



UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO – UFMA  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA – CCET  
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA – CCEM

Luciano dos Santos Oliveira

**INVESTIGAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS E TÉRMICAS DO  
CAROÇO DE AÇAÍ *EUTERPE OLERACEA* PARA UTILIZAÇÃO NA GERAÇÃO DE  
BIOENERGIA**

SÃO LUÍS – MA

2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO – UFMA  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA – CCET  
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA – CCEM

**Discente:** Luciano dos Santos Oliveira

**INVESTIGAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS E TÉRMICAS DO  
CAROÇO DE AÇAÍ *EUTERPE OLERACEA* PARA UTILIZAÇÃO NA GERAÇÃO DE  
BIOENERGIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Coordenação de Curso de Engenharia Mecânica da  
Universidade Federal do Maranhão para obtenção do  
título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Glauber Cruz.

SÃO LUÍS – MA

2021

## RESUMO

A dependência dos combustíveis fósseis em escala global e o alto nível de emissão dos gases de efeito estufa aumentaram consideravelmente e, para mitigar essa situação, várias tentativas são realizadas para identificar novas e promissoras fontes alternativas de energia, que apresentem considerável custo-eficácia. Nesse sentido o comportamento térmico dos caroços de açaí foi estudado sob atmosfera oxidante (ar sintético - combustão) por análise térmica (curvas TG/DTG) para a granulometria  $\leq 300 \mu\text{m}$ . As propriedades físico-químicas dos caroços de açaí foram avaliadas por análises elementar (AE), imediata (AI) e calorimétrica (PCS), microscopia eletrônica de varredura (MEV), difração de Raios-X (DRX), espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) e emissão óptica por plasma acoplado indutivamente (ICP-OES). Verificou-se que os caroços de açaí apresentaram teores de carbono (46,72%), hidrogênio (5,18%) e oxigênio (47,42%) como elementos majoritários e um poder calorífico superior (PCS) da ordem de  $19,8 \text{ MJ kg}^{-1}$ . Nitrogênio (0,68%) e chumbo ( $3 \text{ mg kg}^{-1}$ ) foram encontrados como elementos traços. Elementos altamente poluentes como enxofre, cádmio e arsênio não foram detectados nas amostras. A degradação térmica das amostras ocorreu em três estágios: 25-150°, 180-340° e 350-540 °C, correspondendo à decomposição da umidade, celulose e hemicelulose (holocelulose) simultaneamente, e lignina residual, respectivamente. O emprego dos resíduos de caroços de açaí por meio do reaproveitamento térmico com fins bioenergéticos apresenta grandes vantagens, como baixo teor de umidade, a não liberação de elementos tóxicos para o meio ambiente e elevado poder calorífico superior, além de ser atrativo do ponto de vista socioambiental, reduzindo o descarte em locais inapropriados, agregando um valor considerável aos resíduos e ainda protegendo o meio ambiente.

**PALAVRAS-CHAVE:** análise térmica, bioenergia, caroços de açaí, caracterização de biomassa, valor agregado.

## ABSTRACT

Dependence on fossil fuels on a global scale and the high level of greenhouse gases emissions have increased considerably and, to mitigate this situation, several attempts are performed to identify new and promising alternative sources of energy, that present a considerable cost-effectiveness. The thermal behavior of the açai seeds was studied under oxidizing atmosphere (synthetic air - combustion) by thermal analysis (TG/DTG curves) for the granulometry  $\leq 300$   $\mu\text{m}$ . Physicochemical properties from açai seeds were evaluated by ultimate, proximate and calorimetric analyzes, scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction (XRD), Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), and inductively coupled plasma optical emission spectroscopy (ICP-OES). It was noted that the açai seeds presented carbon (46.72%), hydrogen (5.18%), and oxygen (47.42%) contents as majority elements and a higher heating value (HHV) of the order of  $19.8 \text{ MJ kg}^{-1}$ . Nitrogen (0.68%) and lead ( $3 \text{ mg kg}^{-1}$ ) were found as trace elements. However, highly polluting elements such as sulfur, cadmium and arsenic were not detected in the samples. Thermal degradation occurred in three stages:  $25\text{-}150^\circ$ ,  $180\text{-}340^\circ$  and  $350\text{-}540^\circ \text{C}$ , corresponding to the decomposition of moisture, cellulose and hemicellulose (holocellulose) simultaneously, and residual lignin, respectively. The utilization of açai seeds residues by means of thermoconversion process for bioenergetic purposes present great advantages, such as low moisture content, non-release of toxic elements to the environment and high heating value, in addition to being an attractive socioenvironmental, reducing disposal in inappropriate places, adding considerable value to waste and still protecting the environment.

**KEYWORDS:** thermal analysis, bioenergy, açai seeds, biomass characterization, added value.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>9</b>
2.1	Objetivo Geral .....	9
2.2	Objetivos Específicos.....	9
<b>3</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>10</b>
3.1	Biomassa.....	10
3.2	Caroço de açaí <i>Euterpe oleracea</i> .....	11
3.3	Processos de conversão termoquímica .....	12
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>14</b>
4.1	Origem e preparação das amostras .....	14
4.2	Procedimentos experimentais.....	15
4.2.1	<i>Análise Elementar (AE)</i> .....	15
4.2.2	<i>Quantificação de metais (ICP-OES)</i> .....	16
4.2.3	<i>Análise Imediata (AI)</i> .....	16
4.2.4	<i>Análise Calorimétrica (PCS/PCI)</i> .....	16
4.2.5	<i>Difração de Raios-X (DRX)</i> .....	16
4.2.6	<i>Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)</i> .....	17
4.2.7	<i>Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)</i> .....	17
4.2.8	<i>Análise Termogravimétrica (TG/DTG)</i> .....	18
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>19</b>
5.1	Análise Elementar (AE), imediata (AI) e calorimétrica (PCS/PCI) .....	19
5.2	Quantificação de Metais (ICP-OES) .....	22
5.3	Difração de Raios-X .....	23
5.4	Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR).....	24
5.5	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	25
5.6	Análise Termogravimétrica (TG/DTG) .....	26

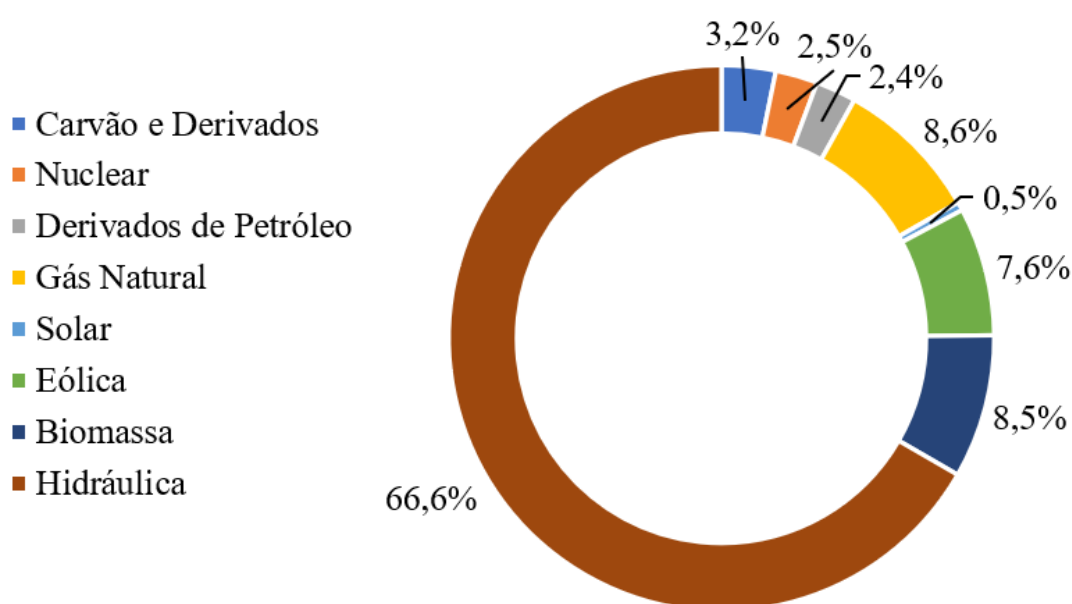
<b>6 CONCLUSÃO.....</b>	<b>29</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>30</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O aumento da demanda energética mundial torna-se cada vez mais expressiva e, no contexto atual, para manter a estrutura de bens e serviços, o petróleo ainda é indispensável por conta do alto valor energético do mesmo (DOMINGOS *et al.*, 2012). No entanto, a reserva limitada de petróleo por ser um recurso não renovável e o preço instável, além das elevadas emissões de gases nocivos ao meio ambiente e a intensificação das preocupações acerca do efeito estufa mostram a necessidade de buscar novas fontes alternativas para a geração de energia sem que haja agressão ao meio ambiente (SOUTO *et al.*, 2021; FIGUEIREDO *et al.*, 2012). O aumento da oferta de energia é um dos principais obstáculos a ser superado frente à crescente demanda por bens e/ou serviços que a utilizam, sendo necessário o emprego de novas fontes energéticas que estejam alinhadas com o conceito de renovabilidade e sustentabilidade (ALIOTTE, 2020).

Energia solar, eólica e biomassa são alguns tipos de fontes renováveis, sendo a biomassa uma das mais importantes atualmente no Brasil, devido ao enorme potencial de aproveitamento desta para a matriz energética nacional (COSTA, 2018; FIGUEIREDO *et al.*, 2012). Segundo o Balanço Energético Nacional (BEN) realizado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2019), a geração de energia elétrica utilizando biomassa ainda representa apenas 8,5% da matriz elétrica brasileira (Figura 1).

