Faculdade de Engenharia Mecânica. Março de 2003.

SÁNCHEZ, C.G.; LORA, E. S.; GÓMES, E. O.. **Biomassa Para Energia**. IN: CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. S.. **Tecnologias de conversão energética da biomassa**. Prefácio; LEITE R. C.de C. Setembro de 2006.

SÁNCHEZ, C. G. **Tecnologia da combustão (Capítulo II)**. Disponível em: <<ftp://ftp.fem.unicamp.br/pub/IM351/Comb-Cap2.pdf>> . Acessado em: 12/08/2008.

SANTOS, I. da S. dos. **Reator de gaseificação de biomassa em fluxo contracorrente**. 2003. 76 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2003.

SILVA, J. C.; BARRICHELO, L. E. G.; BRITO, J. O.. **Endocarpos de Babaçu e de Macaúba Comparados a Madeira de Eucalyptus grandis Para a Produção de Carvão Vegetal**. IPEF, n. 34 dez. 1986. P. 31-34.

SILVA, J. N. da; SAIKI, E. T.; VILARINHO, M. C.; SOBRINHO, J. C.. **Gasificador/combustor a cavacos de lenha na secagem de café despulpado**. IN: ENCONTRO NACIONAL DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 3º – AGRENER 2000, Campinas. **Anais**. Campinas, 2000.

TECPAR. **Resposta Técnica, nº 2021**. Disponível em: <http://www.sbrt.ibict.br/resposta.do>. Acessado em: 10/03/2008.

UBCM: **Unidade de Beneficiamento do coco macaúba**. Riachão. Montes Claros. MG. Fone (38) 3226-10000 ou 99743805. Pesquisa em 05 de abril de 2008.

WANDER, P. R.. **Utilização de resíduos de madeira e lenha como alternativas de energia renováveis para o desenvolvimento sustentável da região nordeste do estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: 2001. 106 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001.

VAN WYLEN, G. J.. SONNTAG, R. E.. **Fundamentos da Termodinâmica Clássica**. São Paulo, Edgard Blucher Ltda, 2003.

**Sites Consultados:**

- [www.cocalbrasil.com.br](http://www.cocalbrasil.com.br) Acessado em: 01/03/2008;
- [www.setor1.com.br](http://www.setor1.com.br) Acessado em: 17/03/2008;
- [www.empregoerenda.com.br](http://www.empregoerenda.com.br) Acessado em: 15/08/2008;
- [www.codevasf.gov.br](http://www.codevasf.gov.br) Acessado em: 15/08/2008.

## 9. ANEXOS

**Anexo A** – Testes preliminares de gaseificação.

**Tabela A 1:** Gaseificação de carvão vegetal (pata de vaca, 20 kg).

- Furos do reator semiabertos;
- Data: 10 de abril de 2008;
- Início: 14h20min;
- Início da medição: 15h00min;
- Intervalo de medições: 5min;
- $a$  = área de entrada de ar primária do combustor ( $\text{cm}^2$ );
- $b$  = entradas secundárias (laterais) do combustor ( $\text{cm}^2$ );
- $c$  = entrada de ar do misturador ( $\text{cm}^2$ );
- (G. L. P.) ignição do Reator;
- (Candombá) ignição do combustor.



**Figura 25:** Preparo para gaseificação de carvão vegetal.

**Tabela 16:** Temperaturas das zonas de combustão e ar de secagem (exaustão), variando as aberturas, primárias do combustor (da chama piloto), secundárias do combustor (laterais) e do misturador.

ABERTURAS ( $\text{cm}^2$ )			TEMPERATURA ( $^{\circ}\text{C}$ )		A CADA 5min
Piloto	Combustor	Misturador	Combustão	Exaustão	Observação
a	b	c	31,1	31,1	14: 30h
					15: 00h
150 $\text{cm}^2$	b=0	c=0	900	132	15: 05h
150	''	''	863	128	

150	“”	“	932	137	-
150	“”	“	958	138	-
150	“	“	930	131	-
150	“	“	879	135	-
a =0	“	“	957	245	Adensamento-
“	b=0	“	948	250	-
“	320	“	865	108	-
“	320	“	825	88	-
“	320	“	854	81	-
“	320	“	881	79	16: 00h
“	320	“	890	80	-
“	320	c=0	833	76	Adensamento-
“	320	200	785	49	-
“	320	200	767	45	-
“	320	200	767	43	-
“	320	200	771	425	-
“	320	200	774	41	-
“	320	200	776	40	Adensamento-
“	650	200	729	35	-
“	650	200	711	34	-
“	650	200	706	34	-
“	650	200	690	33	17:00h-
“	650	200	678	33	-
“	650	200	666	32	-
“	b=0	c=0	949	144	Adensamento-
“	“	“	933	137	-
“	“	“	954	169	-
“	“	“	990	177	-
“	“	”	993	191	-
“	“	”	1020	198	-
“	“	”	-	-	-
“	“	”	1189	174	Máxima
a=0	b=0	c=0	1142	172	Fumaça

Fim da medição 18:00h Cinza:1,3 kg

**Tabela 17:** Gaseificação de Eucalipto (10 kg)

	Ch0	Ch1	Ch2	Ch3	Ch4	Amb	OBSERVAÇÃO
F1A1	112	789	729	359	114	26	12: 10h
F1A2	215	918	640	174	106	26	Adensamento
F1A3	197	628	623	117	93	27	12: 30h
F2A2	243	920	766	136	95	26	12: 40h
F2A3	158	706	573	108	80	26	*Adensamento
F2A1	159	610	555	210	84	26	13: 00h
F3A3	151	678	542	187	73	26	13: 10h
F3A1	136	690	546	190	81	27	Adensamento
F3A2	135	690	532	78	80	27	13: 30h

\*Fumaça, escassez de fogo no reator, injeção de G. L. P.



