

**Universidade de Brasília - UnB  
Faculdade UnB Gama - FGA  
Curso de Engenharia de Energia**

**ANÁLISE QUALITATIVA DO GÁS PROVENIENTE DA  
GASEIFICAÇÃO DO FRUTO DA MACAÚBA  
(*ACROCOMIA ACULEATA*)**

**Autor: Eric Vinícius Lima Barbosa  
Orientador: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Maria del Pilar Hidalgo Falla**

**Brasília, DF  
2021**



**ERIC BARBOSA**

**ANÁLISE QUALITATIVA DO GÁS PROVENIENTE DA GASEIFICAÇÃO DO  
FRUTO DA MACAÚBA (*ACROCOMIA ACULEATA*)**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Orientador: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Maria del Pilar Hidalgo Falla

**Brasília, DF  
2021**

## CIP – Catalogação Internacional da Publicação

Barbosa, Eric.

Análise Qualitativa Do Gás Proveniente Da Gaseificação  
Do Fruto Da Macaúba (*Acrocomia Aculeata*). Brasília:  
UnB, 2021. 54 p. : il. ; 29,5 cm.

Monografia (Graduação) – Universidade de Brasília  
Faculdade do Gama, Brasília, 2021. Orientação: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup>  
Maria del Pilar Hidalgo Falla.

1. *Acrocomia aculeata*. 2. Macaúba. 3. Gaseificação I. Falla,  
Maria de Pilar. II. Doutora.

CDU Classificação



**ANÁLISE QUALITATIVA DO GÁS PROVENIENTE DA GASEIFICAÇÃO DO  
FRUTO DA MACAÚBA (*ACROCOMIA ACULEATA*)**

**Eric Barbosa**

Monografia submetida como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia da Faculdade UnB Gama - FGA, da Universidade de Brasília, em 11/02/2021 apresentada e aprovada pela banca examinadora abaixo assinada:

---

**Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Maria del Pilar Hidalgo Falla**  
Orientador

---

**Prof. Dr. Fábio Cordeiro de Lisboa, UnB/ FGA**  
Membro Convidado

---

**Prof. Dr. Paolo Gessini, UnB/ FGA**  
Membro Convidado

Brasília, DF  
2021

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por iluminar o meu caminho e ter me dado forças para concluir mais essa etapa de minha vida.

Aos meus pais, Francisco e Rosemary, por todo amor e por me proporcionarem todas as condições para que eu pudesse realizar meus estudos com tranquilidade.

Ao meu irmão Henrique, por me incentivar sempre a estudar e por ser um grande exemplo de esforço e dedicação aos estudos.

À professora Pilar, pela orientação, apoio e disposição a estar sempre ensinando e priorizando o conhecimento dos seus alunos.

Ao professor Fábio Lisboa, pelo auxílio na execução de diversas etapas deste trabalho.

À toda equipe da Embrapa Agroenergia, em especial à Simone Favaro, pela paciência, compreensão, auxílio e por todos os ensinamentos transmitidos durante o meu estágio nessa empresa.

À minha namorada Gleyce, pela compreensão, apoio, amor e companheirismo para comigo durante essa etapa e em todos esses anos juntos.

Minha gratidão a todos os meus amigos que participaram diretamente e indiretamente da minha formação acadêmica.

## RESUMO

Sabe-se que a macaúba (*Acrocomia aculeata*) é uma biomassa com potencial energético de interesse a ser explorado na obtenção de energias alternativas. Do fruto da macaúba normalmente se extrai o óleo, todavia outras frações do fruto podem ser aproveitados para a obtenção de energia utilizando o processo de gaseificação sob o conceito de biorrefinaria. Uma dessas frações é o endocarpo do fruto, ou seja, a cápsula que envolve as amêndoas. Um dos objetivos do presente estudo é avaliar a possibilidade da utilização deste resíduo na geração de energia utilizando o processo de gaseificação. Para isso, foram realizados experimentos de caracterização físico-química, sendo eles: composição elementar (CHN), poder calorífico e composição imediata. Ademais, deve-se salientar outro objetivo do trabalho: o estudo do gás advindo da gaseificação do fruto de macaúba. Nesse viés, a gaseificação do fruto inteiro foi realizada e, posteriormente, o gás coletado foi analisado por meio da Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR). Os resultados em relação a composição elementar do endocarpo do fruto foram de  $51,35 \pm 0,09\%$  de carbono,  $5,6 \pm 0,36\%$  de hidrogênio e  $<0,2\%$  de nitrogênio. Na composição imediata, obteve-se  $8,71 \pm 0,03\%$  de umidade,  $74,91 \pm 0,42\%$  de teor de voláteis,  $2,94 \pm 0,07\%$  de teor de cinzas e  $22,15 \pm 0,37$  de carbono fixo. Por fim, quanto ao poder calorífico superior, adquiriu-se o valor médio de  $19,054 \pm 0,06$  MJ/kg. Analisando estes resultados, verificou-se que os valores foram próximos comparados aos apresentados em recentes literaturas. Conclui-se, com os resultados obtidos da composição elementar e imediata, e principalmente da obtenção do poder calorífico, que o endocarpo da macaúba possui viabilidade para ser utilizada em processos termoquímicos, em especial na gaseificação. Outrossim, em relação a gaseificação do fruto inteiro de macaúba, percebe-se que o gás de síntese obtido é combustível, entretanto de baixo poder de queima. Além disso, notou-se por meio dos espectros advindos da análise FTIR, do gás oriundo da gaseificação do fruto da macaúba, a presença de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$  e vapor de água, conforme era esperado.

**Palavras-chave:** *Acrocomia aculeata*. Macaúba. Endocarpo. Gaseificação. Biorrefinaria. Poder Calorífico. FTIR. Espectroscopia.

## ABSTRACT

It is known that macauba fruit (*Acrocomia aculeata*) is a biomass with energy potential of interest to be explored in obtaining alternative energies. Oil is usually extracted from the macauba fruit, however other fractions of the fruit can be used to obtain energy using the gasification process under the concept of biorefinery. One of these fractions is the endocarp of the fruit, in other words, the capsule that wrap the almonds. One of the objectives of the present study is to evaluate the possibility of using this residue to generate energy using the gasification process. Thereunto, physical-chemical characterization experiments were done, for example: elementary composition (CHN), calorific value and immediate composition. In addition, another objective of the work should be noted: the study of the gas resulting from the gasification of the macauba fruit. In this way, the gasification of the whole fruit was carried out and, later, the gas collected was analyzed by means of Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR). The results in relation to the elemental composition of the fruit endocarp were  $51.35 \pm 0.09\%$  carbon,  $5.6 \pm 0.36\%$  hydrogen and  $<0.2\%$  nitrogen. In the immediate composition,  $8.71 \pm 0.03\%$  moisture,  $74.91 \pm 0.42\%$  volatile content,  $2.94 \pm 0.07\%$  ash content and  $22.15 \pm 0.37$  of fixed carbon were obtained. Finally, as for the higher calorific value, an average value of  $19.054 \pm 0.06$  MJ / kg was acquired. Analyzing these results, it was found that the values were close compared to those presented in recent literature. It is concluded, with the results obtained from the elementary and immediate composition, and mainly from the obtaining of the calorific power, that the endocarp of the macauba has viability to be used in thermochemical processes, especially in gasification. Furthermore, in relation to the gasification of the whole fruit of macauba fruit, it is noticed that the synthesis gas obtained is combustible, however with low burning power. In addition, the presence of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO and water vapor was observed through the FTIR analysis of the gas from the gasification of the fruit of the macauba fruit, as expected.

**Keywords:** *Acrocomia aculeata*. Macauba fruit. Endocarp. Gasification. Biorefinary. Calorific power. FTIR. Spectroscopy.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Os principais processos de conversão da biomassa em energéticos. ....	12
Figura 2. Frutos inteiros de macaúba (A), Epicarpo (B), Mesocarpo (C), Coquinho (D), Amêndoa (E) e Torta (F).....	14
Figura 3. Rotas de gaseificação em função do tipo de agente gaseificador. ....	16
Figura 4. Configuração do gaseificador de leito fixo do tipo contracorrente.....	18
Figura 5. Configuração do gaseificador de leito fixo do tipo concorrente. ....	20
Figura 6. Esquemático da metodologia experimental adotada. ....	22
Figura 7. Armazenamento dos endocarpos. ....	23
Figura 8. Moinho de facas tipo Willye.....	24
Figura 9. Balança analítica AD-6 Autobalance PerkinElmer .....	25
Figura 10. Analisador elementar CHNS/O PE2400 Series II PerkinElmer.....	26
Figura 11. Calorímetro com banho de refrigeração C-2000 (marca IKA).....	27
Figura 12. Analisador Termogravimétrico TGA-701 (marca Leco).....	28
Figura 13. Cadinhos no analisador termogravimétrico.....	29
Figura 14. Vista do conjunto montado do reator (a) e vista explodida (b).....	31
Figura 15. Gaseificador em vista lateral. ....	32
Figura 16. Rotâmetro. ....	33
Figura 17. Compressor de Ar CSL 20/200 Twister Bravo.....	33
Figura 18. Esquemático completo da bancada experimental.....	34
Figura 19. Representação esquemática do leito do reator.....	35
Figura 20. Reator em operação. ....	36
Figura 21. Teste de chama .....	37
Figura 22. Medição da temperatura.....	38
Figura 23. Gás coletado em sacola Restek 22950. ....	39
Figura 24. Célula de gás de baixo custo para análise no infravermelho.....	40
Figura 25. Célula de gás acoplado ao Espectrômetro de Infravermelho por Transformada de Fourier Thermofisher Nicolet iS10.....	41
Figura 26. Utilização de seringas para o manejo do gás nitrogênio para limpeza da célula.....	42
Figura 27. Utilização de seringas para a inserção do gás de síntese na célula. ....	42
Figura 28. Espectro representativo da macaúba.....	47
Figura 29. Espectros de infravermelho do gás de síntese.....	48

## LISTA DE QUADROS/TABELAS

Quadro 1 – Principais vantagens e desvantagens dos gaseificadores de leito fixo do tipo contracorrente.....	18
Quadro 2 – Principais vantagens e desvantagens dos gaseificadores de leito fixo do tipo concorrente .....	20
Tabela 1 – Composição Imediata .....	43
Tabela 2 – Poder Calorífico .....	44
Tabela 3 – Composição Elementar (CHN) .....	44
Tabela 4 – Comparação de Resultados.....	45
Tabela 5 – Comparação entre o endocarpo da macaúba e o <i>Eucalyptus grandis</i> .....	46
Tabela 6 – Caracterização físico-química dos resíduos do processamento da macaúba.....	46

## SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>4</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>5</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>6</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>7</b>
<b>LISTA DE QUADROS/TABELAS</b> .....	<b>8</b>
<b>SUMÁRIO</b> .....	<b>9</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>10</b>
1.1 OBJETIVO GERAL .....	10
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	10
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>11</b>
2.1 BIOMASSA .....	11
2.2 MACAÚBA .....	12
2.2.1 Endocarpo .....	15
2.3 GASEIFICAÇÃO .....	15
2.3.1 Tipos de gaseificadores .....	17
2.4 ESPECTROSCOPIA DE INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR) NA ANÁLISE DE GASES.....	21
<b>3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL</b> .....	<b>22</b>
3.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICOQUÍMICA DA BIOMASSA .....	22
3.1.1 COMPOSIÇÃO ELEMENTAR (CHN).....	24
3.1.2 PODER CALORÍFICO .....	26
3.1.3 COMPOSIÇÃO IMEDIATA (VOLÁTEIS, UMIDADE, CINZAS, CARBONO FIXO) .....	27
3.2 GASEIFICAÇÃO .....	30
3.2.1 CARACTERIZAÇÃO DO REATOR .....	30
3.2.2 DESCRIÇÃO DA CONFEÇÃO DA BANCADA EXPERIMENTAL .....	32
3.2.3 PREPARAÇÃO DO REATOR.....	34
3.2.4 PROCESSO DE GASEIFICAÇÃO .....	35
3.3 ESPECTROSCOPIA DE INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR) .....	39
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>43</b>
4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO ENDOCARPO .....	43
4.2 GASEIFICAÇÃO E FTIR DO GÁS OBTIDO .....	47
<b>5. CONCLUSÃO</b> .....	<b>48</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>50</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O consumo de energia, fundamentado basicamente na utilização de combustíveis fósseis, torna a matriz energética insegura, cara e, principalmente, bastante danosa ao meio ambiente (BRITO, 2007). Diante desta circunstância, diversos países consideraram realizar uma mudança significativa de sua matriz energética; incluindo, promovendo e intensificando a utilização de outras fontes de energia, destacando-se o uso de fontes renováveis.