**Figura 1** - Matriz Elétrica Brasileira



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2019)

Na região Norte e em parte da região Centro-Oeste, locais com predominância da Floresta Amazônica, a rede elétrica mediante redes de transmissão torna-se altamente impraticável devido ao difícil acesso provocado por alguns obstáculos naturais como rios, lagos, regiões alagadas e floresta muito densa (SOUZA *et al.*, 2015). Sem o fornecimento de energia elétrica, utiliza-se de termoelétricas de pequeno porte que normalmente usam combustíveis fósseis (principalmente diesel), o que eleva o preço da produção de energia, além de serem um agente poluente (SANTOS, 2011). A esse processo de geração de energia local por meio de grupos geradores, os quais são alimentados por combustíveis não-renováveis, por exemplo, o óleo diesel denomina-se de sistemas isolados (SOUZA *et al.*, 2015).

Portanto, a procura por novas matérias-primas para produção de biocombustíveis se torna crescente e, dentre as fontes naturais, os resíduos agrícolas e florestais são destacados pela abundância e disponibilidade (COSTA, 2018). A utilização de biomassa nessas regiões diminuirá a dependência dos combustíveis fósseis, tendo como fatores positivos não serem poluentes quando comparadas ao diesel e reduzirem a dependência da geração centralizada, a qual é fornecida pelas companhias concessionárias e/ou retransmissoras de energia elétrica (SOUZA *et al.*, 2015).

Dentre a vasta quantidade de biomassas utilizadas no Brasil, encontra-se o açaí *Euterpe oleracea*, palmeira que produz um fruto de cor roxa, bastante utilizado para produção de bebidas e alimentos nas regiões Norte e Nordeste (SOUSA e VIEIRA, 2014). Uma grande atenção tem sido voltada para a produção de energia elétrica a partir dessa biomassa, principalmente em comunidades isoladas na região Norte do País, onde o caroço de açaí é largamente abundante (SOUSA e VIEIRA, 2014). Segundo o IBGE (2019), o Brasil produziu 1.510.022 toneladas de frutos de açaí. Da produção total, o Estado do Pará destaca-se como o maior produtor nacional, contribuindo com cerca de 95%.

Após a extração da polpa do fruto do açaí, de 85 a 95% é rejeitado, ocasionando impactos ao meio ambiente causado pelo descarte desses resíduos de forma inadequada (SOUSA e VIEIRA, 2014), prejudicando o bem-estar da população e higiene das cidades (CORDEIRO *et al.*, 2019). Uma alternativa para reduzir estes impactos e também agregar valor aos resíduos é a utilização dos caroços de açaí na geração de bioenergia, trazendo grandes benefícios como a redução dos gases de efeito estufa e a dependência dos combustíveis fósseis (CUNHA *et al.*, 2018). A pirólise, gaseificação e combustão são alguns dos processos termoquímicos que utilizam essa biomassa como biocombustível (SOUSA e VIEIRA, 2014).

Este estudo avaliou os efeitos do processo de degradação térmica dos caroços de açaí *Euterpe oleracea* sob atmosfera oxidante (ar sintético) por meio da Termogravimetria (TG) e



Derivada da Termogravimetria (DTG). As propriedades físico-químicas das amostras foram avaliadas utilizando análises elementar (AE), imediata (AI) e calorimétrica (PCS/PCI). As propriedades estruturais foram avaliadas por Difração de Raios-X (DRX) e espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR). Os aspectos texturais e morfológicos foram caracterizados por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e a composição metálica e/ou de inorgânicos foi estudada por meio da espectrometria de emissão óptica com plasma acoplado indutivamente (ICP-OES).

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo Geral

Caracterizar físico-química e termicamente os resíduos provenientes do processo de extração de polpa do açaí *Euterpe oleracea*, ou seja, os caroços com o intuito da utilização destes na conversão térmica para geração de energia limpa.

### 2.2 Objetivos Específicos

- Preparar as amostras dos caroços de açaí;
- Avaliar a morfologia e estrutura por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV);
- Investigar as propriedades físico-químicas por difração de raios-X (DRX), espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), análise elementar (AE), análise imediata (AI) e determinação da composição de metais (ICP-OES);
- Caracterizar termicamente as amostras por análise termogravimétrica (TGA), derivada da Termogravimetria (DTG) e análise calorimétrica (PCS/PCI).

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 Biomassa

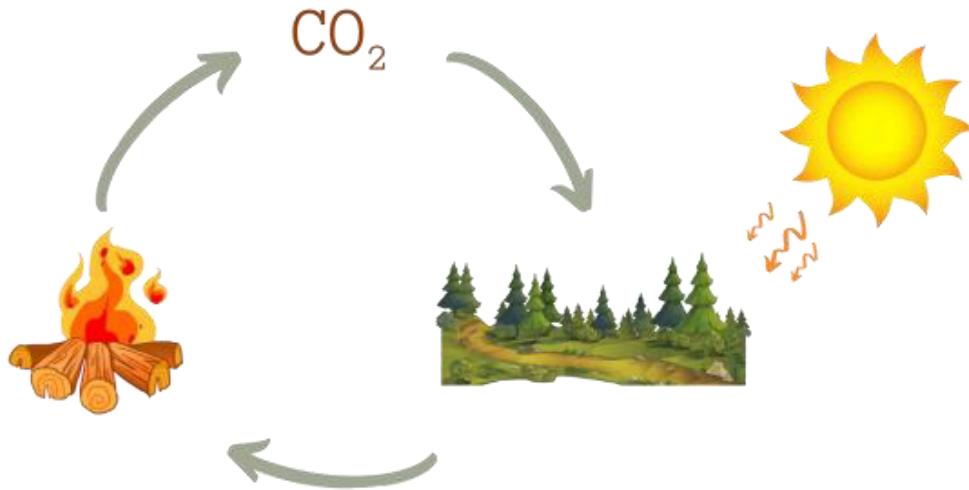
O desenvolvimento de tecnologias traz mais conforto e comodidade à sociedade moderna, mas em contrapartida, aumenta a demanda por fontes de energia as quais são utilizadas para a produção de bens e/ou serviços (ONG *et al.*, 2020). A dependência dos combustíveis fósseis em escala global e o alto nível de gases de efeito estufa no ambiente aumentaram consideravelmente e, para reverter essa situação, várias tentativas são realizadas para identificar novas e promissoras fontes alternativas que possuam considerável custo-eficácia (RAMBO, SCHMIDT e FERREIRA, 2015). Nesse aspecto, a biomassa apresenta-se como um combustível alternativo para a obtenção de energia limpa, além de contribuir para a diminuição do efeito estufa e da poluição ambiental (BENEDITO, 2012).

Denomina-se biomassa qualquer material renovável advindo de matéria orgânica de origem animal ou vegetal (RANGEL, 2014), como a madeira de florestas, plantações, algas, material remanescente de processos agrícolas e florestais, e resíduos orgânicos industriais, humanos e animais (CRUZ e CRNKOVIC, 2015; SAIDUR *et al.*, 2011).

A energia proveniente das biomassas vegetais, animais e/ou materiais lignocelulósicos é obtida de fonte solar por meio do processo de fotossíntese. Nesse processo o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) presente no ambiente é transformado em reserva de açúcares e armazenado em plantas, animais ou nos respectivos resíduos, denominados de reservatórios de bioenergia (SAIDUR *et al.*, 2011; BABU, 2008; MCKENDRY, 2002). Quando essa biomassa é totalmente queimada ou entra em combustão direta, a quantidade de dióxido de carbono produzida é igual à quantidade que foi retirada da atmosfera durante o estágio de crescimento da mesma, não havendo nenhuma adição de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), ou seja, uma emissão considerada nula para esse poluente e a este ciclo denomina-se ciclo de vida do carbono (Figura 2) (SAIDUR *et al.*, 2011).

Para Cortez, Lora e Gómez (2008) as fontes de biomassa são divididas em vegetais lenhosos (madeiras) e não lenhosos (sacarídeos, celulósicos, entre outros), resíduos orgânicos (agrícolas, urbanos e industriais) e biofluidos (óleos vegetais). Logo, é importante o conhecimento das características da biomassa utilizada para a determinação do processo mais adequado no qual a biomassa será empregada para a transformação em bioenergia (RANGEL, 2014).

**Figura 2** – Representação do ciclo do carbono



Fonte: Autoria própria

### 3.2 Caroco de açaí *Euterpe oleracea*

O caroco de açaí (Figura 3) é proveniente de uma palmeira nativa da região Norte do Brasil, ocorrendo, principalmente, nos estados do Pará, Amazonas, Maranhão e Amapá, abrangendo também regiões de outros países como Guianas e Venezuela (OLIVEIRA, FARIAS NETO e PENA, 2007).

O açaizeiro pode ser apontado como a palmeira com maior importância cultural, econômica e social da Região Norte e a demanda pela polpa deste fruto é crescente entre os moradores locais e turistas, por causa do elevado poder nutricional (QUEIROZ e MELÉM JR., 2001). Em 2019, segundo o IBGE, o Brasil produziu 1.510.022 toneladas de açaí. Dessa produção total, o Estado do Pará destaca-se como o maior produtor, totalizando 95%.

Do fruto do açaizeiro, de 85 a 95% é definido como rejeito e ocasiona sérios impactos ao meio ambiente devido ao descarte inadequado em locais abertos ou queimados no próprio campo (SOUSA e VIEIRA, 2014), prejudicando o bem-estar da população e higiene das cidades por conta do mau cheiro e contaminação por animais peçonhentos (CORDEIRO *et al.*, 2019).