**Figura 26:** Preparo para gaseificação de eucalipto.

- Data: 17 de abril de 2008
- Início da medição: 12h10min.
- Intervalo de medições: 10min
- Gaseificador pré-aquecido:
- (G. L. P.) ignição do Reator.
- (Carvão) ignição do combustor

F1= 50Hz, F2=55Hz , F3= 60Hz ; A1=120cm<sup>2</sup> · A2=180cm<sup>2</sup> A3=180 cm<sup>2</sup>.

## **Anexo B – Construção do gaseificador - detalhes e especificações**

### **➤ CONSTRUÇÃO DE UM GASEIFICADOR**

O gaseificador foi construído na área experimental de processamento de produtos agrícolas do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa. Tal construção objetivou gaseificar biomassas e, dentre elas, a gaseificação de macaúba, para verificar seu potencial como combustível na desidratação de frutas.

#### **C.1. MATERIAIS (especificações):**

##### **1.1. Refratários**

- Lajotas refratárias 23 X 11 X 2cm.
- Telhas de amianto (suporte da laje).
- Tijolos refratários 23 X 11 X 6cm (reaproveitados).
- Terra refratária (Reframa).
- Vidro refratário (reaproveitado).

##### **1.2. Comuns**

- Água.
- Areia comum.
- Blocos cerâmicos furados 19,5X19,5X9,5cm.
- Cal.
- Carvão vegetal (em pó).
- Cimento Portland comum.
- Terra comum (barro).
- Tijolos maciços 19 X 9 X 5cm.
- Tubos (15”), tampa, grelhas e portinholas de ferro.
- 

#### **B.2 ARGAMASSAS**

2.1. **Pasta** (aglomerante +água) de terra refratária com água apenas de amassamento, para rejuntamento dos tijolos refratários no interior da tubulação do reator, onde ocorrem a pirólise, oxidação e redução. Usada também no revestimento da base do reator, após duas camadas de tijolos, e em rejuntamento de tijolos refratários.

2.2 **Argamassa** (pasta + agregado) experimental composta dos aglomerantes terra refratária, e terra comum, dos agregados finos areia e pó de carvão vegetal, no traço 4: 4: 4: 1 em volume, e fator de água/terra mínimo e de acordo com a umidade dos materiais. Usada na base do reator e no casulo que envolve a chama piloto, combustor, misturador, incluindo a laje de cobertura destes, apoiada em telhas de amianto.

**2.3. Pasta composta** de terra comum e cimento portland comum, no traço 10 : 1 (barro), usada como revestimento.

### **B.3. ARGUMENTO**

O gaseificador é um forno. É, portanto, um recinto fechado no qual se pretende elevar e manter a temperatura interna até que, na biomassa introduzida, ocorram as transformações desejadas. Para aproveitamento máximo do conteúdo energético no combustível (biomassa), os reatores devem ser isolados. As paredes deverão ser de materiais refratários, para se tornarem isolantes, incombustíveis e inalteráveis quando solicitadas a altas temperaturas.

Deve-se considerar ainda a redução da eficiência do sistema de gaseificação, que ocorre devido à perda de calor e ao consumo de energia nos ventiladores (CORTEZ & LORA, 2006).

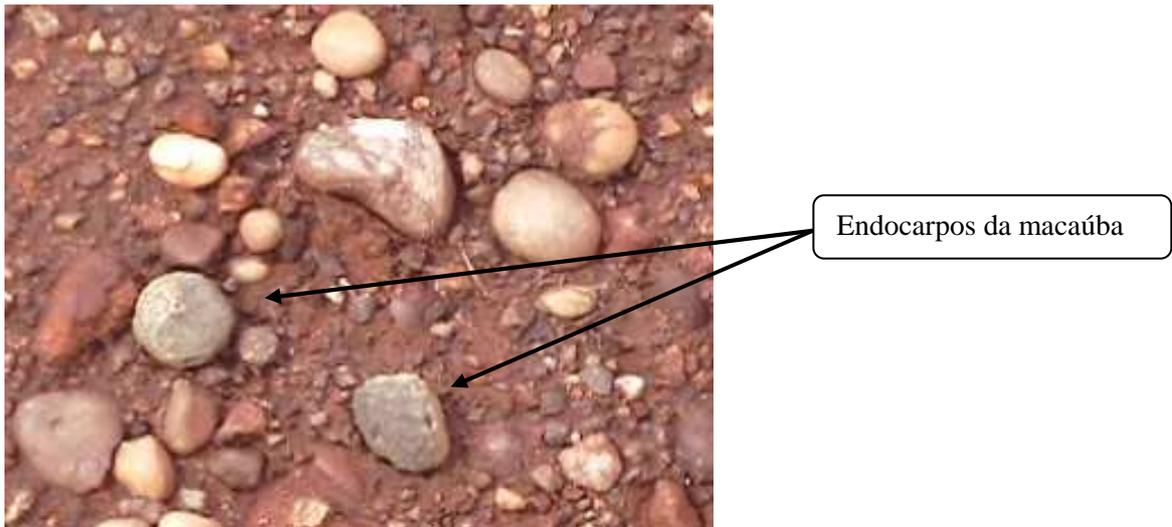
Segundo Petrucci (1981), a argamassa normal de cimento, areia e água não é recomendada para construções submetidas a altas temperaturas, da mesma forma que o concreto, que é a adição da argamassa com brita. À temperatura de 200 a 300 °C, as argamassas perdem suas qualidades e se desagregam, pois os compostos hidratados do cimento perdem sua água de constituição. Identicamente, os agregados do tipo silício sofrem transformação cristalina em temperatura de 600 a 800 °C, tornando o material friável.