Analisando especificamente a matriz energética brasileira, verifica-se que a ascensão da utilização de fontes renováveis foi expressiva nos últimos anos. De acordo com Balanço Energético Nacional – BEN (2020), nota-se que quase metade da matriz energética brasileira, cerca de 46,1%, é caracterizada pelo uso de fontes renováveis.

Em meio às fontes renováveis mais relevantes nesta nova matriz energética, deve-se destacar a biomassa lignocelulósica, que pode ser definida como toda matéria orgânica gerada por meio da fotossíntese (BARATA, 2014). A utilização de compostos celulósicos na obtenção de energia tem-se mostrado vantajosa, pois, além de ser obtida de fontes renováveis, o seu uso propicia meios de se aproveitar os resíduos gerados (RIEGEL, et al. 2008).

Nessa perspectiva, diante da crescente busca da obtenção de energias alternativas, principalmente com o emprego de biomassa vegetal, percebe-se a necessidade de se avaliar o potencial energético de frutos brasileiros, em especial a macaúba.

### 1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral da presente pesquisa é verificar a possibilidade da utilização do fruto de macaúba no contexto de geração de energia por meio da gaseificação.

### 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Foram delineados os seguintes objetivos específicos: realizar a análise físico-química do endocarpo do fruto da macaúba; efetuar a gaseificação do fruto através de um gaseificador de leito fixo contracorrente e identificar os componentes do gás

advindo da gaseificação mediante a utilização da técnica de Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR).

## **2. REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 BIOMASSA**

Do ponto de vista energético, denomina-se biomassa como todo recurso renovável, proveniente de qualquer matéria orgânica, que possa ser transformada em energia mecânica, térmica ou elétrica (ANEEL, 2008). Ou seja, a biomassa é uma fonte primária e não fóssil de energia.

A biomassa lignocelulósica é composta por uma mistura complexa de polímeros naturais de carboidratos denominados celulose, hemicelulose, além de lignina e pequenas quantidades de extrativos e cinzas, estes estão contidos na parede celular das plantas (GÓMEZ, 2002).

A parede celular dos vegetais é formada por celulose, hemicelulose e lignina. De acordo com Nakai (2014), as características mais importantes para os processos termoquímicos aplicáveis à biomassa são seus graus de polimerização, composição (especificamente da hemicelulose e lignina) e sobretudo as suas proporções.

A biomassa pode ser convertida através de diversos processos energéticos, entre eles destacam-se: a queima direta, a pirólise, a gaseificação, na síntese de combustíveis, a biodigestão, a fermentação e a conversão físico-química. A biomassa é a única fonte renovável de energia com a capacidade de fornecer combustível sólido, líquido e gasoso. (ANDRADE, 2007).

Os principais processos de conversão de energia, nos quais a biomassa é utilizada, está sucinto na Figura 1:

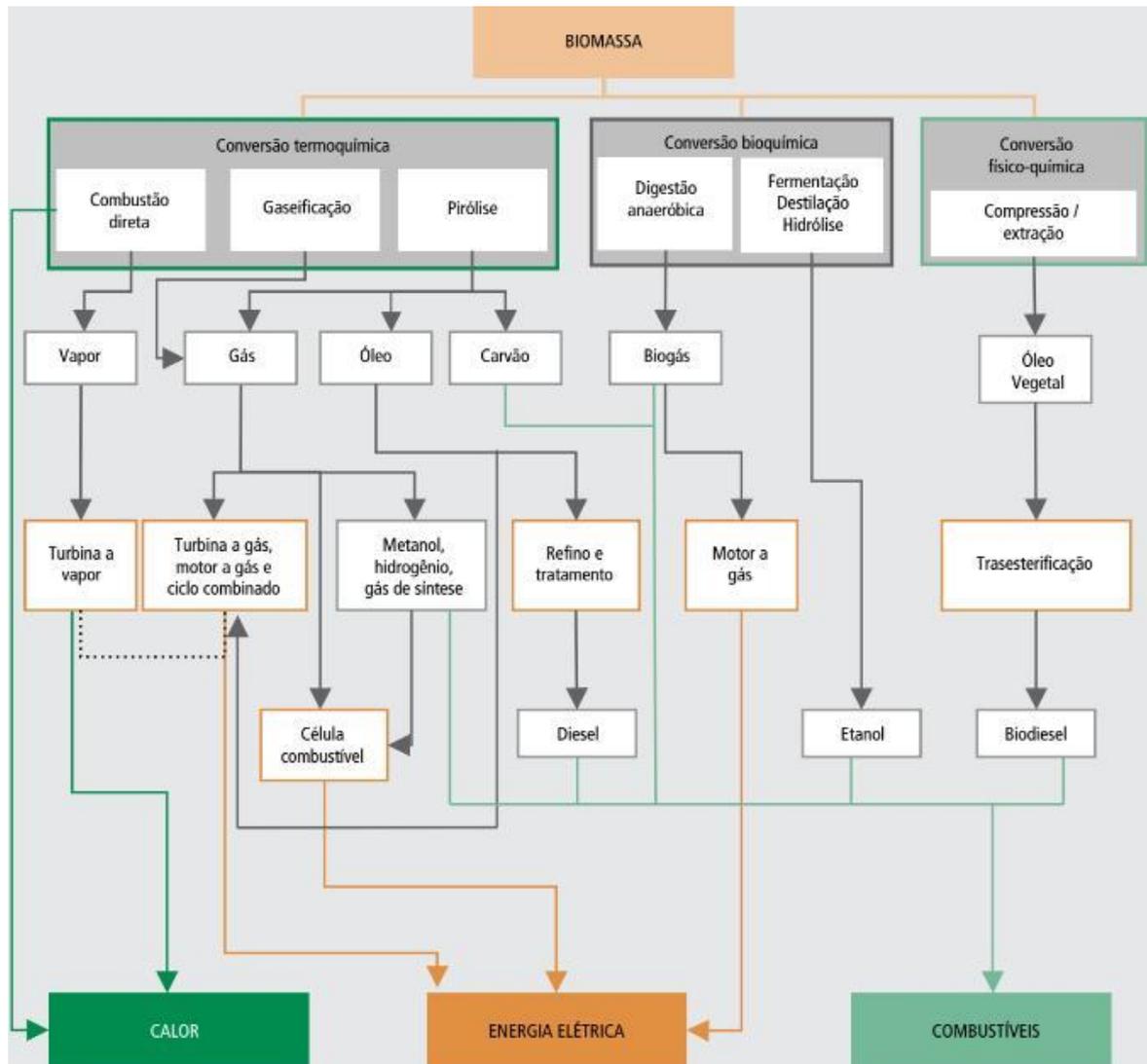


Figura 1. Os principais processos de conversão da biomassa em energéticos.  
Fonte: MME (2007)

Selecionou-se como biomassa, para este trabalho, o fruto de macaúba.

## 2.2 MACAÚBA

A macaúba (*Acrocomia aculeata*) é uma palmeira nativa do Brasil, com altura que varia entre 10 e 15 m e diâmetro entre 20 e 30 cm (REYES, 2003). Sua vasta distribuição engloba desde os Estados de São Paulo e Rio de Janeiro, passando por Minas Gerais e por todo o centro-oeste, nordeste e norte do Brasil atingindo até a América Central (AMARAL et al, 2011).

O crescimento do fruto pode variar de acordo com sua localização geográfica. Geralmente é iniciado ao final do período chuvoso, todavia, é no período de seca

que os frutos completam seu desenvolvimento, resultando na colheita entre outubro e março (MOTA et al, 2011).

A *Acrocomia aculeata* pode ser chamada de diversos nomes, de acordo com a região na qual se encontra, entre elas destacam-se: macaúba, macaíba, macaiúva, mocajá, mocujá, mucajá, bacaiúva, bocaiuva, coco-de-catarro ou coco-de-espinho, imbocaiá, umbocaiuva (Lorenzi & Matos, 2002).

A macaúba apresenta grande potencial, sendo utilizada para fins alimentícios, na indústria de cosméticos e para fins energéticos. Seu aproveitamento é integral, sendo utilizado desde o caule até a semente. Utiliza-se a madeira para a confecção de ripas e calhas de água. A partir do miolo do tronco é obtido uma farinha nutritiva. As folhas são aproveitadas como forragem e fibras têxteis. Por sua vez, o fruto é a parte cultural e econômica mais relevante da planta, podendo ser consumido na sua forma *in natura* ou empregada na produção de óleo (Lorenzi, 1992; Bhering, 2010)

Favaro et al (2018, p. 5) afirma que “a macaúba é uma palmeira nativa do Brasil com grande potencial, especialmente para a produção de óleos vegetais, além de coprodutos que podem ser destinados para biocombustíveis ou outros segmentos industriais”.

Os frutos são constituídos por cerca de 20% de casca (epicarpo), 40% de polpa (mesocarpo), 33% de casca lenhosa (endocarpo) e 7% de amêndoa.

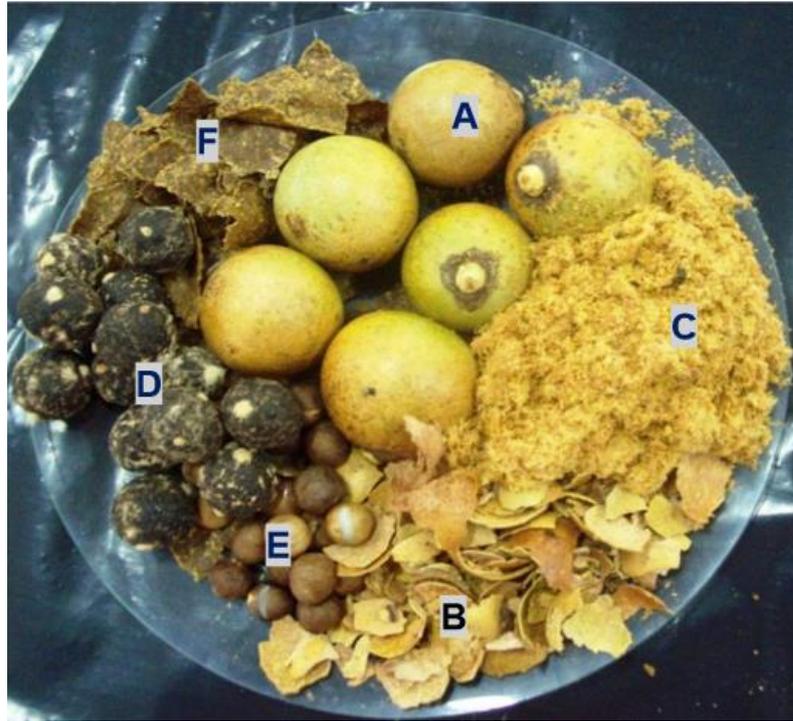


Figura 2. Frutos inteiros de macaúba (A), Epicarpo (B), Mesocarpo (C), Coquinho (D), Amêndoa (E) e Torta (F).  
Fonte: Nunes (2013)

Os teores de óleo são levemente superiores na polpa (60%) se comparado à amêndoa (55%). Da macaúba são extraídos dois tipos de óleo, sendo eles da amêndoa e da polpa. Cerca de 15% do total de óleo da planta provém da amêndoa. Devido ao seu alto teor de ácido láurico e oleico, é utilizado amplamente na indústria alimentícia, farmacêutica e na produção de cosméticos. Já o óleo extraído da polpa, constituído por ácido oleico e palmítico, tem ampla utilização na fabricação de biodiesel e boas características para o processamento industrial (BHERING, 2009).