**Figura 3** – Palmeira carregada com os frutos de açaí *Euterpe oleracea*



Fonte: Embrapa (2019)

É importante citar alguns trabalhos que já foram realizados com o intuito de reutilizar os resíduos dos frutos de açaí:

- Cordeiro *et al.* (2019) utilizaram o caroço de açaí *in natura* para a produção de etanol de segunda geração a partir de hidrólise enzimática. Os autores verificaram que a biomassa estudada se mostrou promissora para a obtenção do etanol secundário, com rendimento de 87,08% em relação à concentração inicial de glicose ( $13,68 \text{ g L}^{-1}$ );
- Martins, Mattoso e Pessoa (2009) utilizaram a fibra do mesocarpo e o caroço do fruto do açaí para utilização em materiais compósitos. O comportamento térmico da fibra de açaí mostrou-se semelhante as principais fibras naturais já usadas industrialmente, como o sisal e coco da praia;
- Ferreira *et al.* (2018) usaram o resíduo do açaí como agregado graúdo para composição de um concreto permeável e concluíram que, apesar de uma menor resistência do concreto, o mesmo mostrou-se satisfatório e com aplicabilidade em diversas demandas da construção civil.

### 3.3 Processos de conversão termoquímica

Uma opção para reduzir os impactos ambientais e também agregar valor aos resíduos é a utilização destes na geração de energia, trazendo grandes benefícios como a redução dos

gases do efeito estufa e a diminuição da dependência de combustíveis fósseis (CUNHA *et al.*, 2018). A gaseificação, pirólise e combustão são os processos térmicos mais comuns na conversão termoquímica de diferentes biomassas como biocombustíveis (SOUSA e VIEIRA, 2014).

A pirólise representa o processo de decomposição térmica da biomassa na total ausência de oxigênio ou presença controlada de nitrogênio ou outros gases inertes para gerar produtos na fase gasosa (CO, CO<sub>2</sub>, hidrogênio e hidrocarbonetos de baixa massa molar), produtos líquidos (alcatrão, obtido a partir da condensação de gases) e produtos sólidos (biocarvão ou *biochar*) (QIAO *et al.*, 2020; FÉLIX *et al.*, 2017).

Na gaseificação ocorre uma reação incompleta entre a matéria-prima (biomassas e combustíveis fósseis, em estado sólido ou líquido) e o comburente (oxigênio), produzindo uma mistura de gases, ainda com propriedades combustíveis, denominada gás de síntese ou *syngas* (VITAL, BORBA e CARVALHO, 2018; SOUSA e VIEIRA, 2014), que posteriormente pode ser utilizado para produção de calor ou em motores para geração de energia elétrica, seguindo a proporção de 80% de gás, 20% de diesel ou 100% de gás para motores do ciclo Otto (MUNIZ e ROCHA, 2013).

A combustão direta ocorre na presença de ar atmosférico ou sintético (atmosfera oxidante), produzindo calor e/ou eletricidade e, ao ser aplicado às biomassas lignocelulósicas, ocorrem sucessivas reações químicas complexas (heterogêneas e homogêneas), cuja energia química obtida por meio da fotossíntese é transformada em gases quentes, ou seja, gases que ainda contém um elevado poder calorífico (SILVA e CRUZ, 2020).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Origem e preparação das amostras

As amostras de caroços de açaí (Figura 4) foram fornecidas por um ponto de venda de açaí em uma feira popular da cidade, conhecida como “feira do Mangueirão” e localizada no bairro Araçagi, região metropolitana do município de São Luís (MA).

**Figura 4** - Caroços de açaí *Euterpe oleracea* após lavagem e secagem



Fonte: Autoria própria

Na etapa de preparação, os caroços de açaí foram lavados em água corrente para eliminação das impurezas, secos em estufa com temperatura constante (60 °C por 48 h) para remoção da umidade excedente, moídos em moinho de bolas para redução em faixas granulométricas e peneiramento para separação em tamanhos médios de partículas  $\leq 300 \mu\text{m}$  (Figura 5).

**Figura 5** - Caroços de açai *Euterpe oleracea* após redução granulométrica em uma determinada faixa granulométrica ( $\leq 300 \mu\text{m}$ )



Fonte: Autoria Própria

## 4.2 Procedimentos experimentais

Com a finalidade de obter um conhecimento mais detalhado das propriedades físico-químicas das amostras de caroços de açai usados nesta pesquisa, uma série de caracterizações se fez necessária:

### 4.2.1 Análise Elementar (AE)

A análise elementar (AE) é considerada um estudo das propriedades químicas dos materiais lignocelulósicos, compostos em sua totalidade por hidrocarbonetos (DEMIRBAS, 2004). Os resultados fornecem os percentuais dos principais elementos químicos presentes nas amostras dos resíduos, como os teores de carbono (C), hidrogênio (H), nitrogênio (N) e enxofre (S), sendo o percentual de oxigênio (O) calculado pela diferença em 100%, em base seca e livre de cinzas (PROTÁSIO, 2014). Utilizou-se um analisador elementar da marca *Perkins Elmer*, modelo 2400 CHNS-O, localizado na Central de Análises Químicas Instrumentais (CAQI) do Instituto de Química de São Carlos/ Universidade de São Paulo (IQSC/USP), em São Carlos (SP).



#### 4.2.2 Quantificação de metais (ICP-OES)

Para realizar a utilizou-se o Espectrômetro de Emissão Óptica por Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-OES). Tal procedimento permitiu quantificar os elementos metálicos e/ou inorgânicos presentes nas amostras, podendo chegar até 10 mg L<sup>-1</sup> para determinados elementos (CARUSO *et al.*, 2017). Este procedimento foi realizado no Laboratório de Pesquisas de Materiais e Meio Ambiente da Mercedes-Benz do Brasil, localizada em São Bernardo do Campo (SP).

#### 4.2.3 Análise Imediata (AI)

A partir da análise imediata foi possível determinar os teores de umidade (U), material orgânico volátil (MV), carbono fixo (CF) e cinzas (CZ) (CRUZ, 2015; BRAZ, 2014). Esta análise foi realizada por análise termogravimétrica no equipamento SDT 2960 TGA-DTA simultâneo, localizada na Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de Araraquara (SP), seguindo a metodologia desenvolvida por Torquato *et al.* (2017).

#### 4.2.4 Análise Calorimétrica (PCS/PCI)

De modo geral, o poder calorífico é a quantidade de energia por unidade de massa ou volume, liberada na oxidação de um determinado combustível (CRUZ e CRNKOVIC, 2019). Para a obtenção do Poder Calorífico Superior (PCS) utilizou-se uma bomba calorimétrica da marca IKA, modelo C-200, localizada na Faculdade de Engenharia Mecânica (FEM) da Universidade Estadual de Campinas (UniCamp), Campinas (SP).

Para o cálculo do Poder Calorífico Inferior (PCI) empregou-se a Equação 1 (CORTEZ, LORA e GÓMEZ, 2008).

$$PCI = (PCS - \lambda(r + 0,09.H)) \cdot \frac{100 - W}{100} \quad (1)$$

Sendo  $\lambda$  o calor latente de vaporização da água (2,31 MJ kg<sup>-1</sup>) a 25 °C, W é a umidade contida na amostra encontrada por meio da análise imediata, H é o teor de hidrogênio obtido na análise elementar e  $r = W/(100 - W)$  a razão de umidade.

#### 4.2.5 Difração de Raios-X (DRX)

A difração de Raios-X permite verificar as regiões cristalinas ( $I_{002}$ ) e amorfas ( $I_{am}$ ) relacionadas à organização estrutural das amostras dos caroços de açaí (SILVA, TORQUATO e CRUZ, 2019). De posse dessas informações, é possível calcular o índice de cristalinidade (IC) das amostras, o qual terá forte influência nos processos termoquímicos (combustão e/ou pirólise).

O valor de IC (Equação 2) foi calculado com base nas intensidades de picos de difração da região cristalina ( $I_{002}$ ), com pico de intensidade em  $2\theta = 22,5^\circ$  e região amorfa ( $I_{am}$ ), com intensidade em  $2\theta = 18^\circ$  (CRUZ *et al.*, 2018).

$$IC = \frac{I_{002} - I_{am}}{I_{002}} \cdot 100 \quad (2)$$

Foi utilizado um difratômetro da marca *Shimadzu Corp.*, modelo *XRD-6000*, localizado no Departamento de Tecnologia em Saúde e Biologia do Instituto Federal da Bahia (IFBA), Campus Salvador (BA). A taxa de varredura ( $2\theta$ ) das amostras foi de  $10^\circ$  a  $90^\circ$ , empregando radiação  $\text{CuK}\alpha$  ( $\lambda = 1,541 \text{ \AA}$ ) voltagem de 40 kV, corrente de 40 mA e uma taxa do passo de  $0,05^\circ \text{ min}^{-1}$ .

#### 4.2.6 *Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)*

A técnica de absorção na região do infravermelho (IR) permite determinar as alterações que ocorrem nos materiais lignocelulósicos e que são atribuídas à presença de diferentes concentrações nos componentes da parede celular, como hemicelulose, celulose e lignina (CRUZ *et al.*, 2018). Nos sólidos, há um grande número de bandas, as quais correspondem a um tipo específico de vibração da rede cristalina.

A análise foi realizada no espectrofotômetro da marca *Shimadzu*, modelo *IR-Prestige-21*, com confecção de pastilhas de biomassa usando aglomerante de brometo de potássio (KBr) e comprimento de onda variando de  $4000$  a  $400 \text{ cm}^{-1}$ , localizado na Central Analítica de Química (CAQ), do departamento de Química Tecnológica da Universidade Federal do Maranhão (UFMA).

#### 4.2.7 *Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)*

Nas partículas sólidas, além da composição química e estrutura cristalina, a forma e o tamanho dos cristais ou grãos são importantes, pois, influenciam significativamente as propriedades físico-químicas das amostras. Tais propriedades afetam diretamente os processos de combustão e/ou pirólise (CRUZ e CRNKOVIC, 2019). As imagens foram obtidas em um microscópio eletrônico de varredura, *Tescan Vega 3 Scanning Electron Microscope*, com ampliação de 500 a 5000 x, localizado no Departamento de Tecnologia em Saúde e Biologia do Instituto Federal da Bahia (IFBA), Campus Salvador (BA).