A brita tem função econômica no concreto, ocupando o espaço que seria ocupado pela argamassa. Ela não aumenta a resistência do concreto. Observados os limites de temperatura, a brita pode participar de concreto refratário, usando o cimento aluminoso.

O uso do endocarpo, parte lignificada da semente de macaúba, como substituto da brita em concreto, (LORENZI & NEGRELLE, 2006), merece ser comentado:

Em visita a UBCM, Riachão, Montes Claros, Minas Gerais, em 05 de abril de 2008, comprovou-se a afirmativa de Lorenzi e Negrelle, citada neste trabalho, de que a parte lignificada (endocarpo) substitui a brita no concreto. Segundo associados, o coco interno, inteiro ou britado, é de uso corriqueiro como substituto da pedra em pisos e concretos em geral. A casca dura britada é, por enquanto, um subproduto abandonado, pela pouca utilidade, como pode ser visto nos arredores da fábrica. (Figura 07 D).

O coco inteiro é encontrado na natureza, junto aos seixos rolados, conforme a Figura B 1 abaixo.



**Figura B1** – Endocarpos da macaúba entre seixos rolados na natureza.

Petrucci (1981) sugere que os agregados graúdos devem aproximar-se de cubos quando britados e de esferas quando seixos rolados. Segundo Pianca (1979), os seixos rolados oferecem melhor trabalhabilidade, resistência e durabilidade. A exigência é que, em qualquer caso, o agregado seja isento de matéria orgânica.

O endocarpo integral da macaúba possui o formato do seixo rolado e grande resistência, fragmentado, porém se afasta da forma recomendada por (1981). Acrescentando o fato de ser matéria orgânica, o uso da macaúba no concreto Petrucci merece ser pesquisado.