A macaúba é muito relevante para o fortalecimento da cadeia de biocombustível e da geração de coprodutos. O uso das potencialidades dessa espécie amplia a economia e a agricultura familiar, diante da elevada procura por novas culturas e sua produção (Nobre, 2014).

Na literatura, existem alguns trabalhos referentes a caracterização físico-química deste fruto, avaliando a sua composição elementar, imediata e poder calorífico, das diversas partes da macaúba.

### 2.2.1 Endocarpo

O endocarpo do fruto é uma estrutura rígida, de 2 a 3 cm de espessura, no qual envolve e protege as amêndoas. No processamento industrial do fruto, o endocarpo é obtido através de um corte transversal, objetivando a separação do endocarpo e amêndoas.

O endocarpo das palmáceas é composto por um tecido rico em feixes vasculares, fibra e parênquima de enchimento (TENÓRIO, 1982). Esta estrutura é bastante lignificada e densa, conseqüentemente possui uma alta densidade a granel; isso aliado ao seu alto poder calorífico, qualifica-o como um resíduo de boa densidade energética (EVARISTO et al, 2016).

O endocarpo é utilizado na produção de carvão vegetal (VILAS BOAS et al., 2010). Segundo Cetec (1983), o endocarpo possui um alto poder calorífico, no qual é utilizado também diretamente em caldeiras ou ainda, como matéria-prima para a produção de coque metalúrgico. Além das utilidades relacionadas a área energética, o endocarpo é utilizado em trabalhos artesanais e substituindo a brita de concreto. (AMARAL, 2007).

### 2.3 GASEIFICAÇÃO

Segundo Gualdrón (2009), define-se a gaseificação como o processo de conversão termoquímica de um material orgânico em um combustível gasoso, por meio da oxidação parcial a elevadas temperaturas, entre 800°C e 1100°C, e à pressão atmosférica ou maiores, até 33 bars. Pode-se definir ainda como um processo de pirólise que trabalhe em elevadas temperaturas, com o objetivo do favorecimento da fase gasosa (GOSWAMI, 1986). De acordo com Warnecke (2000), a gaseificação é um processo termoquímico definido e limitado à combustão e à pirólise.

Essa oxidação térmica parcial gera como produtos um elevado volume de gases: CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CO, H<sub>2</sub> e hidrocarbonetos gasosos; e em menor proporção: carvão, cinzas e compostos condensáveis (alcatrão e óleos) (LISBOA, 2016).

O gás oriundo da gaseificação é denominado pobre devido ao baixo poder calorífico (ANDRADE, 2007). Para que ocorra a reação, pode-se utilizar ar, oxigênio

ou vapor superaquecido como agente gaseificante (LISBOA, 2016). Conforme Andrade (2007), quando se usa o ar como agente oxidante obtêm-se em torno de 4-7 MJ/Nm<sup>3</sup> e quando se utiliza oxigênio ou vapor têm-se de 10 a 18 MJ/Nm<sup>3</sup>.

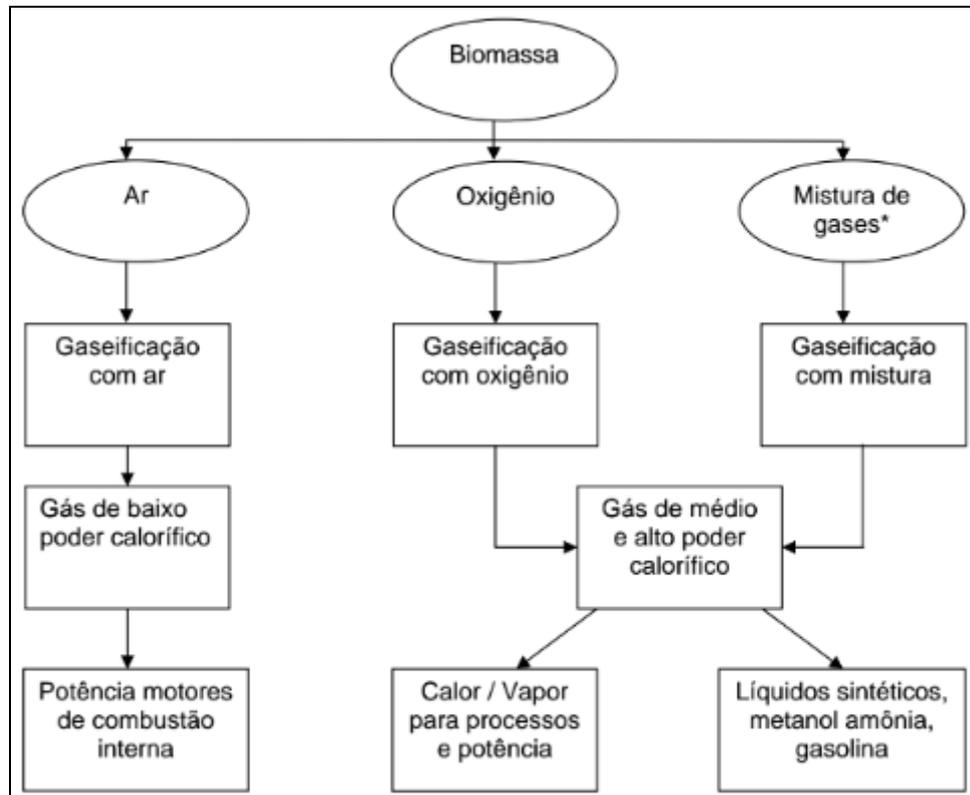


Figura 3. Rotas de gaseificação em função do tipo de agente gaseificador.  
Fonte: Cortez (2008)

O produto gasoso obtido através da gaseificação de biomassa é denominado como gás de síntese, o qual pode ser usado na geração de eletricidade por combustão direta, para a operação de células de combustíveis ou ainda para a produção de biocombustíveis e produtos químicos (ARDILA, 2015).

Para a conversão de biomassa, são utilizadas diversas configurações e tecnologias de gaseificadores. A maior parte é utilizada para produção de calor, energia elétrica a partir do gás de síntese ou produção de combustíveis líquidos, como metanol, etanol, dimetil, éteres, etc. (NAKAI, 2014).

Os principais fatores que influenciam na configuração dos gaseificadores são (NNFCC, 2009):

- A alimentação de biomassa no reator;

- A movimentação da biomassa dentro do gaseificador;
- Tipo de atmosfera utilizada. São utilizadas como oxidantes: oxigênio, ar ou vapor de água;
- O intervalo de temperatura de operação
- Fornecimento direto ou indireto de calor ao gaseificador
- Pressão de operação.

De forma genérica, os gaseificadores podem ser classificados em gaseificadores de leito fixo e de leito fluidizado, podendo ser subdivididos de acordo com o seu funcionamento.

O gás resultante da gaseificação pode ser utilizado para a geração de energia elétrica em pequena escala, sem a necessidade da utilização de um ciclo de vapor, mas utilizando o gás gerado diretamente em um motor de combustão interna ou, em perspectiva, num motor Stirling, microturbina a gás ou célula combustível. Algumas dessas aplicações podem alcançar a eficiência de centrais térmicas a carvão (SOUZA et al., 2013).

### **2.3.1 Tipos de gaseificadores**

#### **2.3.1.1 Gaseificadores de leito fixo**

Nos gaseificadores de leito fixo, a biomassa somente se move por ação da gravidade. Este tipo de gaseificador é mais utilizado para a conversão de quantidades consideravelmente pequenas de matéria (KINTO et al, 2003). O termo “leito fixo” é oriundo do fato da biomassa mover-se, dentro do reator, com altura constante (OLIVEIRA, 2008).

É o tipo de gaseificador mais antigo e mais comumente encontrado. Comparado aos gaseificadores de leito fluidizado, sua tecnologia é simples. (ANDRADE, 2007). Este tipo de gaseificador pode ser dividido em concorrentes e contracorrentes.

##### **2.3.1.1.1 Contracorrente**

A alimentação do gaseificador com a biomassa ocorre pelo topo e desce em contracorrente a entrada de ar ou oxigênio (também misturado com vapor de água

ou CO<sub>2</sub>) que se adentra pela grelha localizada na parte inferior do gaseificador (SANDRA, 2006).

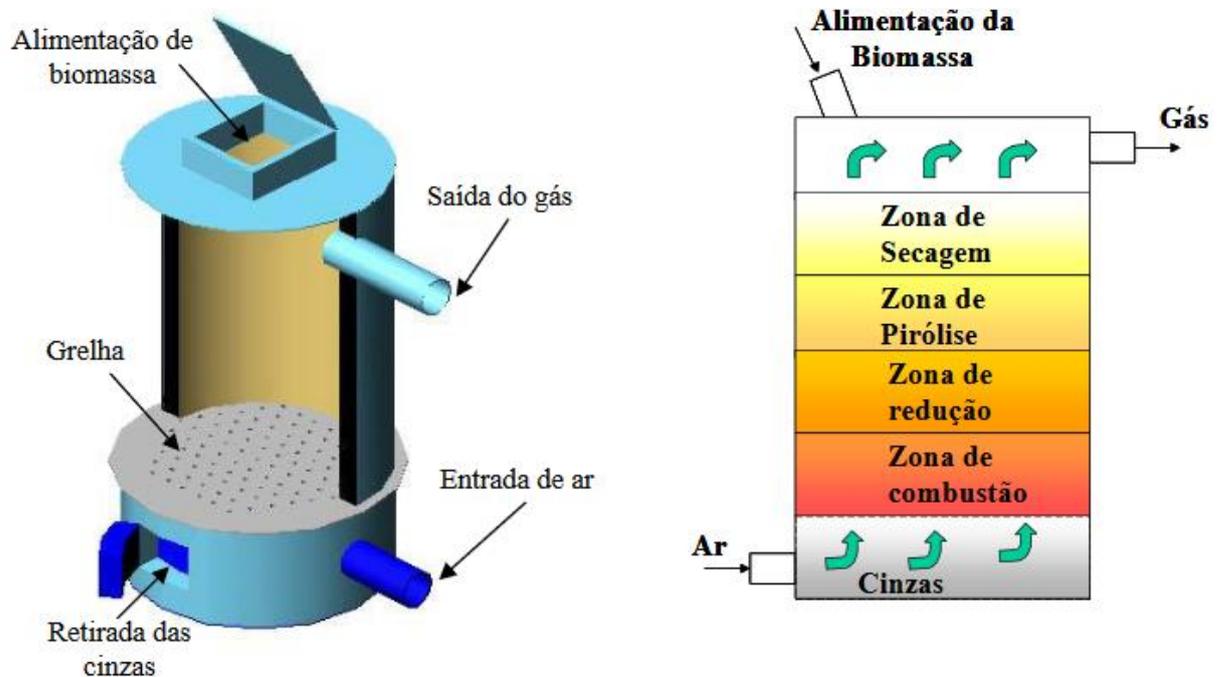


Figura 4. Configuração do gaseificador de leito fixo do tipo contracorrente.  
Fonte: Andrade, 2007.

Os gaseificadores do tipo contracorrente possuem uma alta eficiência, pois os gases oriundos da zona de combustão pré-aquecem o combustível que será utilizado. Em consequência disso, o gás produzido é bastante impuro, uma vez que o alcatrão produzido na área de pirólise não será craqueado na zona de combustão, visto que o mesmo será arrastado pelo gás produzido (ANDRADE, 2007).

As principais vantagens e desvantagens deste tipo de gaseificador podem ser observadas no quadro 1.

Quadro 1 – Principais vantagens e desvantagens dos gaseificadores de leito fixo do tipo contracorrente

<b>Tipo de gaseificador</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
<i>Leito Fixo</i>	Alta eficiência térmica.	Alto teor de alcatrão no gás produzido.
<i>Contracorrente</i>	Excelente contato entre o agente gaseificante e a	Baixa produção de CO <sub>2</sub> e H <sub>2</sub> , requerendo um

biomassa.	tratamento posterior de craqueamento do alcatrão.
Possibilidade de trabalho com biomassas de diferentes granulometrias e alta umidade.	A biomassa deve ter propriedades homogêneas.
Construção simples.	Dificuldade de controle da temperatura.