#### 4.2.8 *Análise Termogravimétrica (TG/DTG)*

A termogravimetria (TG) e a derivada da termogravimetria (DTG) são técnicas que permitem obter informações sobre os estágios de degradação térmica dos diferentes materiais lignocelulósicos de maneira simples, rápida e direta (SILVA, TORQUATO e CRUZ, 2019). Para a análise de TG/DTG foi utilizado um equipamento SDT 2960 TGA-DTA simultâneo, localizado na Universidade Estadual Paulista (UNESP) “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de Araraquara (SP), cujas condições experimentais foram: fluxo atmosférico dinâmico de 100 mL min<sup>-1</sup> em atmosfera de ar sintético e taxa de aquecimento de 10 °C min<sup>-1</sup>, para uma amostra com massa de 7,16 ± 0,01 mg, variando da temperatura ambiente até 800 °C.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Análise Elementar (AE), imediata (AI) e calorimétrica (PCS/PCI)

Pela análise elementar (Tabela 1) obtiveram-se os teores de carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio e enxofre, e construiu-se a fórmula química para o caroço de açaí, dividindo-se a porcentagem quantificada de cada elemento (C, H, O, N, S) pelos respectivos pesos atômicos (CRUZ *et al.*, 2021). A partir da fórmula química obtida para esse composto lignocelulósico é possível prever o rendimento da reação química complexa de decomposição térmica e estimar as emissões gasosas desses materiais quando submetidos aos processos termoquímicos (BRAZ, 2014).

**Tabela 1** - Análises elementar, imediata e calorimétrica do caroço de açaí *Euterpe oleracea*

<b>Análise Elementar</b>	
<i>Elemento</i>	<i>Quantitativo (%)</i>
Carbono (C)	46,72 ± 0,50
Hidrogênio (H)	5,18 ± 0,17
Oxigênio (O)*	47,42 ± 0,65
Nitrogênio (N)	0,68 ± 0,03
Enxofre (S)	n.d.
<b>Fórmula Química</b>	
$C_{3,89}H_{5,18}N_{0,05}O_{2,96}$	
<b>Análise Imediata</b>	
Umidade	10,0 %
Materiais Voláteis	63,0 %
Carbono Fixo	26,0 %
Cinzas	1,0 %
<b>Análise Calorimétrica</b>	
<i>Poder Calorífico Superior</i>	<i>Poder Calorífico Inferior</i>
<i>(PCS)</i>	<i>(PCI)</i>
19,75 ± 0,08 MJ kg <sup>-1</sup>	16,57 MJ kg <sup>-1</sup>

\*O = 100 - (%C + %H + %N + %S).

n.d. = não detectado ou abaixo do limite de detecção do equipamento.

Fonte: Autoria própria

A biomassa de caroços de açaí apresentou valor médio de carbono (46,72%), próximo aos valores de 48,47% e 47,41% encontrados por Costa (2018) e Virmond *et al.* (2012), respectivamente, para essa mesma biomassa e duas vezes superior ao valor encontrado por Silva, Torquato e Cruz (2019) para as escamas de peixe (20,32%). Tais proporções refletem diretamente no elevado Poder Calorífico Superior (PCS), ou seja, 19,75 MJ kg<sup>-1</sup>, que aumenta linearmente com este constituinte (COSTA, 2018). O carbono, hidrogênio e oxigênio são os componentes majoritários nos combustíveis sólidos, reagindo durante a combustão em uma reação exotérmica e gerando, principalmente, CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O<sub>(v)</sub>, o que contribui de forma positiva para o aumento do PCS (CRUZ *et al.*, 2018; BRAZ, 2014; SASMAL, GOUD e MOHANTY, 2012).

Em contrapartida, maiores teores de oxigênio (O) presentes nas amostras reduzem o PCS de um biocombustível, principalmente devido aos valores das entalpias das ligações, pois é necessária uma energia maior para que haja uma quebra das ligações formadas pelos átomos de oxigênio (BRAZ, 2014). Apesar do teor de oxigênio elevado (47,42%), o caroço de açaí apresentou um alto valor de PCS, levemente superior ao encontrado por Cruz *et al.* (2020) para as folhas de mandioca (18,86 MJ kg<sup>-1</sup>) e para o bagaço de cana (17,47 MJ kg<sup>-1</sup>) encontrado por Cruz *et al.* (2018). Convém ressaltar que esta última biomassa é muito utilizada para a geração de energia elétrica em biorrefinarias, fator que corrobora para o uso do caroço de açaí em processos de conversão termoquímica para geração de energia limpa.

Para os resíduos de caroços de açaí o Poder Calorífico Inferior (PCI) foi 16% menor que o PCS. O PCI é dado pela energia liberada na oxidação de um combustível sem levar em consideração o calor latente da água e por isso esse valor é levado em consideração durante o desenvolvimento de projetos dos processos térmicos para geração de energia (COSTA, 2018; BRAZ, 2014; MCKENDRY, 2002).

Os teores de nitrogênio (N) e enxofre (S) são parâmetros necessários para o conhecimento do potencial da formação de agentes poluentes provenientes da degradação térmica de biomassa, pois, durante a queima, estes são emitidos à atmosfera podendo causar danos ao meio ambiente (COSTA, 2018; REN *et al.*, 2017). Os resíduos dos frutos de açaí apresentaram o nitrogênio como componente minoritário, ou seja, um teor de 0,68%. Teores inferiores desse elemento são adequados para o processo de combustão, pois, o nitrogênio pode reagir com o oxigênio do ar atmosférico, formando NO<sub>x</sub> (90% NO, 10% NO<sub>2</sub> e N<sub>2</sub>O em minoria), gases responsáveis pela ocorrência de chuva ácida e problemas de corrosão em equipamentos industriais (CRUZ *et al.*, 2021).

O caroço de açaí, assim como o bagaço de cana de açúcar investigado por Braz (2014) e Cruz (2015), não apresentou teor de enxofre na composição elementar, mostrando-se menos propenso para a produção de gases poluentes. O enxofre, durante a gaseificação, é convertido em sulfeto de hidrogênio ( $H_2S$ ), gás altamente corrosivo para os refrigeradores de gás e que causa sérios danos aos sistemas de transferência ou trocadores de calor (VIRMOND *et al.*, 2012). Além disso, a formação de  $SO_2$  pode acarretar em processos de corrosão nas plantas industriais, diminuindo a vida útil dos materiais metálicos e afetando a eficiência do processo térmico e, assim como o  $NO_x$ , também é responsável pela ocorrência de chuva ácida (WANG *et al.*, 2017; BRAZ, 2014).

O teor de umidade para o caroço de açaí foi aproximadamente 10%, sendo considerado, desta forma, como uma biomassa seca (BRAZ, 2014). A umidade diminui a qualidade do combustível, retardando a ignição e prejudicando a combustão (MEDEIROS, 2016). Para o processo de gaseificação, uma umidade inferior a 10% nos combustíveis é favorável, pois, amostras muito úmidas (superior a 50%) podem danificar os equipamentos devido à formação de alcatrão, o que resulta em uma ignição pobre e dificuldade no processo de combustão (BARBOSA *et al.*, 2016; BRAZ, 2014).

Os materiais voláteis para uma determinada biomassa dependem da natureza da mesma e estão na faixa de 75 a 90% (CRUZ *et al.*, 2021). O conteúdo de material volátil é usado para determinar a facilidade de ignição e queima dos combustíveis sólidos e, juntamente com a relação carbono fixo e material volátil, a qual determina a estabilidade da chama durante a combustão, revela que quanto maior for o conteúdo de material volátil, maior será a velocidade de queima e menor a estabilidade da chama (MEDEIROS, 2016; VIRMOND *et al.*, 2012). Os elevados níveis de materiais voláteis proporcionam a biomassa alta reatividade (BRAZ, 2014).

Segundo Yang *et al.* (2005) para biomassas vegetais o carbono fixo varia de 7 a 20%. O elevado teor de carbono fixo dos caroços de açaí (23%) mostra a alta resistência térmica dessa biomassa, ou seja, a combustão ocorrerá de forma mais lenta (MARCELINO, 2017). Convém ressaltar que materiais que apresentam elevado teor de carbono fixo possuem alto poder calorífico, sendo este um parâmetro importante para avaliação do processo de gaseificação, a partir do qual é possível determinar a taxa de velocidade do processo e o respectivo rendimento térmico (MEDEIROS, 2016).

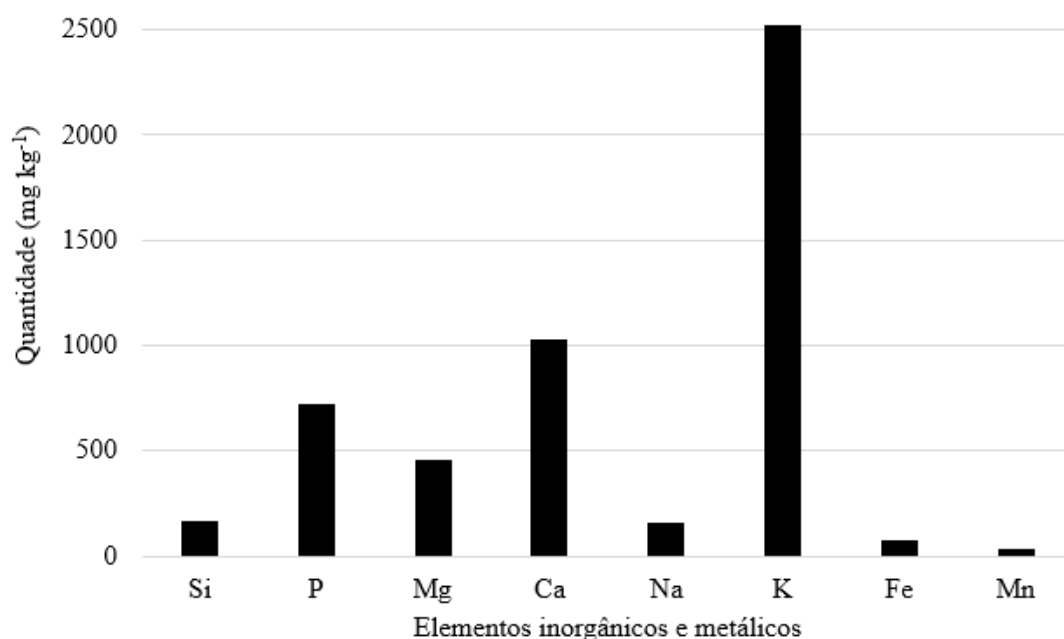
O baixo teor de cinzas encontrado para os caroços de açaí (1%) os tornam um excelente resíduo com grande possibilidade de utilização na conversão termoquímica, pois, o excesso de cinzas prejudica a utilização das biomassas em processos industriais, provocando problemas

como incrustação, aglomeração, escória e deposição nas paredes dos equipamentos e consequentemente, diminuição da eficiência do processo térmico (BRAZ, 2014).