# DETALHES CONSTRUTIVOS

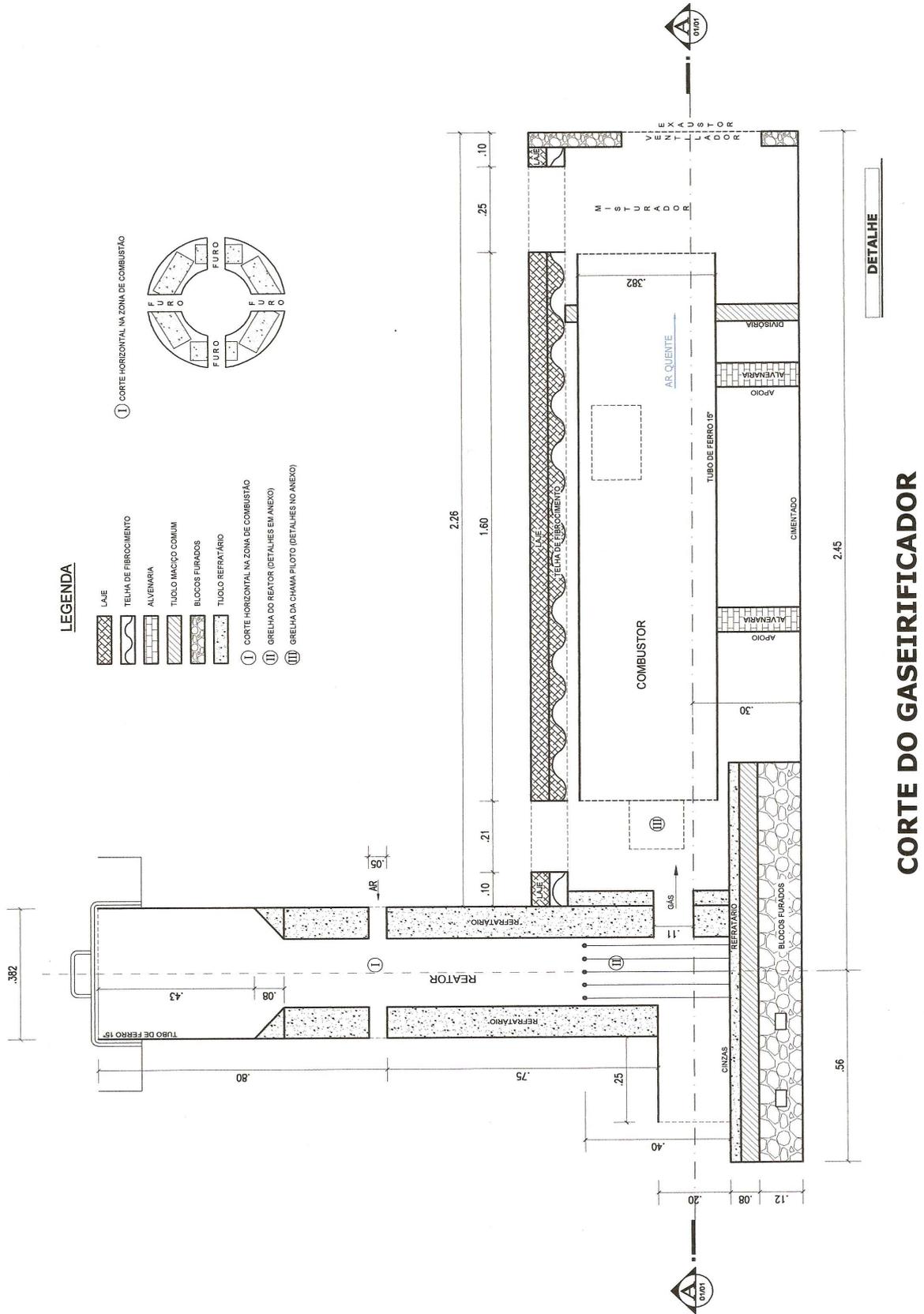
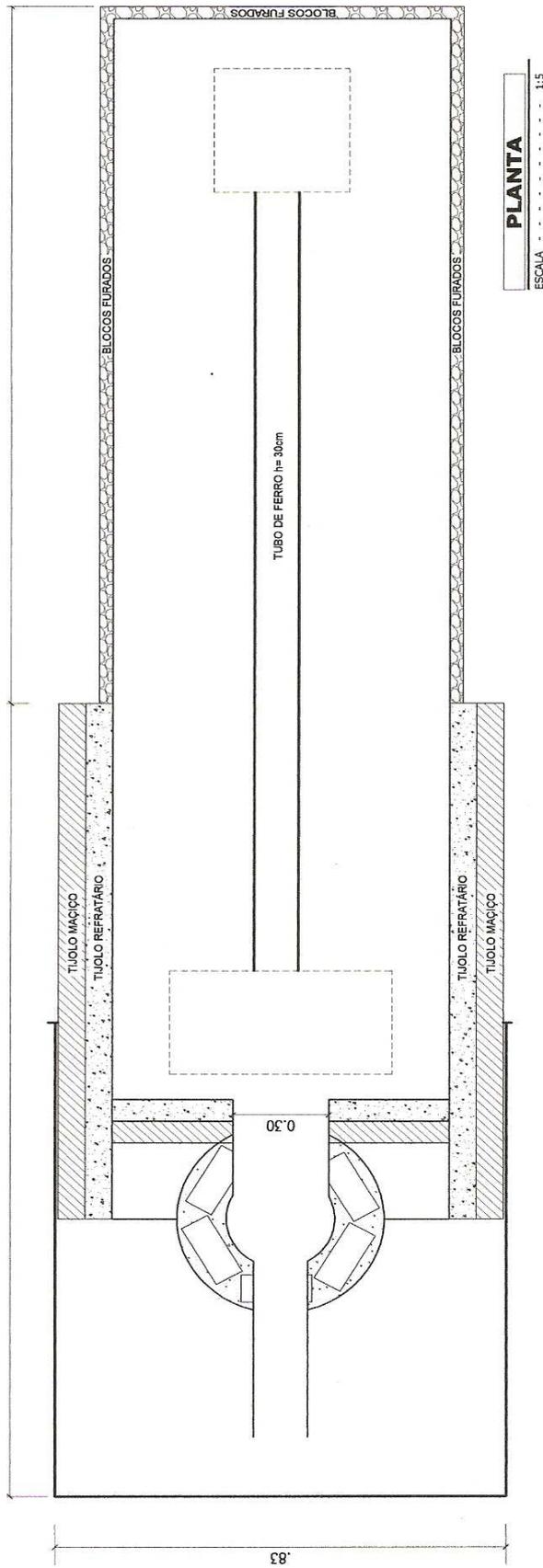
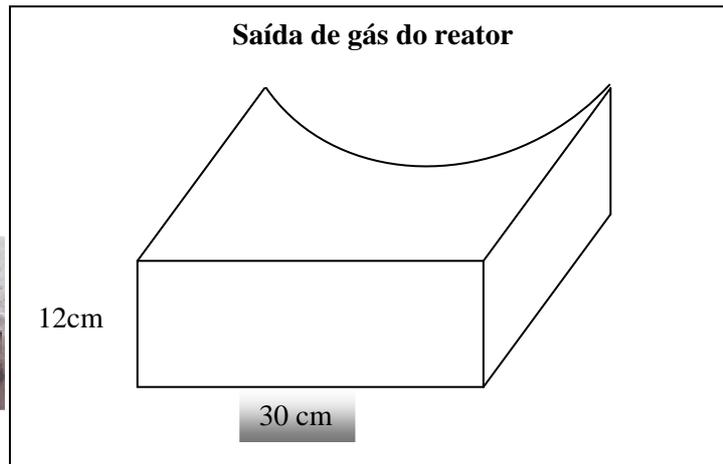