Fonte: Adaptado, pelo autor, de MOLINO et al., 2016

### 2.3.1.1.2 Concorrentes

Entre os gaseificadores de leito fixo, este é o tipo mais conhecido. O seu arranjo e funcionamento acarreta na produção de um gás relativamente limpo de alcatrão (ANDRADE, 2007). A sua construção é semelhante ao gaseificador do tipo contracorrente, entretanto, o ar e o gás fluem na mesma direção que o combustível, ou seja, para baixo (SANDRA, 2006).

A remoção dos gases produzidos é realizada pelo fundo do reator, por esse motivo, os gases e vapores formados na fase da pirólise percorrem pela região de combustão, podendo assim ser oxidados ou craqueados pelo uso de temperaturas mais altas, até mesmo o possível alcatrão presente (MIRANDA, 2014).

Por esse motivo, segundo QUAACK et al. (1999), a quantidade de alcatrão presente no gás final é mínima, procedendo em um gás mais limpo comparado ao obtido no reator de leito fixo contracorrente. Uma das desvantagens, é que o gás final pode conter cinzas.

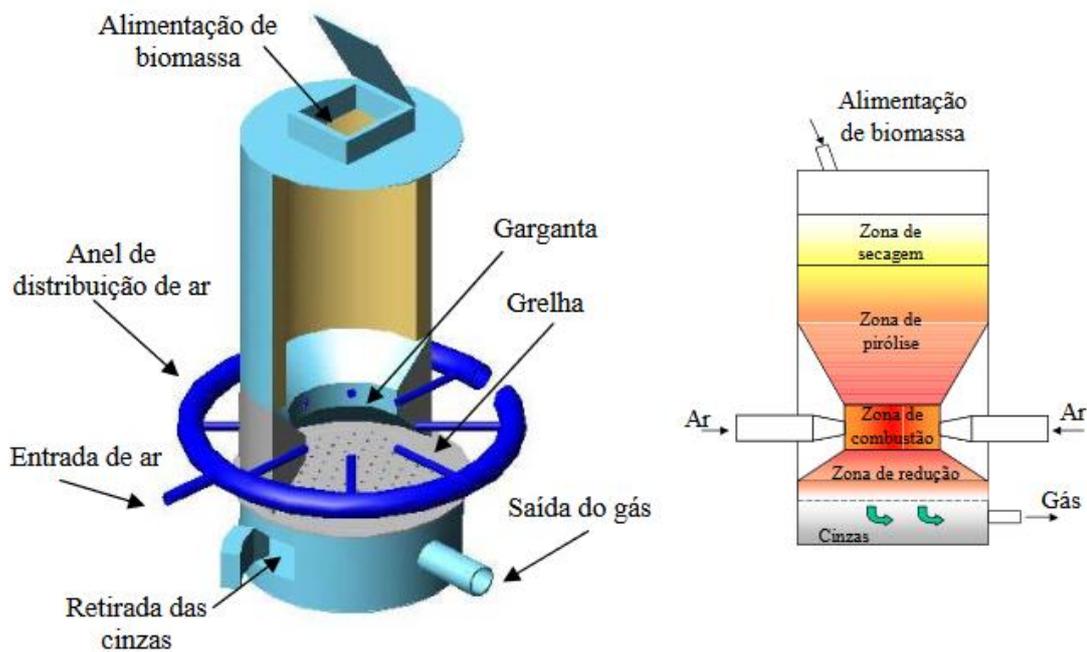


Figura 5. Configuração do gaseificador de leito fixo do tipo concorrente.  
Fonte: Andrade, 2007.

As principais vantagens e desvantagens do gaseificador de leito fixo do tipo concorrente podem ser analisadas no quadro 2.

Quadro 2 – Principais vantagens e desvantagens dos gaseificadores de leito fixo do tipo concorrente

<b>Tipo de gaseificador</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
<i>Leito Fixo Concorrente</i>	Alta conversão de carbono.	Necessidade de alimentação com biomassa com baixo teor de umidade
	Baixa produção de alcatrão	Baixo coeficiente de transferência de calor
	Arrasto limitado de cinzas e particulados	Baixa tolerância a variação na granulometria da biomassa
	Construção simples	Capacidade limitada

Fonte: Adaptado, pelo autor, de MOLINO et al., 2016

### 2.3.1.2 Gaseificadores de leito fluidizado

Este tipo de gaseificador é mais utilizado em plantas de média e grande escala, por possuir vasos de reação com tamanhos superiores aos de leito fixo. Em comparação aos reatores de leito fixo, nos gaseificadores de leito fluidizado ocorre um alto grau de mistura, ocasionando em uma alta taxa de transferência de calor e de massa (MIRANDA, 2014).

Em um leito de partículas inertes (areia, cinzas ou alumina) fluidizadas pelo fluxo ascendente de ar, as partículas do combustível são mantidas suspensas, tornando as condições favoráveis para transferência de calor e para a homogeneidade da temperatura na câmara da reação (ZANATTA, 2011).

Sánchez (2010) afirma que o no processo de gaseificação em leito fluidizado, o agente gaseificante é antecipadamente pressurizado e forçado a passar pela placa distribuidora no sentido ascendente e em quantidade suficiente para que a força de arraste do escoamento do fluido supere o peso dos sólidos do leito e promova, simultaneamente, a queima parcial do combustível. Nessas condições, a maior parte dos voláteis entrará em contato com as partículas do leito aquecido, contribuindo para uma gaseificação possivelmente completa e limpa (SÁNCHEZ, 2010).

Destaca-se como principal vantagem na utilização de gaseificadores de leito fluidizado, o fácil controle da temperatura pela variação na alimentação de ar e de combustível e a capacidade de operar com materiais friáveis e de granulometria fina sem a necessidade de serem briquetados (SÁNCHEZ, 2010).

Em contrapartida, possuem um alto teor de particulados na fase gasosa e enfrentam dificuldades em operar com altas temperaturas, ou seja, gera bons rendimentos, mas enfrenta a baixa temperatura de fusão das cinzas (WARNECKE, 2000).

## 2.4 ESPECTROSCOPIA DE INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR) NA ANÁLISE DE GASES

A espectroscopia na região do infravermelho é, na atualidade, uma das técnicas analíticas mais relevantes para a determinação da estrutura molecular de

um composto, tendo grande emprego como ferramenta na caracterização estrutural de substâncias complexas (COLATI et al., 2011).

Radiações com números de onda no intervalo de aproximadamente 12.800 a 10  $\text{cm}^{-1}$  ou comprimentos de onda entre 0,78 e 100 $\mu\text{m}$  representam a região do espectro do infravermelho (SKOOG et al, 2002). A faixa de maior relevância na análise de grupos funcionais de estruturas orgânicas situa-se entre 4000 e 400  $\text{cm}^{-1}$ .

Os padrões de absorção no espectro infravermelho em duas moléculas de estruturas diversas jamais serão exatamente iguais, pois cada tipo de ligação tem sua própria frequência natural de vibração, e também dois tipos idênticos de ligações em dois compostos diferentes estarão em dois ambientes sutilmente diferenciados (PAVIA et al., 2010).

### 3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Na figura 6, são expostas as metodologias utilizadas no trabalho.

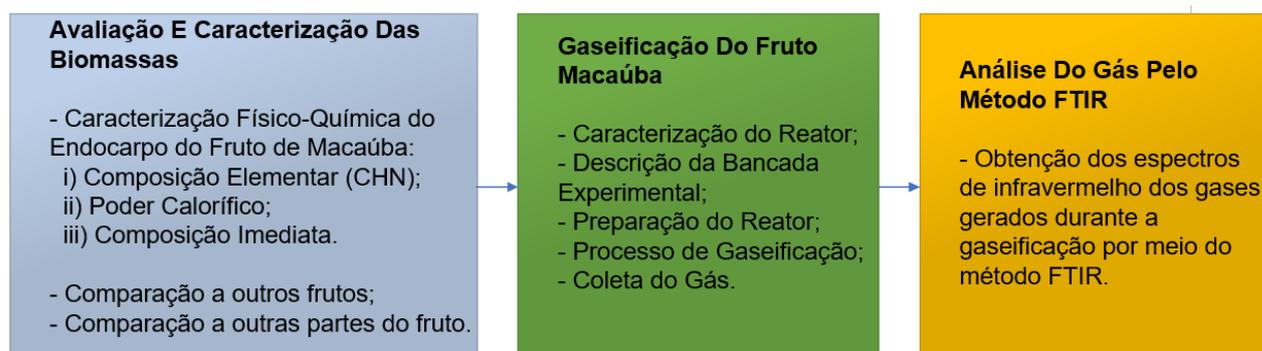


Figura 6. Esquemático da metodologia experimental adotada.

#### 3.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICOQUÍMICA DA BIOMASSA

As amostras utilizadas no processo de caracterização físico-química do endocarpo do fruto são pertencentes à Embrapa Agroenergia. A atividade está regular no Sistema Nacional de Gestão do Patrimônio Genético e do Conhecimento Tradicional Associado (SisGen) sob o número AE046F0. Através do processamento do fruto, foram obtidas quatro parcelas: casca, polpa, endocarpo e amêndoa. Os endocarpos foram recebidos e armazenados em sacos plásticos na unidade.



Figura 7. Armazenamento dos endocarpos.  
Fonte: Elaborada pelo autor.

Para a realização das análises de composição elementar, poder calorífico e composição imediata; primeiramente realizou-se a seleção de diversas amostras e posteriormente todo o material selecionado foi triturado utilizando o moinho de facas tipo Willye modelo Marcor Star FT-60 (marca Fortnox).

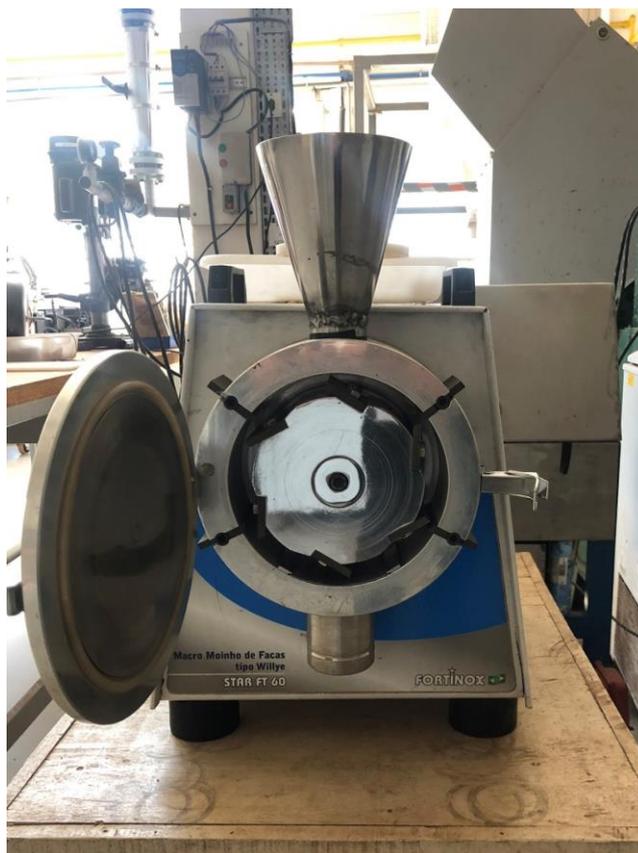


Figura 8. Moinho de facas tipo Willye  
Fonte: Elaborada pelo autor.

Após a moagem, obteve-se o material em partículas finas no qual prontamente foram reduzidas em 80 *mesh* com o auxílio de uma peneira. Posteriormente foram armazenados em frascos devidamente fechados.