## 5.2 Quantificação de Metais (ICP-OES)

A partir da análise de ICP-OES foi possível quantificar os elementos inorgânicos e metálicos das amostras do caroço de açaí (Figura 6), pois as cinzas das biomassas possuem elementos inorgânicos, como sódio (Na), potássio (K), magnésio (Mg), fósforo (P) e cálcio (Ca) que formam compostos complexos durante a conversão termoquímica (MLONKA-MEDRALA *et al.*, 2020). Estes elementos presentes nas biomassas são estudados amplamente devido à influência significativa dos mesmos na formação da escória, incrustações, aglomeração, corrosão e formação de poluentes (WILLIAMS *et al.*, 2012).

**Figura 6** - Principais elementos inorgânicos e/ou metálicos presentes nas amostras de caroços de açaí *Euterpe oleracea* por ICP-OES ( $\text{mg kg}^{-1}$ )



Fonte: Autoria própria

Uma quantidade relativamente elevada de potássio (K) foi encontrada nas amostras de caroços de açaí ( $2520 \text{ mg kg}^{-1}$ ). O fruto do açaí possui alto valor energético e nutricional, com a presença de alguns minerais como ferro (Fe), fósforo (P), potássio (K) e cálcio (Ca) (SATO, 2018). Durante a combustão de uma biomassa, o potássio é liberado na fase gasosa e, em seguida, os gases de combustão são resfriados nas superfícies dos fornos, condensando-se e formando cloreto de potássio (KCl) e hidróxido de potássio (KOH), compostos que ocasionam

incrustação e corrosão em partes metálicas quando submetidos a altas temperaturas, além da aderência nas cinzas (MASON *et al.*, 2016).

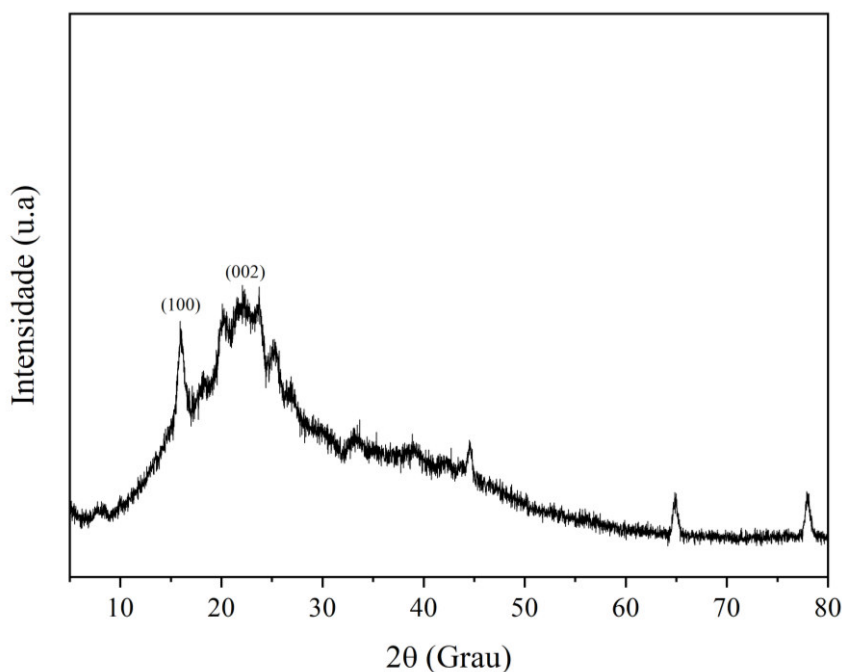
Cálcio (Ca) ( $1025 \text{ mg kg}^{-1}$ ) e magnésio (Mg) ( $460 \text{ mg kg}^{-1}$ ) também foram encontrados na amostra da biomassa estudada. Uma vez que estes elementos são nutrientes essenciais para os vegetais, uma possível vantagem da presença de K, Ca e Mg na biomassa seria a possibilidade de utilização das cinzas provenientes dessas amostras como fertilizantes ou condicionadores do solo (CRUZ *et al.*, 2018; SAN MIGUEL *et al.*, 2012).

Dos elementos potencialmente tóxicos, o chumbo (Pb) foi detectado com um valor de  $3 \text{ mg kg}^{-1}$ , o qual é considerado não significativo. No entanto, cádmio (Cd) e arsênio (As) não foram detectados, evidenciando que o uso dos caroços de açaí para geração de bioenergia por meio de processos termoquímicos não representa um risco ambiental e/ou à saúde humana (CRUZ *et al.*, 2021).

### 5.3 Difração de Raios-X

A partir do difratograma (Figura 7) pode-se observar o efeito da cristalinidade das fibras vegetais correspondentes à fração de celulose, sendo o pico em torno de  $22^\circ$  o de maior intensidade e refere-se aos planos dos anéis glicosídicos, que são os mais densos da celulose tipo I (FRAGA e TAVARES, 2017), enquanto que o pico em torno de  $18^\circ$  refere-se a região amorfa (CRUZ *et al.*, 2018).

**Figura 6** - Difratograma do caroço de açaí *Euterpe oleracea*



Fonte: Autoria própria



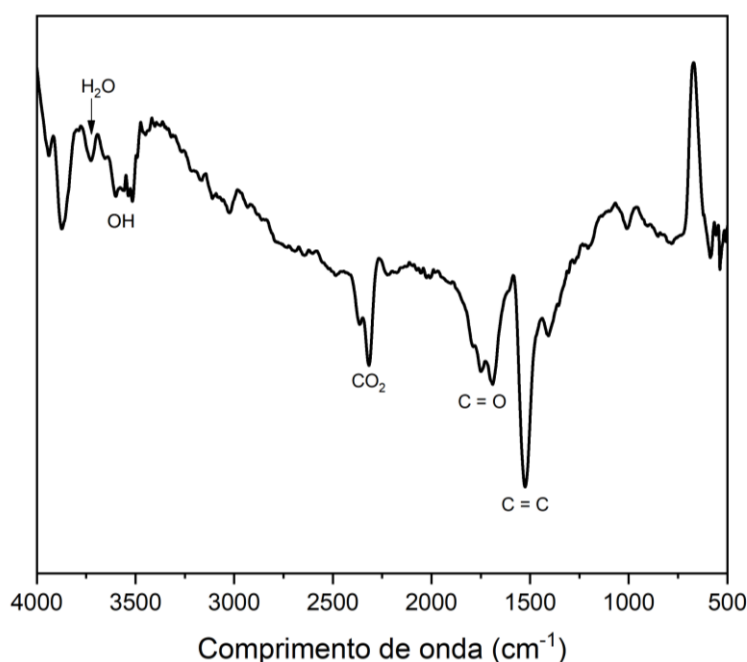
O índice de cristalinidade (IC) para os caroços de açaí foi calculado pela Equação 2, o qual apresentou um valor de 23%, sendo tal valor ligeiramente menor do que o encontrado por Rambo, Schmidt e Ferreira (2015) para as sementes de açaí (30%), indicando que os caroços de açaí estudados apresentaram em torno de 77% de regiões amorfas na composição. É uma biomassa com baixa cristalinidade quando comparada com outras biomassas estudadas por outros autores, como a semente de tucumã (IC = 57,4%), o bagaço da cana-de-açúcar (IC = 64,8%) (CRUZ *et al.*, 2018) e o caule da mandioca (IC = 60,2%) (CRUZ *et al.*, 2021).

As biomassas amorfas apresentam uma maior reatividade em comparação as cristalinas, pois, a ausência de aglomerados cristalinos torna esses materiais mais suscetíveis às reações complexas de degradação térmica (SILVA, TORQUATO e CRUZ, 2019), ou são mais fáceis de serem acessadas por ataques químicos ou biológicos (CRUZ *et al.*, 2018).

#### 5.4 Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

A partir do espectrômetro de infravermelho (Figura 8) foram identificados os principais grupos funcionais presentes nos caroços de açaí (Tabela 2). De acordo com Martelli (2014), a aplicação desta análise permite identificar algumas estruturas moleculares, como componentes alifáticos, aromáticos e peptídicos, e grupos funcionais reativos, como COOH, OH, C=O e NH<sub>2</sub>.