Figura B2 – Corte do gaseificador

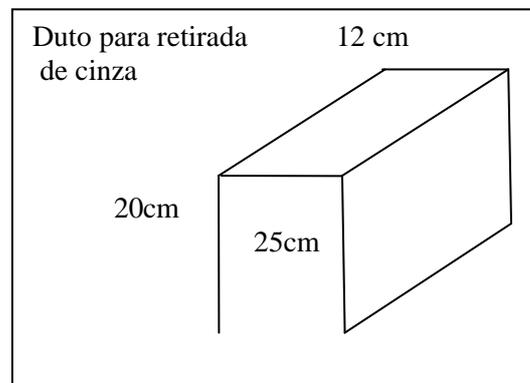


**Figura B3** – Planta do gaseificador (h =30 cm)

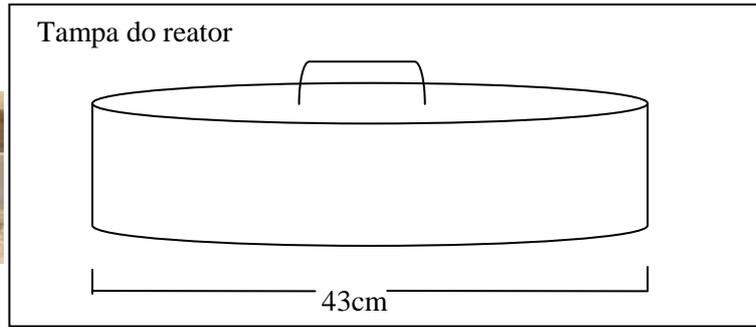
**C3 - PLANTA DO GASEIFICADOR (h=30cm)**