### 3.1.1 COMPOSIÇÃO ELEMENTAR (CHN)

Para a determinação da composição elementar em termos de C (carbono), H (hidrogênio) e N (nitrogênio) realizou-se a análise elementar. O funcionamento desta técnica é baseado no método de Pregl-Dumas, no qual as amostras são levadas à combustão em uma atmosfera de oxigênio puro, e os gases resultantes são quantificados em um detector TCD (detector de condutividade térmica) (CENTRAL ANALÍTICA, 2015).

Como preparação para a análise, as amostras já peneiradas foram secas em estufa a 105°C durante 24 horas. Utilizando a balança analítica AD-6 Autobalance PerkinElmer, aproximadamente 2 mg de cada amostra, em triplicata, foram pesados dentro de cadinhos de estanho, no qual foram dobrados.



Figura 9. Balança analítica AD-6 Autobalance PerkinElmer  
Fonte: Elaborada pelo autor.

Em seguida, os cadinhos foram inseridos no analisador CHNS/O PE2400 Series II PerkinElmer juntamente com os dados de massa de cada amostra. Após o procedimento, os dados são gerados automaticamente no computador acoplado ao equipamento.



Figura 10. Analisador elementar CHNS/O PE2400 Series II PerkinElmer  
Fonte: Elaborada pelo autor.

### 3.1.2 PODER CALORÍFICO

Para a determinação do poder calorífico, utilizou-se o Calorímetro com banho de refrigeração C-2000 (marca IKA).

O procedimento consistiu basicamente na pesagem de aproximadamente 1g de amostra no cadinho de aço. Após isso, foi colocado no equipamento e selecionou-se o método dinâmico à 25 graus. Por fim, inseriu-se os dados de pesagem no equipamento e o processo foi iniciado. A análise foi realizada em triplicata.



Figura 11. Calorímetro com banho de refrigeração C-2000 (marca IKA)  
Fonte: Elaborada pelo autor.

### 3.1.3 COMPOSIÇÃO IMEDIATA (VOLÁTEIS, UMIDADE, CINZAS, CARBONO FIXO)

A Análise Termogravimétrica, ou TGA (Thermogravimetric Analysis), é uma técnica pelo qual realiza-se o monitoramento da perda ou da agregação de massa de uma amostra em função da temperatura (ou do tempo), em um ambiente de atmosfera controlada de nitrogênio ou ar sintético (CENTRAL ANALÍTICA, 2015).

Os cálculos realizados pelo analisador termogravimétrico LECO TGA701 são baseados nas variações de massa relativas. Com este equipamento, é possível determinar perda de massa em amostras orgânicas, inorgânicas ou sintéticas utilizando programas com temperatura e atmosfera definidas em métodos padronizados (ASTM, AOAC, etc.) ou modificados pelo usuário. Os resultados são expressos em termos de umidade total, conteúdo de voláteis, carbono fixo e teor de cinzas.



Figura 12. Analisador Termogravimétrico TGA-701 (marca Leco)  
Fonte: Elaborada pelo autor.

A determinação da umidade ocorre através da perda de massa observada a 110 °C. Por sua vez, o conteúdo de voláteis é determinado pela perda de massa observada em atmosfera inerte a 950 °C. Através da massa residual da total oxidação do material a 750 °C é determinado o teor de cinzas. Por fim, o carbono fixo é obtido através da diferença entre a massa inicial e a soma das massas determinadas. (SERI, 1988)

A seguir, é apresentado o procedimento detalhado da análise termogravimétrica:

### 3.1.3.1 Procedimento da análise termogravimétrica

Inicialmente, checou-se a pressão dos gases nos manômetros atrás do equipamento. Em seguida, o método padronizado MVA (ASTM D5142) foi selecionado na base de dados conforme as características da amostra de endocarpo a ser analisada.

- O método padronizado MVA consiste nos seguintes parâmetros:
- Umidade: 107°C; com atmosfera de N<sub>2</sub>; até a estabilidade da massa.
- Voláteis: 950°C; com atmosfera de N<sub>2</sub>; durante 40 minutos.
- Carbono fixo: 750°C; com atmosfera O<sub>2</sub>; até a estabilidade da massa.
- Cinzas: por diferença de massa inicial e final.

Todos os cadinhos vazios foram inseridos no carrossel. Prontamente a tampa do equipamento foi fechada e todos os cadinhos foram tarados automaticamente. Em seguida transferiu-se cerca de 1 grama de amostra para cada cadinho, com exceção do cadinho referência. A quantidade de amostra transferida foi acompanhada em tempo real com o auxílio do programa. Após este passo, iniciou-se o processo de análise.



Figura 13. Cadinhos no analisador termogravimétrico.  
Fonte: Elaborada pelo autor.

Após a conclusão de cada passo do método programado, ações foram solicitadas. Foi realizado a colocação das tampas dos cadinhos após o término da etapa de umidade. Posteriormente ao término da etapa de voláteis, retirou-se as tampas dos cadinhos e iniciou-se a etapa de cinzas.

Finalmente, todos os resultados foram obtidos: carbono fixo, teor de voláteis, umidade e cinzas. Por fim, o equipamento foi resfriado automaticamente.

## 3.2 GASEIFICAÇÃO

### 3.2.1 CARACTERIZAÇÃO DO REATOR

A gaseificação do fruto da macaúba foi realizada por meio de um gaseificador de leito fixo do tipo Contracorrente (*updraft*), no qual a alimentação com a biomassa ocorre na parte superior do gaseificador; enquanto o ar, que é o agente gaseificante, é introduzido na parte inferior do gaseificador. O equipamento instalado na Faculdade Gama da UnB (FGA), possui as seguintes dimensões e características:

- Altura do leito: 50 cm;
- Diâmetro do leito: 15,9 cm;
- Capacidade aproximada de armazenagem do reator: 9,92 L;
- Reator de aço inox 304
- Material da parte interna do reator: cimento refratário.

Por meio da figura 14, pode-se observar o esquemático do conjunto montado do reator e também a vista explodida, na qual nota-se cada parte separadamente: corpo do reator, flange, tampa superior, flange menor, grelha e base.

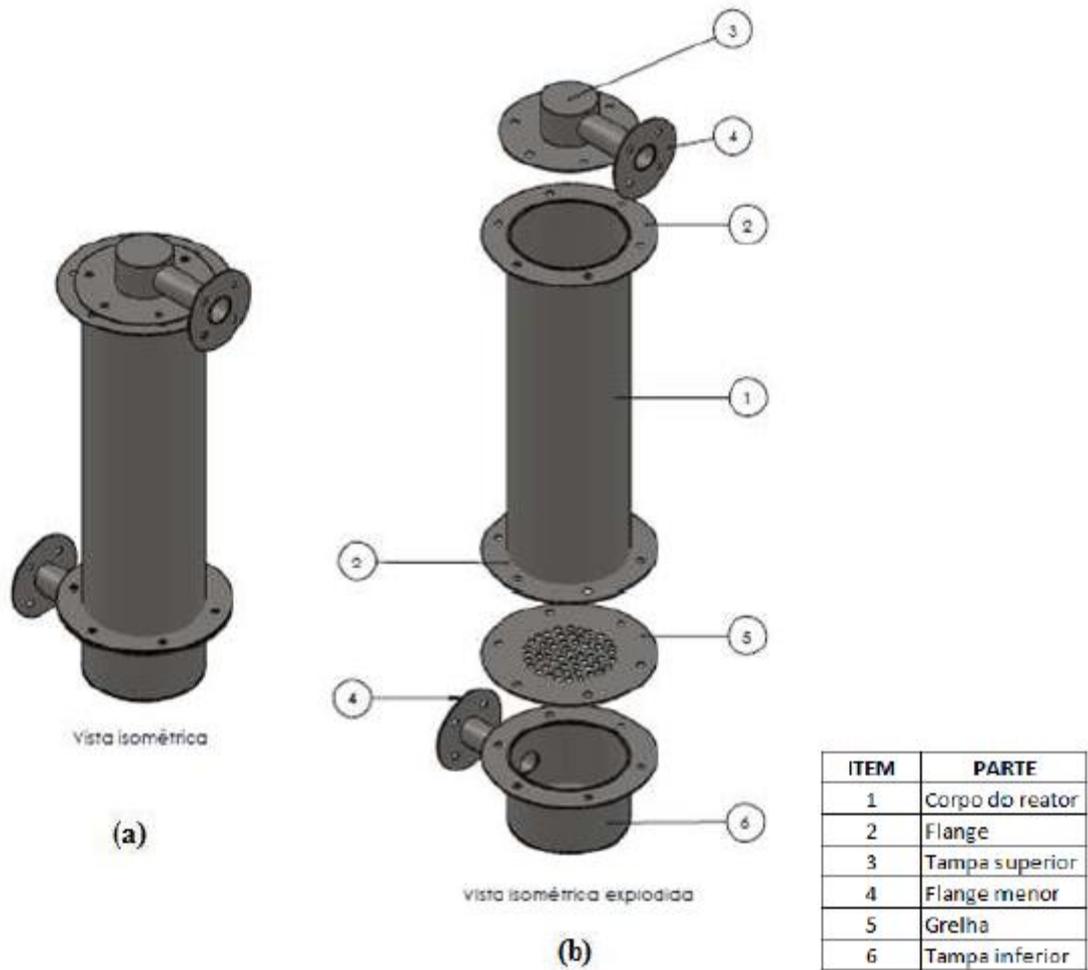


Figura 14. Vista do conjunto montado do reator (a) e vista explodida (b).  
Fonte: (Carvalhães, 2013).

Por ser construído em aço inox 304, o reator garante alta resistência à corrosão e oxidação. Ademais, uma camada de cimento refratário realiza o isolamento térmico da parte interna do corpo do reator. Para que ocorra uma vedação eficaz entre a tampa superior e o corpo do reator, utilizou-se papelão hidráulico como junta de vedação, o qual suporta serviços de alta temperatura e pressão.



Figura 15. Gaseificador em vista lateral.  
Fonte: Elaborada pelo autor.

### 3.2.2 DESCRIÇÃO DA CONFECÇÃO DA BANCADA EXPERIMENTAL

Para a realização da gaseificação, além do reator, foram utilizados outros instrumentos. Um compressor de ar CSL 20/200 Twister Bravo foi conectado em um rotâmetro de controle manual para que houvesse a regulação da vazão do agente gaseificante. A saída do rotâmetro foi interligada na parte inferior do reator.

Ademais, a mangueira da saída do gaseificador foi conectada a uma espécie de condensador, para que parte do alcatrão fosse separado do gás e para que possibilitasse a coleta do gás. Por fim, sacolas Restek 22950 foram utilizadas para a coleta do gás gerado.

Nas figuras 16 e 17, é possível observar alguns dos equipamentos avulsos utilizados para a confecção da bancada. Já na figura 18, é descrito o esquemático completo da bancada experimental.



Figura 16. Rotâmetro.  
Fonte: Elaborada pelo autor.



Figura 17. Compressor de Ar CSL 20/200 Twister Bravo.  
Fonte: Elaborada pelo autor.