**Figura 7** - Espectrômetro de Infravermelho por Transformada de Fourier para o caroço de açaí *Euterpe oleracea*



Fonte: Autoria própria

O pico localizado na região compreendida entre 3750 a 3500  $\text{cm}^{-1}$  pode estar diretamente relacionada às moléculas de água (LISBOA, 2016). A região de 3700 a 3400  $\text{cm}^{-1}$ , apresentando um valor máximo em torno de 3432  $\text{cm}^{-1}$ , com uma ampla faixa de absorção e a intensidade pode estar relacionada às vibrações valentes da ligação OH entre as moléculas de água e hidrogênio ou aos grupos OH da celulose, hemicelulose e lignina (OLIVEIRA *et al.*, 2019; SILVA, TORQUATO e CRUZ, 2019). Os picos na faixa de 2400 a 2250  $\text{cm}^{-1}$  foram atribuídos às ligações C = O do grupo CO<sub>2</sub> (SILVA, TORQUATO e CRUZ, 2019; MUSELLIM *et al.*, 2018; KOK, VARFOLOMEEV e NURGALIEV, 2017). As bandas na região de 1730  $\text{cm}^{-1}$  podem ser atribuídas ao alongamento C = O (vibração de ácidos carboxílicos alifáticos e cetonas), principalmente devido aos grupos hemicelulose e carbonil conjugado na lignina, os quais estão próximos a 1650  $\text{cm}^{-1}$  (OLIVEIRA *et al.*, 2019; CRUZ *et al.*, 2018). Entre 1600 e 1500  $\text{cm}^{-1}$ , a banda C = C de vibrações esqueléticas aromáticas aparecem na lignina (CRUZ *et al.*, 2018).

**Tabela 2** – Principais grupos funcionais encontrados para os caroços de açaí *Euterpe oleracea*

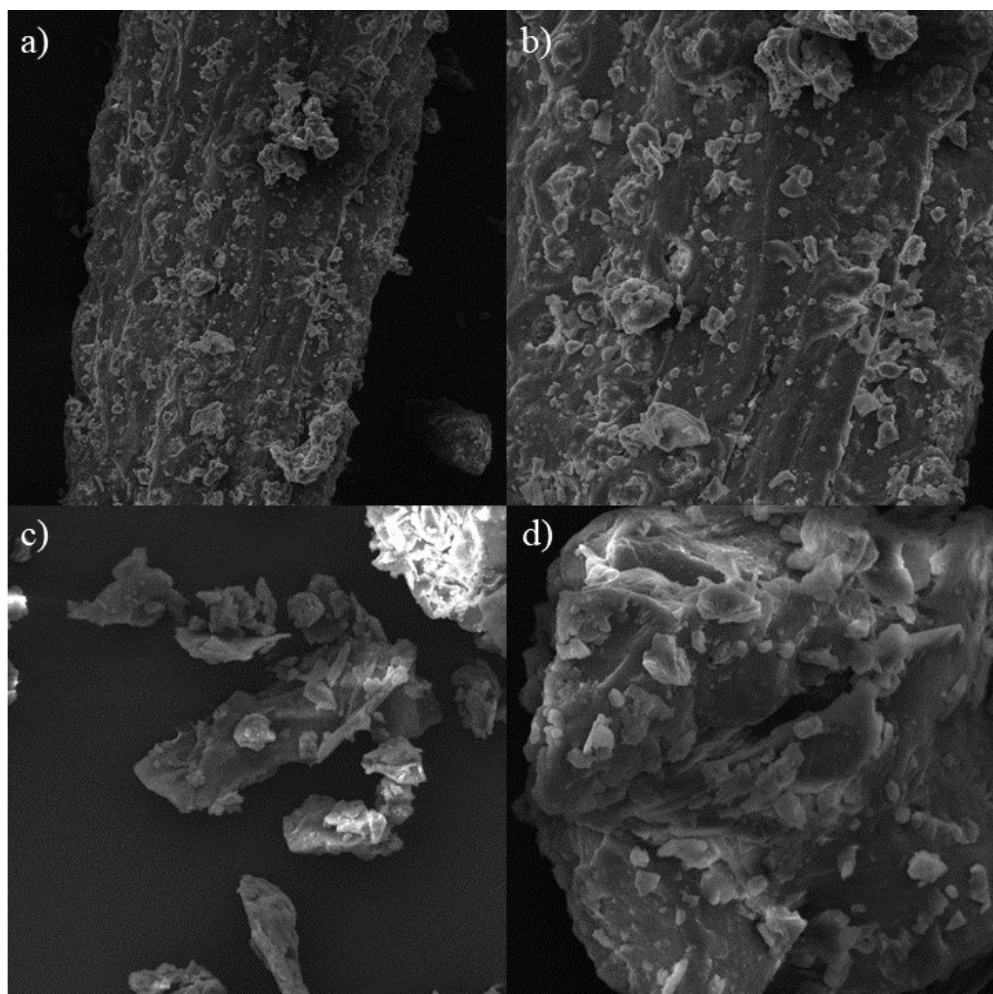
Componentes	Comprimento de onda ( $\text{cm}^{-1}$ )
Ligação OH entre as moléculas de água e hidrogênio ou grupos OH da celulose, hemicelulose e lignina OH	3700 - 3400
Agrupamento C = O devido aos grupos hemicelulose e carbonil conjugado na lignina	2400 - 2250 e 1730
Agrupamento C = C de vibrações esqueléticas aromáticas que aparecem na lignina	1600 - 1500

Fonte: Autoria própria

## 5.5 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A partir da análise da microscopia eletrônica de varredura (Figura 9) foi possível observar que os caroços de açaí apresentaram uma estrutura altamente compactada, com meso e macroporos, além da formação de agregados maiores de partículas nas superfícies (PESSÔA *et al.*, 2019). As fibras dos caroços de açaí demonstraram uma propriedade isotrópica, ou seja, exibiram uma distribuição ordenada e cadeia alongada com uma mesma direção e sentido (CRUZ *et al.*, 2018). A superfície irregular das amostras pode estar associada à deformação ocasionada durante o processo de trituração e/ou o atrito entre as próprias partículas das biomassas (BARBOSA *et al.*, 2019), e também pode ser um formato natural dos caroços de açaí.

**Figura 9** - Microscopia Eletrônica de Varredura para os caroços de açai *Euterpe oleracea*, com amplitudes de: a) 1000 x; b) 2000 x; c) 2500 x e d) 5000 x

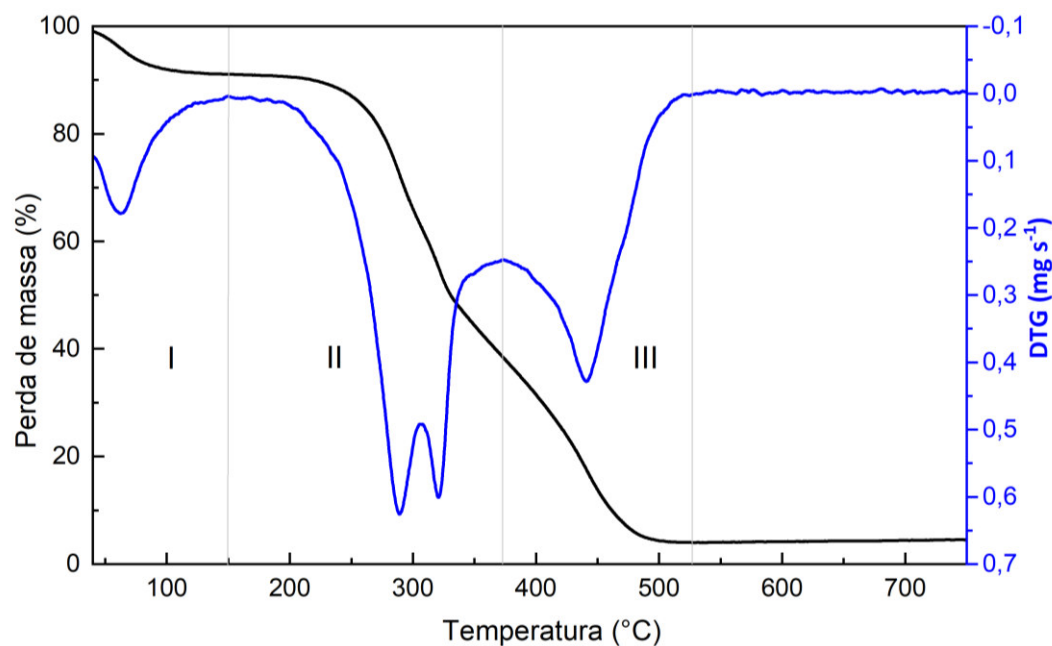


Fonte: Autoria própria

### 5.6 Análise Termogravimétrica (TG/DTG)

A termogravimetria (TG) e a derivada da termogravimetria (DTG) (Figura 10) foram realizadas sob atmosfera oxidante ou de ar sintético (combustão), mostrando os principais estágios de degradação térmica dos caroços de açai.

**Figura 10** - Curvas TG/DTG em atmosfera oxidante (ar sintético) para o caroço de açai *Euterpe oleracea*



Fonte: Autoria própria

O primeiro estágio está compreendido entre 40° e 150 °C, com um pico de perda de massa em aproximadamente 60 °C. Esta fase é correspondente à liberação da umidade da biomassa, com uma perda de massa de aproximadamente 10% (COSTA, 2018). O teor de umidade da biomassa deve ser limitado a um intervalo de 10 a 30% em peso, a fim de evitar problemas de ignição e combustão nos processos térmicos reais (VIRMOND *et al.*, 2012).

O segundo estágio, compreendido entre 180° e 370 °C deve-se ao despreendimento dos componentes altamente voláteis, os quais são decorrentes da decomposição da celulose, hemicelulose e parte da lignina inicial (VIRMOND *et al.*, 2012). Esta é uma região de combustão rápida, onde a máxima taxa de perda de massa atingiu um valor de aproximadamente 50%, indicando o pico de temperatura em 290 °C (VIRMOND *et al.*, 2012). A perda de massa foi superior ao valor encontrado por Fraga e Tavares (2017) para as fibras de açai *in natura* (40%), ocorrida no intervalo de 200° a 325 °C. O segundo pico observado nessa etapa em torno de 310 °C foi considerado como a degradação térmica da celulose e hemicelulose simultaneamente, denominada de holocelulose (SILVA, 2019).