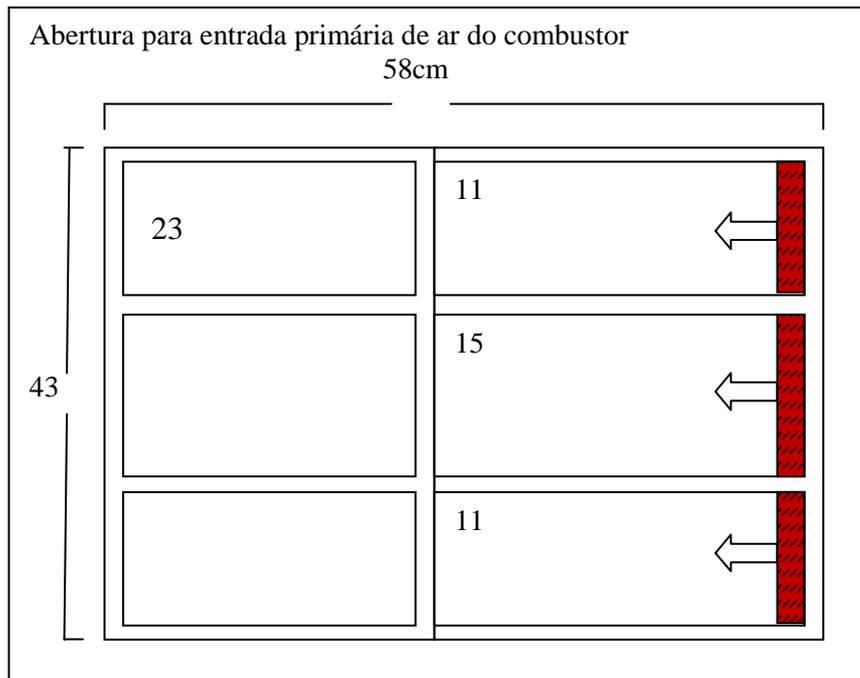
**B4**



**B5**

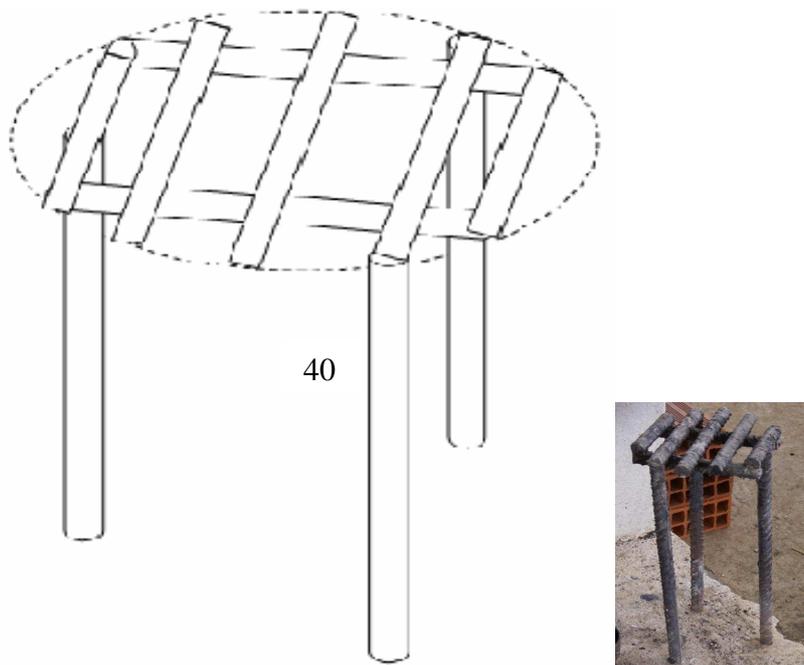


**B6**

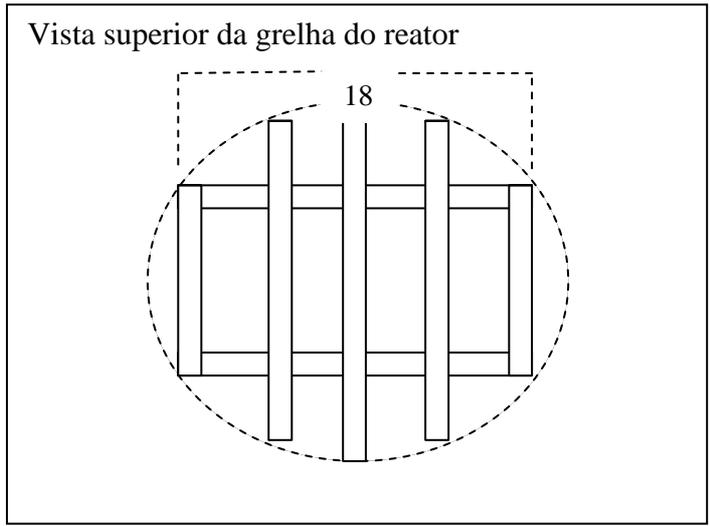


**B7**

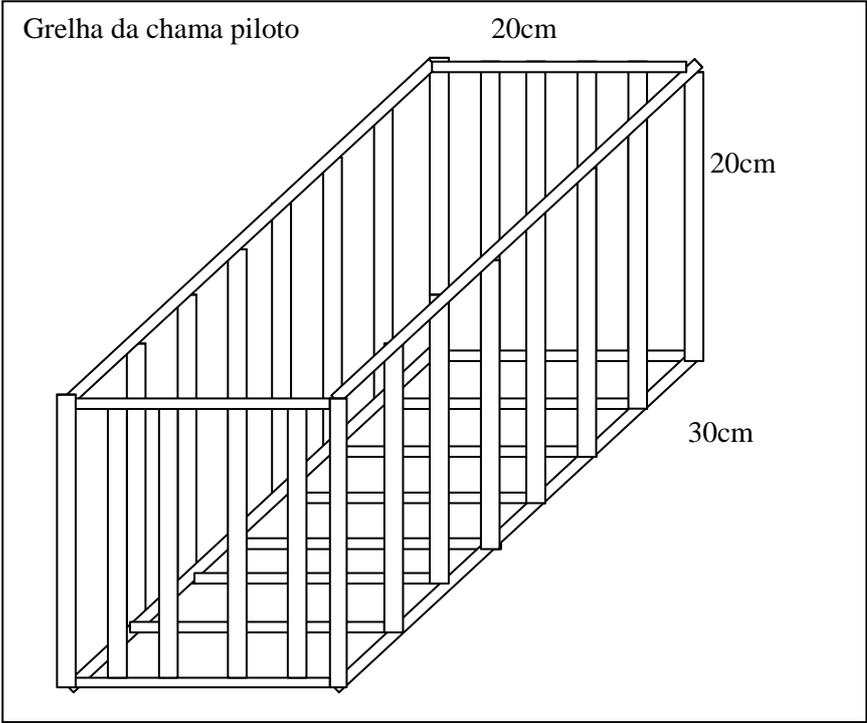
**Grelha do reator**



**B8**



**B9**



**B10**

**Anexo C – Massa e dimensões medidas do fruto da macaúba**

**Tabela C1 – Valores obtidos na medição da massa e medidas da macaúba para o cálculo das propriedades físicas**

<b>Tabela C1 – Valores obtidos na 1ª medição</b>				
<b>Número</b>	<b>Massa (g)</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
		<b>Em centímetros (cm)</b>		
		<b>Comprim.</b>	<b>Largura</b>	<b>Altura</b>
<b>1</b>	22,76	4,44	4,35	4,70
<b>2</b>	20,07	4,10	4,00	4,01
<b>3</b>	21,92	4,36	4,32	4,30
<b>4</b>	17,74	4,42	4,40	4,40
<b>5</b>	13,09	4,43	4,41	4,12
<b>6</b>	19,53	4,30	4,27	4,34
<b>7</b>	13,32	4,50	4,48	4,24
<b>8</b>	19,50	4,27	4,25	4,46
<b>9</b>	14,85	4,13	4,08	4,30
<b>10</b>	20,09	4,42	4,38	4,64
<b>11</b>	23,97	4,33	4,26	4,58
<b>12</b>	18,56	4,30	4,27	4,14
<b>13</b>	14,49	4,32	4,31	4,63
<b>14</b>	17,61	4,20	4,17	4,13
<b>15</b>	20,11	4,15	4,07	4,90
<b>16</b>	11,94	4,63	4,55	4,86
<b>17</b>	16,47	3,93	3,92	4,20
<b>18</b>	13,45	3,79	3,77	4,17
<b>19</b>	21,13	4,30	4,27	4,46
<b>20</b>	17,94	4,40	4,38	4,73
<b>21</b>	18,67	4,34	4,32	4,47
<b>22</b>	24,04	3,90	3,86	4,00
<b>23</b>	12,36	3,82	3,74	4,48
<b>24</b>	19,47	4,58	4,55	4,40
<b>25</b>	20,05	4,15	4,14	4,11