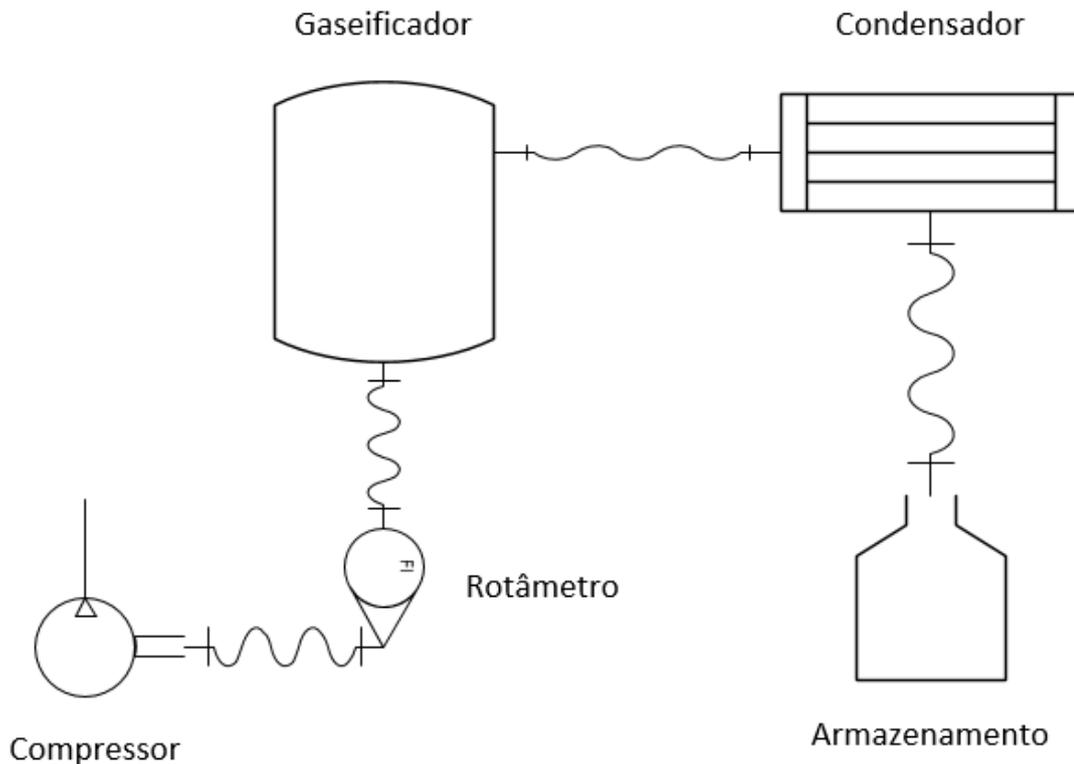


Figura 18. Esquemático completo da bancada experimental  
 Fonte: Elaborada pelo autor.

### 3.2.3 PREPARAÇÃO DO REATOR

Gaseificadores do tipo contracorrente possuem a característica de formar canais preferenciais para o gás, caso a granulometria da biomassa utilizada não seja uniforme (CARVALHAES, 2013). Com o objetivo de minimizar a criação desses veios preferenciais de passagem de ar, os quais resultariam em uma queima não uniforme no reator, utilizou-se uma camada de argila expandida no fundo do gaseificador.

Posterior a essa camada de argila expandida, adicionou-se uma camada de carvão vegetal para possibilitar a ignição do reator. Logo após a inserção do carvão vegetal, as amostras do fruto de macaúba foram adicionadas ao reator. De maneira esquemática, é mostrada na Figura 19 a composição do leito do reator.

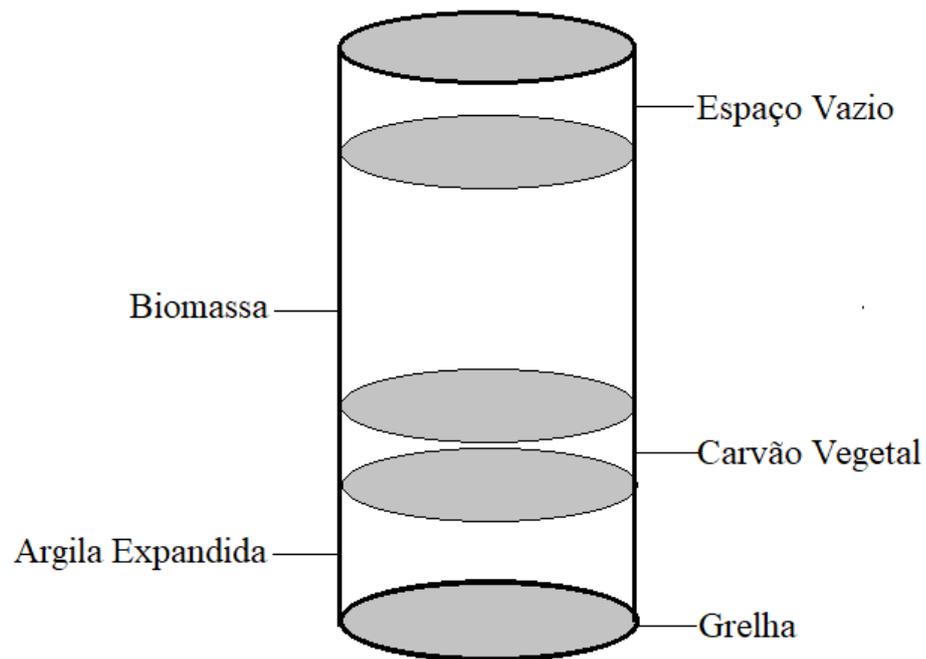


Figura 19. Representação esquemática do leito do reator.  
Fonte: Elaborada pelo autor.

### 3.2.4 PROCESSO DE GASEIFICAÇÃO

A princípio, iniciou-se a queima do carvão vegetal utilizando óleo diesel. Nesse processo, o reator opera como combustor com excesso de ar, ou seja, o agente gaseificante é introduzido na parte inferior do reator para perdurar a combustão do carvão. Na figura 20, observa-se o reator operando como combustor.



Figura 20. Reator em operação.  
Fonte: Elaborada pelo autor.

Com o carvão em combustão sustentando a liberação de energia térmica necessária para que ocorresse as reações endotérmicas da pirólise e da gaseificação e para que não influenciasse na composição do gás advindo da gaseificação, percebeu-se visualmente que o carvão estava na forma incandescente.

Ademais, mediu-se a temperatura, de aproximadamente 957 °C, através do uso de um termômetro digital infravermelho, para verificar se a temperatura estava adequada para introduzir as amostras de macaúba; observa-se isso na figura 22. Em seguida, a biomassa foi adicionada ao reator. O reator foi fechado e o controle da

entrada do agente gaseificante foi realizado através do rotômetro, para que não houvesse excesso de ar no gaseificador.

Para averiguar se o gás gerado é combustível, realizou-se o teste de chama. O teste consiste em aproximar o gás gerado a uma chama e verificar se o gás é consumido. O teste de chama pode ser observado na Figura 21. Por meio do teste, percebeu-se que o gás gerado era combustível.



Figura 21. Teste de chama  
Fonte: Elaborada pelo autor.



Figura 22. Medição da temperatura.  
Fonte: Elaborada pelo autor.

Após essa etapa, a mangueira de saída do gás do gaseificador passou por uma espécie de condensador, para que possibilitasse a coleta do gás por meio de sacola Restek 22950. O condensador consistiu em uma garrafa com água em temperatura ambiente, atuando para diminuir a temperatura do gás e para que parte do alcatrão não fosse inserido nas sacolas.

Por fim, o gás gerado foi coletado nas sacolas para as análises posteriores.



Figura 23. Gás coletado em sacola Restek 22950.  
Fonte: Elaborada pelo autor.

### 3.3 ESPECTROSCOPIA DE INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)

Com o objetivo de determinar os elementos presentes na amostra do gás obtido por meio da gaseificação, realizou-se a análise de Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) através do espectrômetro de infravermelho Thermofisher Nicolet iS10. A análise FTIR é uma espécie de espectroscopia de absorção, na qual a energia absorvida se encontra na região do infravermelho do espectro eletromagnético (FRIEDRICH, 2017). De acordo com Resende (2009), esta técnica pode ser utilizada na identificação de compostos e na investigação da composição de uma amostra de gás.

A obtenção dos espectros depende do tipo de amostra a qual será analisada, por exemplo, amostras gasosas necessitam ser depositadas em células específicas. Diante dessa situação, utilizou-se uma célula de gás de baixo custo confeccionado pelo Lauro de Oliveira Júnior, mostrada na figura 24. A célula foi construída empregando tubos e conexões em PVC, lentes de KBr (brometo de potássio) e válvulas para gás (OLIVEIRA JUNIOR, 2013).



Figura 24. Célula de gás de baixo custo para análise no infravermelho.  
Fonte: Elaborada pelo autor.

Inicialmente, as janelas da célula foram limpadadas. Em seguida, a célula foi acoplada ao equipamento, como é mostrado na figura 25. Após o encaixe, as válvulas da célula foram fechadas.

Antes de analisar o gás obtido por meio da gaseificação, é necessário a limpeza da célula utilizando Nitrogênio ( $N_2$ ). Desse modo, a primeira válvula foi aberta e injetou-se o nitrogênio na célula com o auxílio de uma seringa.

A fim de garantir a precisão da medição, o sistema foi configurado no software para a coleta de um espectro de fundo antes da análise da amostra, com o intuito de criar um perfil de base de linha das condições do sistema sem que haja uma amostra carregada no instrumento. A coleta automática de um fundo antes de cada medição de amostra é realizada para evitar efeitos negativos causados por mudanças no ambiente (AGILENT TECHNOLOGIES, 2017).



Figura 25. Célula de gás acoplado ao Espectrômetro de Infravermelho por Transformada de Fourier Thermofisher Nicolet iS10.  
Fonte: Elaborada pelo autor.

Após a coleta do espectro de fundo, para possibilitar a inserção dos gases obtidos na gaseificação no duto de entrada da célula de gás, foram utilizadas seringas, conforme é mostrado nas figuras 26 e 27.



Figura 26. Utilização de seringas para o manejo do gás nitrogênio para limpeza da célula.

Fonte: Elaborada pelo autor.



Figura 27. Utilização de seringas para a inserção do gás de síntese na célula.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Após a inserção do gás na célula, as válvulas foram fechadas e o espectro foi obtido.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO ENDOCARPO

A caracterização da biomassa é extremamente relevante. Obter dados iniciais referentes a biomassa a ser utilizada em um processo, fornece informações para que seja estabelecido um conceito de qualidade, e principalmente para detectar variabilidade em determinado tipo de matéria-prima, possibilitando a otimização do processo, entre outras vantagens (OLIVEIRA, 2013).

A composição imediata do endocarpo de macaúba, em termos de porcentagem, obtida através da análise termogravimétrica, é expressa na Tabela 1. O experimento foi realizado em triplicata.

Tabela 1 – Composição Imediata

		<b>Base Seca</b>		
<b>Amostra</b>	<b>Umidade (%)</b>	<b>Voláteis (%)</b>	<b>Cinzas (%)</b>	<b>Carbono Fixo (%)</b>
Endocarpo Macaúba	8,73	74,85	2,91	22,24
	8,68	74,52	3,02	22,46
	8,73	75,36	2,90	21,74
<b>Média ± D.P. (%)</b>	<b>8,71 ± 0,03</b>	<b>74,91 ± 0,42</b>	<b>2,94 ± 0,07</b>	<b>22,15 ± 0,37</b>

Fonte: Elaborada pelo autor.

Segundo Oliveira (1982), quanto maior o teor de umidade, menor é o poder calorífico; pode-se explicar esta ocorrência tendo em vista que uma biomassa com um alto teor de umidade necessitará de uma maior quantidade de calor para que ocorra a evaporação de sua água. O teor observado é considerado bom comparado a outras biomassas.

O teor de voláteis é um fator importante, principalmente para a ignição e nas etapas iniciais referente a combustão da biomassa (CORTEZ; LORA, 2008). O valor

obtido é relativamente alto, portanto, torna-se um ponto positivo para a biomassa em relação ao potencial energético.

Na tabela 2, verifica-se o poder calorífico obtido através do experimento no qual foi utilizado um calorímetro.

Tabela 2 – Poder Calorífico

<b>Amostra</b>	<b>PCS (MJ/Kg)</b>
Endocarpo Macaúba	19,091
	19,086
	18,984
<b>Média ± D.P. (MJ/Kg)</b>	<b>19,054 ± 0,06</b>

Fonte: Elaborada pelo autor.

Provavelmente, o alto valor de poder calorífico do endocarpo está ligado a alta concentração de carbono fixo, além do alto teor de lignina, de acordo com CETEC (1983), em torno de 7,9% (EVARISTO et al., 2016). Como dito anteriormente, deve-se salientar que o poder calorífico superior é o principal parâmetro relacionado ao potencial energético de uma biomassa; quanto maior o poder calorífico, melhor será a eficiência do processo (NAKAI, 2014).