O terceiro estágio, com início em torno de 370 °C e término em 530 °C possui um pico em 440 °C, relacionado com a degradação térmica da lignina residual, que inicia em torno de 200 °C e finaliza em 600 °C (BRAZ, 2014). A lignina apresenta uma estabilidade térmica muito elevada, o que dificulta a decomposição da mesma em temperaturas abaixo de 600 °C (FRAGA e TAVARES, 2017). Nessa etapa, a perda de massa foi de aproximadamente 36%.

A partir de 600 °C, os resíduos orgânicos provenientes da queima do resíduo de caroços de açaí foram de aproximadamente 4%. Quanto mais reativa for a biomassa, menor será a temperatura e o tempo necessário para a completa conversão termoquímica desta, o que reduz os problemas ocasionados pelas cinzas, visto que em temperaturas elevadas (900-1050 °C) as cinzas derretem e por outro lado ao terem contato com o fluxo de ar se solidificam, causando problemas de sinterização nas superfícies térmicas dos equipamentos (VIRMOND *et al.*, 2012). Gaseificadores de leito fluidizado, por exemplo, operam abaixo das temperaturas de fusão das cinzas das biomassas, ou seja, 900 °C, sendo portanto uma boa opção para o uso dos caroços de açaí na geração de bioenergia (VIRMOND *et al.*, 2012).

Além de todas as características térmicas e físico-químicas supramencionadas, outros fatores, como aspectos ambientais e socioeconômicos também poderiam demonstrar que os caroços de açaí são um propenso e forte candidato para utilização como matéria-prima na produção de bioenergia por meio de processos termoquímicos (combustão, pirólise e gaseificação), mas ressaltando que generalizações não podem ser feitas quando diferentes biomassas lignocelulósicas são utilizadas em processos de termoconversão.

## 6 CONCLUSÃO

Os caroços de açaí foram estudados por meio das características físico-químicas e comportamento térmico com o intuito de utilização dessa biomassa em processos termoquímicos para a geração de energia limpa. Os resíduos de açaí apresentaram um elevado teor de carbono, resultando em um elevado Poder Calorífico Superior (PCS). Teores de enxofre e nitrogênio não foram significativos, tornando a biomassa estudada menos propensa à emissão de gases poluentes durante o processo de queima em atmosfera oxidante. A quantificação de metais e/ou inorgânicos mostrou um elevado teor de potássio (K) nas amostras, o que pode provocar incrustações nas paredes dos fornos, os quais atualmente são controlados e/ou monitorados eletronicamente por meio de ferramentas ou *softwares* computacionais. Chumbo foi detectado como elemento traço, porém, cádmio e arsênio, elementos altamente tóxicos, não foram detectados, não representando um risco ambiental e à saúde humana. As amostras apresentaram uma estrutura compactada com meso e macroporos, e formação de agregados maiores nas superfícies. O comportamento térmico identificou três fases distintas de degradação térmica dos resíduos de açaí, referentes à liberação da umidade, celulose e hemicelulose (holocelulose) e lignina residual.

Portanto, a biomassa de caroço de açaí apresenta um grande potencial para ser aplicada em processos térmicos para geração de bioenergia. Por exemplo, o emprego desses resíduos apresenta vantagens do ponto de vista ambiental (diminuição parcial da dependência dos combustíveis fósseis e uma menor emissão de gases poluentes), social (a utilização desses resíduos pode evitar o descarte destes em locais inapropriados ou infestação/contaminação de animais peçonhentos) e econômico (agrega valor adicional a esses resíduos).

Para trabalhos futuros propõe-se a realização da análise termogravimétrica sob outras atmosferas (inerte ou oxi-combustão), simulação computacional da queima dos caroços de açaí, caracterização individual das fibras e mesocarpo e sua análise térmica e físico-química ao ser misturada com outras biomassas (*blends*).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALIOTTE, F. F. **Indicador de preço para valorização da biomassa a partir da geração de vapor no estado de São Paulo**. Dissertação (Mestrado em Agronegócio) – Escola de Economia de São Paulo, Fundação Getúlio Vargas, São Paulo, 2020.

BABU, B. V. Biomass pyrolysis: a state-of-the-art review. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**. Vol. 2, N° 5, p. 393-414, 2008.

BARBOSA, A. M.; REBELO, V. S. M.; MARTORANO, L. G.; GIACON, V. M. Caracterização de partículas de açaí visando seu potencial uso na construção civil. **Revista Matéria**. Vol. 24, N° 3, p. 1-11, 2019.

BARBOSA, I. R.; BARCELLOS, K. M.; SOUZA, J. E. A.; CAVALCANTI, C. A. S. H.; DANTA, L. P. M.; ALÉCIO, A. H. L. Caracterização do potencial energético de biomassas. In: XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Química, 2016. Anais eletrônicos... Campinas, Galoá, 2016.

BENEDITO, T. H. S. **Coleta, análise e degradação catalítica do alcatrão produzido na gaseificação de caroço de açaí e casca de arroz**. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2012.

BRAZ, C. E. M., **Caracterização de biomassa lignocelulósica para uso em processos térmicos de geração de energia**. 2014. Dissertação (Mestrado em Química) – Engenharia Química, Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2014.

CARUSO, F.; MANTELLATO, S.; PALACIOS, M.; FLATT, R. J. ICP-OES method for the characterization of cement pore solutions and their modification by polycarboxylate-based superplasticizers. **Cement and Concrete Research**, Vol. 91, p. 52-60, 2017.

CORDEIRO, M. A.; ALMEIDA, O.; RODRIGUES, E. M. S.; CHAVES NETO, A. M. J.; MACHADO, N. T. Produção de etanol através da hidrólise enzimática do caroço de açaí (*Euterpe oleracea* Mart). **Revista Brasileira de Energias Renováveis**. Vol. 8, N° 1, p. 122-152, 2019.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. **Biomassa para energia**. Campinas: Unicamp, 2008.

COSTA, J. S. **Biomassa residual para uso energético no estado do Pará**. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, 2018.

CRUZ, G. **Características físico-químicas de biomassas lignocelulósicas e a correlação entre suas emissões e os resíduos gerados sob diferentes condições atmosféricas em um forno tubular de queda livre (DTF)**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

CRUZ, G.; BRAZ, C. E. M.; ÁVILA, I.; CRNKOVIC, P. M. Physico-chemical properties of Brazilian biomass: Potential applications as renewable energy source. **African Journal of Biotechnology**. Vol. 1, p. 1-19, 2018.

CRUZ, G.; CRNKOVIC, P. M. Assessment of the physical-chemical properties of residues and emissions generated by biomass combustion under N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> atmospheres in a Drop Tube Furnace (DTF). **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**. Vol. 138, p. 401-415, 2019.

CRUZ, G.; CRNKOVIC, P. M. Investigation into the kinetic behavior of biomass combustion under N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> atmospheres. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**. Vol. 123, p. 1003-1011, 2015.

CRUZ, G.; RODRIGUES, A. L. P.; SILVA, D. F.; GOMES, W. C. Physical-chemical characterization and thermal behavior of cassava harvest waste for application in thermochemical processes. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**. Vol. 143, p. 3611-3622, 2021.

CUNHA, K. C. L.; LIMA, S. S.; OLIVEIRA, L. S.; QUERINO, J. K. A. S.; FERREIRA, W. M. Avaliação do resíduo do açaí como fonte alternativa de energia. **In: Seminário Internacional em Ciências do Ambiente e Sustentabilidade na Amazônia**, 5., 2018, Manaus. Anais... Manaus: UFAM, 2018.

DEMIRBAS, A. Combustion characteristics of different biomass fuels. **Progress in Energy and Combustion Science**. Vol. 30, N° 2, p. 219-230, 2004.

DOMINGOS, C. A.; PEREIRA, D. D.; CARDOSO, L. S.; TEODORO, R. A.; CASTRO, V. A. Biodiesel – proposta de um combustível alternativo. **Revista Brasileira de Gestão e Engenharia**. N° 5, p. 134-178, 2012.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Embrapa disponibiliza sistema de produção do açaizeiro para Amazônia ocidental**. Disponível: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/40670503/embrapa-disponibiliza-sistema-de-producao-do-acaizeiro-para-amazonia-ocidental>>. Acesso: 03 jan. 2021.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco energético nacional 2019: ano base 2018**. Rio de Janeiro, 67 p., 2019.

FÉLIX, C. R. O.; AZEVEDO JR., A. F.; FREITAS, C. C.; PIRES, C. A. M.; TEIXEIRA, V.; FRETU, R.; BRANDÃO, S. T. Pirólise rápida de biomassa de eucalipto na presença de catalisador Al-MCM-41. **Revista Matéria**. Vol. 22, Supl. 1, p. 1-11, 2017.

FERREIRA, R. S.; SILVA, I. A.; SILVA, R. F.; VIANA, F. M. P. C.; PEREIRA, M. S.; RODRIGUES, E. C. Análise das propriedades mecânicas do concreto permeável com incorporação de sementes de açaí. **In: 3° Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis**, 2018, Coimbra. Ata do 3° CLBMCS 2018, 2018.

FIGUEIREDO, F. L.; FERNANDES, F.; PETRUCCI, A. L.; FURINI FILHO, R.; MARSURA, M. Produção de energia elétrica através da biomassa em sistema de gaseificação concorrente e grupo gerador com capacidade de 50 kVA. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas**. Vol. 33, N° 2, p. 165-174, 2012.

FRAGA, L. A.; TAVARES, M. I. B. Estudo de diferentes condições de mercerização das fibras da semente de açaí (*Euterpe oleracea*). **Revista Semioses**. Vol. 11, N° 3, p. 49-54, 2017.



IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura**. Disponível: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9117-producao-agricola-municipal-culturas-temporarias-e-permanentes.html?=&t=resultados>>. Acesso: 03 jan. 2021.