<b>26</b>	21,13	4,35	4,35	4,65
<b>27</b>	20,47	4,47	4,44	4,58
<b>28</b>	18,92	4,30	4,21	4,68
<b>29</b>	20,05	4,48	4,46	4,50
<b>30</b>	20,44	4,62	4,61	4,39
<b>31</b>	21,77	4,36	4,30	4,52
<b>32</b>	14,04	4,35	4,32	4,74
<b>33</b>	19,55	3,92	3,64	3,51
<b>34</b>	21,98	4,63	4,61	4,32
<b>35</b>	20,26	4,35	4,32	4,50
<b>36</b>	11,55	4,55	4,44	4,36
<b>37</b>	18,85	4,15	4,10	4,35
<b>38</b>	13,87	4,17	4,13	4,24
<b>39</b>	21,29	4,32	4,31	4,63
<b>40</b>	19,87	4,37	4,28	4,59
<b>41</b>	19,08	4,15	4,15	4,26
<b>42</b>	16,71	4,31	4,30	4,61
<b>43</b>	18,56	4,32	4,30	4,63
<b>44</b>	16,35	4,28	4,20	4,63
<b>45</b>	22,03	4,47	4,35	4,76
<b>46</b>	19,51	4,10	4,08	4,08
<b>47</b>	14,21	4,27	4,26	4,49
<b>48</b>	20,44	4,35	4,35	4,42
<b>49</b>	19,79	4,00	3,97	4,05
<b>50</b>	19,05	4,06	4,03	4,24
<b>51</b>	21,07	4,36	4,34	4,38
<b>52</b>	22,6	4,40	4,37	4,17
<b>53</b>	28,35	4,41	4,40	4,68
<b>54</b>	20,40	4,81	4,76	5,14
<b>55</b>	17,39	3,95	3,93	4,08
<b>56</b>	17,86	4,42	4,38	4,46
<b>57</b>	18,99	4,40	4,38	4,85
<b>58</b>	25,19	3,98	3,97	4,60
<b>59</b>	17,27	4,21	4,20	4,55
<b>60</b>	23,57	4,42	4,40	4,59

<b>61</b>	17,28	4,46	4,45	4,3
<b>62</b>	18,75	4,46	4,43	4,6
<b>63</b>	19,97	4,36	4,35	4,77
<b>64</b>	17,38	3,83	3,79	3,7
<b>65</b>	20,08	4,31	4,30	4,44
<b>66</b>	24,27	4,20	4,15	4,42
<b>67</b>	18,77	4,30	4,30	4,34
<b>68</b>	23,63	4,35	4,33	4,55
<b>69</b>	19,78	3,76	3,65	4,2
<b>70</b>	21,31	3,87	3,86	4,07
<b>71</b>	16,86	4,42	4,40	4,30
<b>72</b>	15,91	4,46	4,42	4,54
<b>73</b>	19,23	4,27	4,23	4,61
<b>74</b>	21,25	3,80	3,79	3,81
<b>75</b>	14,94	4,43	4,40	4,26
<b>76</b>	14,72	4,16	4,16	4,28
<b>77</b>	20,38	4,42	4,40	4,58
<b>78</b>	12,89	4,00	3,98	4,07
<b>79</b>	21,54	3,88	3,86	4,06
<b>80</b>	18,14	4,15	4,10	4,55
<b>81</b>	18,49	4,27	4,20	4,91
<b>82</b>	19,91	4,16	4,15	4,46
<b>83</b>	21,03	4,36	4,31	4,22
<b>84</b>	22,74	4,16	4,01	4,29
<b>85</b>	23,33	4,36	4,34	4,63
<b>86</b>	20,10	4,50	4,46	4,47
<b>87</b>	21,58	4,35	4,34	4,20
<b>88</b>	18,94	3,80	3,76	3,60
<b>89</b>	19,22	3,98	3,97	3,18
<b>90</b>	18,77	4,46	4,44	4,24
<b>91</b>	19,63	3,97	3,91	3,90
<b>92</b>	19,60	3,99	3,96	3,95
<b>93</b>	21,43	3,90	3,88	3,90
<b>94</b>	25,57	4,27	4,22	4,30
<b>95</b>	23,52	4,11	4,10	4,17