As análises de composição elementar das amostras de biomassa de endocarpo de macaúba, realizadas em triplicatas, forneceram os seguintes dados apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Composição Elementar (CHN)

<b>Amostra</b>	<b>Base Seca</b>		
	<b>Carbono (%)</b>	<b>Hidrogênio (%)</b>	<b>Nitrogênio (%)</b>
Endocarpo Macaúba	51,42	5,79	< 0,2
	51,38	5,19	< 0,2

	51,25	5,83	< 0,2
Média ± D.P. (%)	51,35 ± 0,09	5,6 ± 0,36	< 0,2

Fonte: Elaborada pelo autor.

McKendry (2002) afirma que o potencial energético de um combustível é relacionado também a composição elementar. Quanto maior a proporção de oxigênio e hidrogênio em comparação ao carbono, o potencial energético é diminuído; explica-se isso a menor energia contida em ligações carbono (C) – oxigênio (O) e carbono (C) – hidrogênio (H), que em ligações carbono (C) – carbono (C).

Para uma melhor análise e uma averiguação da confiabilidade dos resultados obtidos, é interessante compará-los a resultados já encontrados na literatura. Observa-se isto na Tabela 4. Nota-se que os dados estão equiparados.

Tabela 4 – Comparação de Resultados

	Dados obtidos	Dados da literatura
Umidade (%)	8,71	9,32 <sup>a</sup> .
Voláteis (%)	74,91	76,37 <sup>b</sup> . 66,69 <sup>a</sup> .
Cinzas (%)	2,94	2,04 <sup>b</sup> . 1,54 <sup>a</sup> .
Carbono Fixo (%)	22,15	21,33 <sup>b</sup> . 22,45 <sup>a</sup> .
Carbono (C) (%)	51,35	49,43 <sup>a</sup>
Hidrogênio (H) (%)	5,6	6,27 <sup>a</sup>
PCS (MJ/Kg)	19,05	20,96 <sup>b</sup> . 24,26 <sup>a</sup>

Fonte: Elaborada pelo autor. <sup>a</sup>(LISBOA, 2016). <sup>b</sup>(EVARISTO, A. B. et al., 2016)

Além de observar os dados obtidos do endocarpo da macaúba, é interessante realizar um comparativo de suas características com de uma outra biomassa que é bastante estudada para ser utilizada no processo de gaseificação, o *Eucalyptus grandis*. É possível observar tal comparação na Tabela 5.

Tabela 5 – Comparação entre o endocarpo da macaúba e o *Eucalyptus grandis*.

	<b>Endocarpo da macaúba</b>	<b><i>Eucalyptus grandis</i></b>
Umidade (%)	8,71	11,52 <sup>c</sup>
Voláteis (%)	74,91	72,02 <sup>c</sup>
Cinzas (%)	2,94	4,48 <sup>c</sup>
Carbono Fixo (%)	22,15	11,98 <sup>c</sup>
Carbono (C) (%)	51,35	47,11 <sup>c</sup>
Hidrogênio (H) (%)	5,6	6,29 <sup>c</sup>
PCS (MJ/Kg)	19,05	17,61 <sup>c</sup>

Fonte: Elaborada pelo autor. <sup>c</sup>(ANJOS, A.R., 2017).

Comparando as duas biomassas, percebe-se que as principais características contidas neste estudo, relacionadas ao potencial energético, são favoráveis ao endocarpo de macaúba; destacando-se o poder calorífico superior, teor de umidade e teor de carbono fixo.

Há ainda, na literatura, trabalhos comparativos relacionados à caracterização físico-química dos resíduos do processamento do fruto de macaúba. Observa-se, pela tabela 6, que o endocarpo é o resíduo do fruto com maior quantidade de carbono fixo e poder calorífico superior.

Tabela 6 – Caracterização físico-química dos resíduos do processamento da macaúba

<b>Resíduo</b>	<b>Materiais Voláteis (%)</b>	<b>Cinzas (%)</b>	<b>Carbono Fixo(%)</b>	<b>PCS (Kcal/kg)</b>
Endocarpo	74,91	2,94	22,15	5011 <sup>a</sup>
Epicarpo	78,22 <sup>a</sup>	5,66 <sup>a</sup>	16,12 <sup>a</sup>	4989 <sup>a</sup>
Farelo da polpa	79,60 <sup>a</sup>	6,19 <sup>a</sup>	14,20 <sup>a</sup>	3835 <sup>a</sup>
Farelo da amêndoa	78,90 <sup>a</sup>	6,20 <sup>a</sup>	14,90 <sup>a</sup>	4377 <sup>a</sup>

Fonte: Elaborada pelo autor. <sup>a</sup>(EVARISTO, A. B. et al., 2016)

Utilizando técnica FTIR e acessório DRIFT (Refletância Difusa) para análises de amostras sólidas, foi adquirido o espectro representativo da macaúba (figura 28). Foram observadas bandas características dos grupos funcionais (O-H) na faixa de  $3600-3000\text{ cm}^{-1}$ , bandas correspondentes a ligação C-H nas frequências de  $2924\text{ cm}^{-1}$ ,  $2841\text{ cm}^{-1}$ ,  $1450\text{ cm}^{-1}$  e  $720\text{ cm}^{-1}$ . A ligação C=O corresponde a uma banda em  $1716\text{ cm}^{-1}$ , e as bandas correspondentes a ligação C-O-C aparecem nas frequências de  $1143\text{ cm}^{-1}$  e  $1105\text{ cm}^{-1}$ .

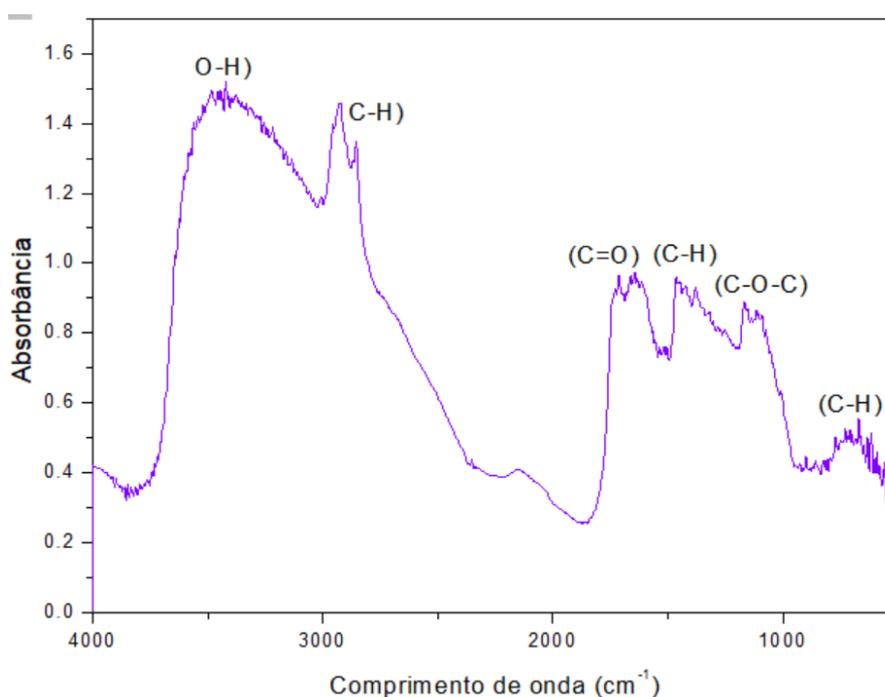


Figura 28. Espectro representativo da macaúba.  
Fonte: Elaborada pelo autor.

#### 4.2 GASEIFICAÇÃO E FTIR DO GÁS OBTIDO

Em relação à gaseificação, por meio do teste de chama, percebe-se que o gás obtido é combustível. Diante disso, após a coleta, realizou-se a análise do gás de síntese por meio da Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) para identificar os componentes desse gás.

Nesse contexto, obteve-se o espectro apresentado na figura 29. Assim, pode-se observar a banda correspondente a presença de vapor de água na região de  $3750-3500\text{ cm}^{-1}$ . As bandas correspondentes a presença de metano ( $\text{CH}_4$ ) foram observadas nas regiões de aproximadamente  $3100\text{ cm}^{-1}$ ,  $1306\text{ cm}^{-1}$  e  $720\text{ cm}^{-1}$ . A

banda correspondente ao  $\text{CO}_2$  foi identificada na frequência de  $2300 \text{ cm}^{-1}$ . Além disto, presencia-se  $\text{CO}$  na região de  $2100 \text{ cm}^{-1} - 2200 \text{ cm}^{-1}$  e na frequência de aproximadamente  $980 \text{ cm}^{-1}$ .

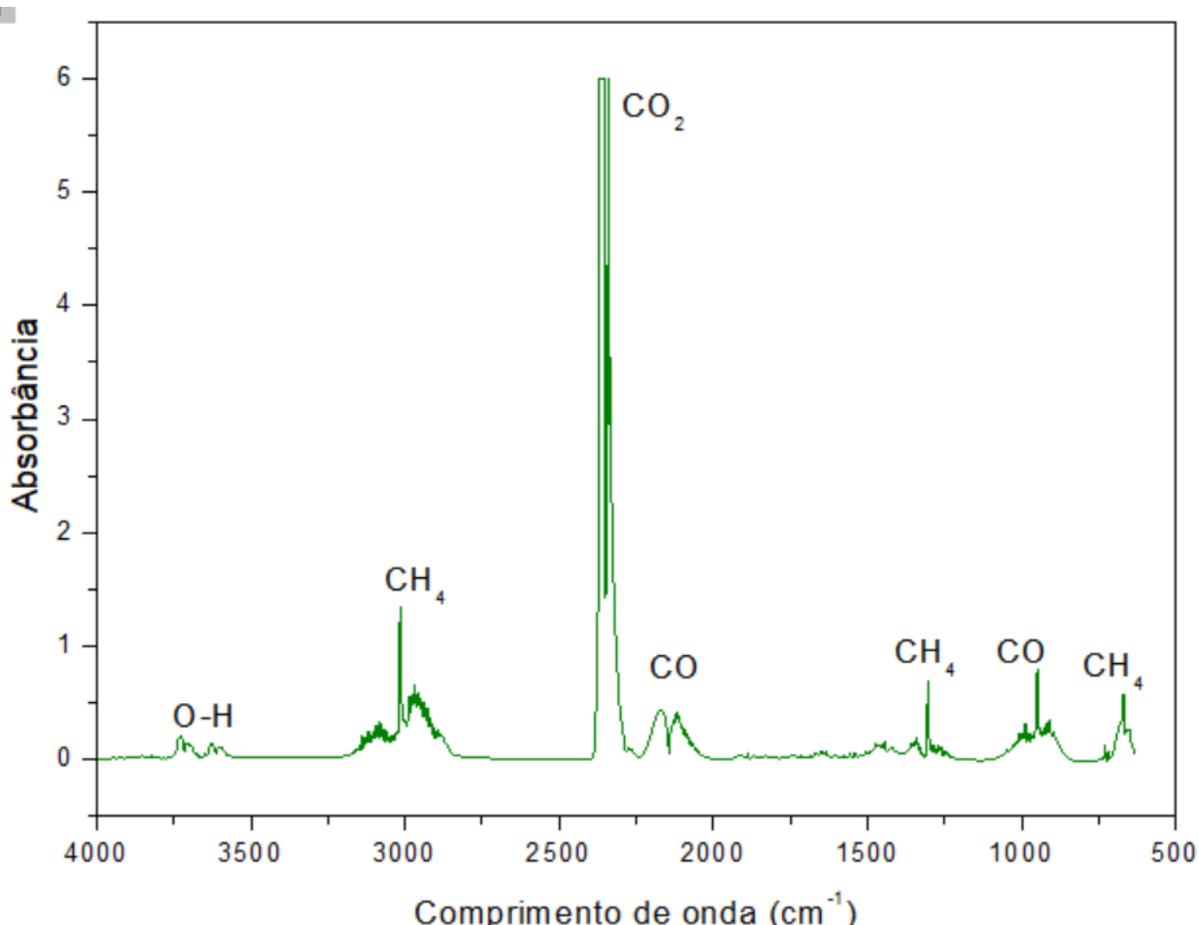


Figura 29. Espectros de infravermelho do gás de síntese.  
Fonte: Elaborada pelo autor.