KOK, M. V.; VARFOLOMEEV, M. A.; NURGALIEV, D. K. Crude oil characterization using TGA-DTA, TGA-FTIR and TGA-MS techniques. **Journal of Petroleum Science and Engineering**. Vol. 154, p. 537-542, 2017.

LISBOA, F. C. **Carbonização e gaseificação de resíduos da macaúba, tucumã e cupuaçu para geração de eletricidade**. Tese (Doutorado em Ciências Mecânicas) – Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

MARCELINO, M. M. **Biomassa residual do coco para obtenção de energia e intermediários químicos via gaseificação: caracterização, modelagem e simulação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2017.

MARTELLI, F. H. **Determinação e caracterização físico-química e espectroscópica de gramíneas para obtenção de etanol de segunda geração**. Dissertação (Mestrado em Química Analítica e Inorgânica) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

MARTINS, M. A.; MATTOSO, L. H. C.; PESSOA, J. D. C. Comportamento térmico e caracterização morfológica das fibras de mesocarpo e caroço do açaí (*Euterpe oleracea* Mart.). **Revista Brasileira de Fruticultura**. Vol. 31, N° 4, p. 1150-1157, 2009.

MASON, P. E.; DARVELL, L. I.; JONES, J. M.; WILLIAMS, A. Observations on the release of gas-phase potassium during the combustion of single particles of biomass. **Fuel**. Vol. 182, p. 110-117, 2016.

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

MEDEIROS, C. M. **Caracterização físico-química de resíduos sólidos da indústria de celulose e papel para fins energéticos**. Dissertação (Mestrado em Materiais Aplicados às Energias Renováveis) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2016.

MLONKA-MEDRALA A.; MAGDZIARZ, A.; GAJEK, M.; NOWINSKA, K.; NOWAK, W. Alkali metals association in biomass and their impact on ash melting behavior. **Fuel**. Vol 261, p. 1-17, 2020.

MUNIZ, R. N.; ROCHA, B. R. P. Gaseificação de biomassa residuária na Amazônia: Estudo de caso em comunidade quilombola no Pará. **In: 8º Congresso Internacional de Bioenergia**, 2013, São Paulo. Anais... São Paulo, 2013.

MUSELLIM, E.; TAHIR, M. H.; AHMAD, M. S.; CEYLAN, S. Thermokinetic and TG/DSC-FTIR study of pea waste biomass pyrolysis. **Applied Thermal Engineering**. Vol. 137, p. 54-61, 2018.

OLIVEIRA, D. N. P. S.; CLARO, P. I. C.; FREITAS, R. R.; MARTINS, M. A.; SOUZA, T. M.; SILVA, B. M. S.; MENDES, L. M.; BUFALINO, L. Enhancement of the Amazonian açaí waste fibers through variations of alcali pretreatment parameters. **Chemistry & Biodiversity**,

Vol. 16, p. 1-12, 2019. Disponível: < <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/cbdv.201900275>>. Acesso: 03 jan. 2021.

OLIVEIRA, M. S. P.; FARIAS NETO, J. T.; PENA, R. S. **Açaí: técnicas de cultivo e processamento**. Fortaleza: Instituto Frutal, 2007.

ONG, H. C.; CHEN, W.; SINGH, Y.; GAN, Y. Y.; CHEN, C.; SHOW, P. L. A state-of-the-art review on thermochemical conversion of biomass for biofuel production: A TG-FTIR approach. **Energy Conversion and Management**. Vol. 209, p 1-21, 2020.

PESSÔA, T. S.; FERREIRA, L. E. L.; SILVA, M. P.; PEREIRA NETO, L. M.; NASCIMENTO, B. F.; FRAGA, T. J. M.; JAGUARIBE, E. F.; CAVALCANTI, J. V.; SOBRINHO, M. A. M. Açaí waste benefiting by gasification process and its employment in the treatment of synthetic and raw textile wastewater. **Journal of Cleaner Production**. Vol. 240, p. 1-12, 2019.

PROTÁSIO, T. P. **Biomassa residual do coco babaçu: potencial de uso bioenergético nas regiões Norte e Nordeste do Brasil**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014.

QIAO, Y.; XU, F.; MING, X.; FENG, S.; JI, Y.; JIANG, Y.; LI, J.; WANG, B.; TIAN, Y. Valorization of vegetable waste via pyrolysis: thermal behavior, volatiles release and products analysis from its extractives. **Energy Fuels**. Vol. 34, p. 1896-1907, 2020.

QUEIROZ, J. A. L.; MELÉM JR., N. J. Efeito do tamanho do recipiente sobre o desenvolvimento de mudas de açaí (*Euterpe oleracea* Mart.). **Revista Brasileira de Fruticultura**. Vol. 23, N° 2, p. 460-462, 2001.

RAMBO, M. K. D.; SCHMIDT, F. L.; FERREIRA, M. M. C. Analysis of the lignocellulosic components of biomass residues for biorefinery opportunities. **Talanta**. Vol. 144, p. 696-703, 2015.

RANGEL, R. N. **Modelagem, caracterização e simulação da pirólise do caroço de açaí**. Monografia (Engenharia de Energia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

REN, X.; MENG, X.; VOROBIEV, N.; SCHIEMANN, M.; LEVENDIS, Y. Carbon, sulfur and nitrogen oxide emissions from combustion of pulverized raw and torrefied biomass. **Fuel**. Vol. 188, p. 310-323, 2017.

SAIDUR, R.; ABDELAZIZ, E. A.; DEMIRBAS, A.; HOSSAIN, M. S.; MEKHILEF, S. A review on biomass as a fuel for boilers. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Vol. 15, p. 2262-2289, 2011.

SAN MIGUEL, G.; DOMÍNGUEZ, M. P.; HERNÁNDEZ, M.; SANZ-PÉREZ, F. Characterization and potential applications of solid particles produced at a biomass gasification plant. **Biomass and Bioenergy**. Vol. 47, p. 134-144, 2012.

SANTOS, R. E. J. **Estudo experimental de um reator de gaseificação em um leito fixo de açaí**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2011.

SASMAL, S.; GOUD, V. V.; MOHANTY, K. Characterization of biomasses available in the region of North-East India for production of biofuels. **Biomass and Bioenergy**. Vol. 45, p. 212-220, 2012.

SATO, M. K. **Biocarvão de resíduos de açaí como condicionante de solos**. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, 2018.

SILVA, A. V. S.; TORQUATO, L. D. M.; CRUZ, G. Potential application of fish scales as feedstock in thermochemical processes for the clean energy generation. **Waste Management**. Vol. 100, p. 91-100, 2019.

SILVA, J. B. S. **Avaliação das propriedades físico-químicas e térmicas de resíduos de podas urbanas e utilização em sistemas termoquímicos com fins bioenergéticos**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2019.

SILVA, J. B. S.; CRUZ, G. Potencial energético dos resíduos de podas urbanas e reaproveitamento por meio da produção de biocombustíveis. In: SANTANA, R. F.; ARAGÃO JÚNIOR, W. R.; EL-DEIR, S. G. (Orgs.). **Resíduos sólidos: desenvolvimento e sustentabilidade**. 1ª ed. Recife: EDUFRPE, p. 393-405, 2020.

SOUSA, A. C.; VIEIRA, P. J. C. **Estudo experimental da gaseificação do caroço de açaí**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Energia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

SOUTO, B. A.; SOUZA, V. L. C.; PERAZZINI, M. T. B.; PERAZZINI, H. Valorization of acai bio-residue as biomass for bioenergy: Determination of effective thermal conductivity by experimental approach, empirical correlations and artificial neural networks. **Journal of Cleaner Production**. Vol. 279, p. 1-12, 2021.

SOUZA, N. P.; REZENDE NETO, P. C.; BRASILEIRO, B. C.; KUHL, R. M.; MUNIZ, R. N.; SÁ, J. A. S.; ROCHA, B. R. P. Electricity generation from residual biomass: Project plant gasification Jenipaúba, Abaetetuba, PA. In: XI Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission Bioenergy for Electricity Generation and Ecological Issues in Power Plants, 2015, São José dos Campos, Book of Abstracts and Proceedings of 11th Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission – CLAGTEE, 2015.

TORQUATO, L. D. M.; CRNKOVIC, P. M.; RIBEIRO, C. A.; CRESPI, M. S. New approach for proximate analysis by thermogravimetry using CO<sub>2</sub> atmosphere: validation and application to different biomasses. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**. Vol. 128, p. 1-14.

VIRMOND, E.; SENA, R. F.; ALBRECHT, W.; ALTHOFF, C. A.; MOREIRA, R. F. P. M.; JOSÉ, H. J. Characterisation of agroindustrial solid residues as biofuels and potential application in thermochemical processes. **Waste Management**. Vol. 32, p. 1952-1961, 2012.

VITAL, A. A. B.; BORBA, J. E. M.; CARVALHO M. Geração de energia elétrica num condomínio residencial a partir da gaseificação de biomassa. In: SILVA, R. C. P.; SANTOS, J. P. O.; MELLO, D. P.; EL-DEIR, S. G. (Orgs.). **Resíduos sólidos: tecnologias e boas práticas de economia circular**. 1ª ed. Recife: EDUFRPE, p. 259-270, 2018.

WANG, S.; DAI, G.; YANG, H.; LUO, Z. Lignocellulosic biomass pyrolysis mechanism: A state-of-the-art review. **Progress in Energy and Combustion Science**. Vol. 62, p. 33-86, 2017.

WILLIAMS, A.; JONES, J. M.; MA, L.; POURKASHANIAN, M. Pollutants from the combustion of solid biomass fuels. **Progress in Energy and Combustion Science**. Vol. 38, p. 113-137, 2012.

YANG, Y. B.; RYU, C.; KHOR, A.; YATES, N. E.; SHARIFI, V. N.; SWITENBANK J. Effect of fuel properties on biomass combustion. Part II. Modelling approach – identification of the controlling factors. **Fuel**. Vol. 84, p. 2116-2130, 2005.