<b>96</b>	18,75	4,12	4,11	4,50
<b>97</b>	18,91	4,35	4,33	4,55
<b>98</b>	15,92	4,40	4,37	4,57
<b>99</b>	18,92	4,57	4,56	4,94
<b>100</b>	18,45	4,21	4,17	4,36
<b>101</b>	14,49	4,47	4,46	4,52
<b>102</b>	18,94	4,44	4,40	4,55
<b>103</b>	19,74	4,24	4,18	4,49
<b>104</b>	14,58	4,47	4,44	4,36
<b>105</b>	18,45	4,35	4,33	4,17
<b>106</b>	19,31	4,51	4,38	4,86
<b>107</b>	17,56	4,56	4,55	4,80
<b>108</b>	14,46	4,22	4,14	4,36
<b>109</b>	18,95	3,95	3,90	4,03
<b>110</b>	18,80	3,90	3,86	4,10
<b>111</b>	21,36	4,40	4,34	4,20
<b>112</b>	17,82	4,35	4,32	4,79
<b>113</b>	21,84	4,19	4,17	4,40
<b>114</b>	17,45	4,20	4,18	4,40
<b>115</b>	19,05	4,68	4,66	4,76
<b>116</b>	16,78	4,25	4,08	4,18
<b>117</b>	18,86	3,86	3,72	4,07
<b>118</b>	16,84	4,34	4,25	4,70
<b>119</b>	17,12	4,35	4,33	4,26
<b>120</b>	19,58	4,36	4,25	4,16
<b>121</b>	18,07	4,48	4,43	4,77
<b>122</b>	19,74	4,31	4,30	4,16
<b>123</b>	18,88	4,22	4,20	4,53
<b>124</b>	16,56	4,31	4,30	4,50
<b>125</b>	17,01	4,49	4,51	4,37
<b>126</b>	22,18	4,31	4,27	3,98
<b>127</b>	20,28	4,50	4,47	4,74
<b>128</b>	15,37	3,91	3,90	3,84
<b>129</b>	18,48	4,20	4,18	4,50
<b>130</b>	24,42	4,36	4,24	4,76

<b>131</b>	23,28	4,19	4,17	4,23
<b>132</b>	20,23	4,32	4,29	4,57
<b>133</b>	18,58	4,01	3,98	4,24
<b>134</b>	20,26	4,20	4,18	4,23
<b>135</b>	18,19	3,93	3,88	4,25
<b>136</b>	20,59	4,27	4,25	4,03
<b>Média</b>	<b>19,06</b>	<b>4,26</b>	<b>4,22</b>	<b>4,38</b>
<b>Massa Total (g)</b>	<b>2591,58</b>			

**Tabela C2** – Valores obtidos na medição da massa e medidas da macaúba para o cálculo das propriedades físicas

**Tabela C2 - Valores obtidos na 2ª medição**

Número	Massa (g)	Em centímetros (cm)		
		A Comprim.	B Largura	C Altura
1	26,90	4,50	4,50	4,60
2	20,60	4,44	4,50	4,37
3	31,80	4,49	4,35	4,36
4	31,70	4,12	4,14	4,30
5	18,20	4,28	4,37	4,46
6	33,20	4,26	4,30	4,50
7	23,60	4,75	4,77	4,65
8	25,80	4,44	4,60	4,47
9	30,40	4,58	4,56	4,38
10	30,90	4,47	4,63	4,78
11	29,20	4,50	4,53	4,55
12	26,80	4,29	4,32	4,36
13	28,80	4,32	4,56	4,36
14	29,10	4,49	4,57	4,33
15	24,10	4,50	4,53	4,29
...				
136	30,40	4,51	4,42	4,30
137	22,70	4,50	4,39	4,65
138	28,60	4,53	4,52	4,49
139	32,10	4,47	4,40	4,48
140	19,00	4,48	4,44	4,67
<b>Média</b>	<b>27,52</b>	<b>4,44</b>	<b>4,40</b>	<b>4,39</b>
<b>Massa Total (g)</b>	<b>3852,50</b>			

**Tabela C3** – Valores obtidos na medição da massa e medidas da macaúba para o cálculo das propriedades físicas

**Tabela C3 – Valores obtidos na 3ª medição**

Número	Massa (g)	Em centímetros (cm)		
		A Comprim.	B Largura	C Altura
1	21,70	4,36	4,28	4,40
2	23,70	4,15	4,10	4,35
3	23,30	4,14	4,11	4,49
4	28,00	4,08	4,06	4,24
5	29,40	4,20	4,18	4,40
6	22,20	4,28	4,25	4,26
7	23,60	4,00	3,98	4,13
8	23,20	4,13	4,07	4,16
9	24,80	4,29	4,14	4,45
10	25,00	3,98	3,96	4,00
11	22,40	4,04	4,00	4,24
12	25,90	3,93	3,90	4,15
13	22,20	3,94	3,90	4,05
14	21,60	4,47	4,43	4,30
15	19,70	4,00	3,87	4,25
16	21,50	4,03	4,02	4,14
...				
135	23,20	3,92	4,00	4,32
136	23,10	4,00	3,98	4,14
137	28,20	3,93	3,91	4,25
138	23,00	4,25	4,26	4,45
<b>Média</b>	<b>23,33</b>	<b>4,09</b>	<b>4,05</b>	<b>4,24</b>
<b>Massa Total (g)</b>	<b>3218,88</b>			