## 5. CONCLUSÃO

A partir dos experimentos realizados neste trabalho, observa-se que os resultados foram excelentes comparando-os a outros estudos elaborados com o mesmo tipo de biomassa.

Constata-se que o endocarpo, resíduo do processamento do fruto de macaúba, possui viabilidade para ser utilizada no processo de gaseificação e tem um grande potencial na geração de energia, principalmente por possuir bom poder calorífico, alto teor de carbono fixo e baixo teor de umidade; podendo ser comparado a outras biomassas já utilizadas neste tipo de processo.

Ademais, deve-se destacar que a utilização do fruto inteiro para a gaseificação não é a melhor opção, pois o óleo obtido da polpa e das amêndoas do fruto possui um alto valor agregado.

Além disso, salienta-se que o processo de gaseificação resultou em um gás combustível, entretanto de baixo poder de queima; percebe-se isso observando a maneira como a chama é consumida no teste de chama.

Sobre a análise de Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR), nota-se, por meio dos espectros, a presença de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$  e vapor de água no gás oriundo da gaseificação do fruto da macaúba. Todavia, enfatiza-se que, por meio da gaseificação, o produto gasoso gerado também possui  $\text{H}_2$ , porém não é possível visualizá-los por meio deste tipo de estudo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3. ed. – Brasília. Aneel, 2008.

ANDRADE, R. V., **Gaseificação de Biomassa: Uma Análise Teórica e Experimental**, Itajubá, 205 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, 2007.

ARDILA, Yurany Camacho. **Gaseificação da biomassa para a produção de gás de síntese e posterior fermentação para bioetanol: modelagem e simulação do processo**. Campinas, SP. 2015.

BARATA, Diego Kretti Drummond. **Determinação da composição dos gases combustíveis resultantes do processo de gaseificação de biomassa em reator de leito fluidizado circulante utilizando a teoria de minimização da energia livre de Gibbs**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2014.

BHERING et. al., L. L. **Mapeamento de maciços naturais de ocorrência de macaúba (*Acrocomia aculeata*) visando à exploração sustentável**. Embrapa Agroenergia. IV Congresso Brasileiro de Mamona e I Simpósio Internacional de Oleaginosas Energéticas, João Pessoa, PB – 2010.

BHERING, L. **Macaúba: matéria-prima nativa com potencial para a produção de biodiesel**. Embrapa Agroenergia (CNPAE), 2009.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia (MME). **Balanco energético nacional 2020 – ano base 2019: relatório síntese**. Brasília, 2018. Disponível em: <[https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-521/Relato%CC%81rio%20Si%CC%81ntese%20BEN%202020-ab%202019\\_Final.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-521/Relato%CC%81rio%20Si%CC%81ntese%20BEN%202020-ab%202019_Final.pdf)>. Acesso em: 30 dez. 2020.

BRITO, José Otávio. **O uso energético da madeira**. Estudos avançados, v. 21, n. 59, p. 185-193, 2007. CETEC – CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. **Produção de combustíveis líquidos a partir de óleos vegetais: estudo das oleaginosas nativas de Minas Gerais**. Belo Horizonte – MG, 1983.

CARVALHAES, V. (2013). **Análise do Potencial Energético de Resíduo Sólido Urbano para Conversão em Processos Termoquímicos de Gaseificação**. **Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas**, Publicação ENM.DM–216A/2014, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 117p.

CICONINI, C., FAVARO, S. P., SOUZA, C. F. T., MIYAHIRA, M. A. M., CORRÊA, A., PLEIN, G. S., SOUZA, J. L. C., SANTOS, G. P. **Óleo da polpa de macaúba: variabilidade das características físico-químicas em plantas do Mato Grosso do Sul**. In: IV Congresso Brasileiro de Mamona e I Simpósio Internacional de Oleaginosas Energéticas. João Pessoa – PB, 2010.

CICONINI, G. **Caracterização de frutos e óleo de polpa de macaúba dos biomas Cerrado e Pantanal do estado de Mato Grosso do Sul, Brasil**. Dissertação (Mestrado em Biotecnologia). Universidade Católica Dom Bosco, 128p., 2012.

COLATI, Keroly Alaíde Pascoal et al. **Construção de uma célula de gás de baixo custo para análise no infravermelho**. Quím. Nova, São Paulo, v. 34, n. 5, p. 864-867, 2011. Available from <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-40422011000500023&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422011000500023&lng=en&nrm=iso)>. access on 25 Nov. 2020. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-40422011000500023>.

CORTEZ, L. **Biomassa para energia**. [S.l.]: Unicamp, 2008.

DOS ANJOS, Albert Reis. **Obtenção de gases combustíveis via transformação termoquímica de *Eucalyptus grandis* em reator de leito fluidizado**. Dissertação de Mestrado. UnB. Brasília, 2017.

EVARISTO, A. B., et al. **Potencial energético dos resíduos do fruto da macaúba e sua utilização na produção de carvão vegetal**. Ciência Florestal, Santa Maria, v. 26, n. 2, p.571-577, 2016.

FRIEDRICH, Leandro. **Gaseificação de resíduos agroindustriais para geração de gás de síntese e aumento do poder calorífico em função da glicerina**. 2017. 77 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia na Agricultura) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2017.

GOMEZ, Edgardo Olivares. **Estudo da pirólise rápida de capim elefante em leito fluidizado borbulhante mediante caracterização dos finos de carvão**. 369p. Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas, SP, 2002.

GOSWAMI, D. Y. **Alternative Energy in Agriculture**. Volume II. CRC Press, p. 83-102. 1986.

GUALDRÓN, M. A. M., **Projeto e Avaliação Computacional do Desempenho de um Gaseificador de Leito Fluidizado Circulante para Obtenção de Gás de Síntese a partir de Bagaço de Cana de Açúcar**, Itajubá, 144p. Dissertação (Mestrado em Conversão de Energia) - Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, 2009.

INSTITUTO DE QUÍMICA – USP. **Centro Analítico de Instrumentação da Universidade de São Paulo**. Disponível em: <[http://bastoslab.com/v2/wp-content/uploads/2015/02/ca\\_iqusp.pdf](http://bastoslab.com/v2/wp-content/uploads/2015/02/ca_iqusp.pdf)> Acesso em: 12/09/2019.

KINTO, O. S.; GRIMONI, J. A. B.; GALVÃO, L. C. R.; IDAETA, M. E. M. **Energia da gaseificação de biomassa, um recurso não convencional para o desenvolvimento limpo**. Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission – CLAGTEE. São Pedro, 2003

KLAUTAU, J. V. P. **Análise Experimental de uma Fornalha a lenha de Fluxo Concorrente Para Secagem de Grãos**. Dissertação (mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) PPGERHA, UFPR. Curitiba, 2008.

LISBOA, F. C. D. **Carbonização e gaseificação de resíduos da macaúba, tucumã e cupuaçu para geração de eletricidade**. Tese de Doutorado em Ciências Mecânicas, 2016. Programa de pós-graduação em Ciências Mecânicas, Universidade de Brasília UnB, Brasília DF, 120p. 2016.

MCKENDRY, P. **Energy production from biomass (part 1): overview of biomass**. Bioresource Technology. Volume 83, Número 1, maio 2002, p. 37-46, 2002

MIRANDA, GP. **Modelagem e Simulação de Reatores De Leito Fluidizado Para Gaseificação Da Biomassa**. Diss. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

MOLINO, A., CHIANESE, S. & MUSMARRA, D. **Biomass Gasification Technology: The State of the Art Overview**. Journal of Energy Chemistry, v. 25, n. 1, p. 10-25, 2016.

NAKAI, D. K. **Avaliação do Potencial Energético de *Eucalyptus spp.* em Gaseificador do Tipo Contracorrente**. Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 73p. 2014.

NOBRE, Danúbia Aparecida Costa et al. **Macaúba: palmeira de extração sustentável para biocombustível**. In: Colloquium Agrariae. 2014.

NUNES, Ângela Alves. **Óleo da polpa de macaúba (*Acrocomia aculeata* (Jacq) Lood. ex Mart) com alta qualidade: processo de refino e termoestabilidade**. Dissertação (mestrado em biotecnologia) – Universidade Católica Dom Bosco, Campo Grande, 2013.

OLIVEIRA, Patrícia Abrão. **Caracterizar a Biomassa é fundamental para valorizá-la**. 2013. Disponível em: < [http://www.infobibos.com/Artigos/2013\\_1/biomassa/index.htm](http://www.infobibos.com/Artigos/2013_1/biomassa/index.htm) >. Acesso em: 12/09/2019.

OLIVEIRA, Eron Sardinha. **Gaseificação da Macaúba**. Dissertação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos da Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia – UESB. Itapetinga, 2008

OLIVEIRA JÚNIOR, Lauro de. **Análise dos efeitos da injeção de água na performance e característica de emissões em motores diesel de injeção direta utilizando misturas diesel-biodiesel**. 2013. xi, 49 f., il. Monografia (Bacharelado em Engenharia Mecânica) — Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

PAVIA, D. L.; LAMPMAN, G. M.; KRIZ, G. S.; VYVYAN, J. R.. **Introdução à Espectroscopia**. Tradução da 4ª edição norte-americana. Cengage Learning, 2010.

QUAAK, P., KNOEF, H., STASSEN, H., **Energy from biomass – A review of combustion and gasification technologies**. Washington,DC, World Bank Technical Paper, 1999.

RESENDE, R.S. **Utilização da Espectroscopia como Método de Análise de Materiais – Prospecção de Biodisel**. Ji-Paraná, 2009, Monografia – Universidade Federal de Rondônia.

RIEGEL, Izabel et al. **Análise termogravimétrica da pirólise da acácia-negra (*Acacia mearnsii* de Wild.) cultivada no Rio Grande do Sul, Brasil**. Revista *Árvore*, v. 32, n. 3, p. 533-543, 2008.

SÁNCHEZ, C. G. **Tecnologia da Gaseificação de Biomassa**. Campinas, SP: Átomo, 2010.

SANTOS, Sandra Maria Apolinario dos; GOLDEMBERG, Jose. **Geração de eletricidade em comunidades isoladas na Região Amazônica com a utilização de gaseificadores de biomassa**. 2006. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. Disponível em: < <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/86/86131/tde-22102012-181413/> >

SOLAR ENERGY RESEARCH INSTITUTE (SERI). **Handbook of biomass downdraft gasifier engine systems**. Estados Unidos, 1988. Disponível em: <<http://www.nrel.gov/docs/legosti/old/3022.pdf>>. Acessado em: 08 dez. 2020.

SKOOG, D.A.; HOLLER, F.J.; NIEMAN, T.A. **Princípios de Análise Instrumental**. 5ª edição. Porto Alegre: Bookman, 2002.

SOUZA, S. N. M. D. et al. **Potencial de geração de eletricidade com gaseificação do bagaço e resíduos da colheita de cana de açúcar no estado do Paraná**. *Acta Iguazu, Cascavel*, v. 2, n. 3, p. 1-7, 2013. ISSN 2316-4093. Disponível em: <[erevista.unioeste.br/index.php/actaiguazu/article/download/8559/6312](http://revista.unioeste.br/index.php/actaiguazu/article/download/8559/6312)>. Acesso em: 10/08/2019

TENÓRIO, E.C. **O babaçu e coqueiros assemelhados em Minas Gerais**. Belo Horizonte, 1982, 216p.

WARNECKE, R. **Gasification of biomass: comparison of fixed bed and fluidized bed gasifier**, *Biomass and Energy*, vol. 18, p. 489-497, 2000.

ZANATTA, F. L. **Desenvolvimento e Avaliação de um gaseificador de biomassa e estudo do potencial de produção de biogás com resíduos agrícolas e da avicultura**. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, p. 98. 2011.