

Universidade do Estado do Pará
Centro de Ciências Naturais e Tecnologia
Curso de Bacharelado em Engenharia Ambiental e Sanitária



Celso Boulhosa Mendes Neto
Leon Gabriel Brasil Costa

**CAROÇOS DE AÇAÍ (*Euterpe oleracea M.*) COMO
ALTERNATIVA ENERGÉTICA PARA SUBSTITUIÇÃO DA
LENHA NA COCÇÃO ALIMENTAR EM MICRO FORNOS DE
PIZZARIAS**

BELÉM-PA
2023

Celso Boulhosa Mendes Neto
Leon Gabriel Brasil Costa

**CAROÇOS DE AÇAÍ (*Euterpe oleracea M.*) COMO ALTERNATIVA
ENERGÉTICA PARA SUBSTITUIÇÃO DA LENHA NA COCÇÃO
ALIMENTAR EM MICRO FORNOS DE PIZZARIAS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito para obtenção
do grau de Engenharia Ambiental e
Sanitária pela Universidade do Estado do
Pará.

Orientador: Prof. Dr (a). Marcelo José
Raiol Souza

BELÉM-PA
2023

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, pois Ele quem segurou as minhas mãos durante toda a minha vida, me abençoando, sendo meu escudo e me livrando de todo o mal. Sem a presença Dele, nada seria possível, pois, “O que é nascido de Deus vence o mundo; e esta é a vitória que vence o mundo: a nossa fé.” (1 João 5:4). Agradado, Senhor, pela oportunidade de estar de pé lutando pelos meus sonhos e desfrutando das Tuas maravilhas.

Agradeço também à minha família, minha maior fonte de inspiração, pelo apoio incondicional sempre que eu precisei. Aos meus pais, Celso dos Santos e Waldenice Rejany, que nunca mediram esforços para me proporcionarem bem-estar e as melhores oportunidades, mesmo em meio às dificuldades financeiras.

Agradeço à minha segunda mãe e avó, Rosália Maria, por sempre estar ao meu lado, dando todo suporte, amor, carinho e muitos ensinamentos que levarei para toda a minha vida.

À minha madrinha, Wilma Rosely, e ao seu esposo e meu tio, Jerre Louredo, pela bondade em seus corações e pelo suporte incondicional que a mim foi dado sempre que precisei. Agradeço a minha tia, Grace Waldeny, por sempre me incentivar na minha vida escolar e acadêmica, não me deixando perder o foco, sendo uma pessoa de extrema importância para o meu desenvolvimento e amadurecimento.

À minha namorada, Camila Fernandes, meu agradecimento por ser minha confidente e estar ao meu lado nos bons e nos maus momentos.

Ao meu orientador, Professor Marcelo Raiol, agradeço pela enorme contribuição para o nosso projeto com o seu vasto conhecimento, sendo sempre solícito e dando todo suporte que precisávamos para executar com êxito o nosso trabalho de conclusão.

Agradeço, por fim, aos meus amigos, os quais durante 5 anos eu pude compartilhar momentos únicos que guardarei para sempre em minhas memórias.

Celso Boulhosa Mendes Neto

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradecer a Deus pela saúde e pelas bênçãos que ele tem feito em minha vida. Além disso, não posso deixar de agradecer a minha família, colegas e amigos que contribuíram de alguma forma na minha caminhada durante essa graduação.

Gostaria de agradecer por todo o trabalho, atenção e ensinamentos prestados pelo nosso orientador Marcelo Raiol, que nos auxiliou excelentemente e contribuiu muito com a qualidade do trabalho.

Não poderia deixar de agradecer, também, aos demais professores e funcionários da Universidade do Estado do Pará, por terem agregado na minha formação acadêmica e como indivíduo.

Leon Gabriel Brasil Costa



CAROÇOS DE AÇAÍ (*Euterpe oleracea* M.) COMO ALTERNATIVA ENERGÉTICA PARA SUBSTITUIÇÃO DA LENHA NA COCCÃO ALIMENTAR EM MICRO FORNOS DE PIZZARIAS

Celso Boulhosa Mendes Neto: Graduando em Engenharia Ambiental e Sanitária; mendes1009@outlook.com

Leon Gabriel Brasil Costa: Graduando em Engenharia Ambiental e Sanitária; leon_bielbrasil@hotmail.com

Marcelo José Raiol Souza: Prof^o. Dr. em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia; mrailol@yahoo.com.br

RESUMO

Em vista das problemáticas da utilização de lenha, como a supressão vegetal gerada para atender a demanda de produção do material e os impactos ambientais da geração de gases e particulados na queima da biomassa, o estudo propõe a substituição deste material pela biomassa de caroço de açaí cominuído em micro fornos comerciais. Este resíduo apresenta alto potencial energético e grande disponibilidade por ser comercializado e descartado em diversos pontos da cidade de Belém. Para isso, objetivou-se demonstrar a viabilidade técnica da utilização desta biomassa, através da determinação das características termo físicas, comparar os impactos ambientais da emanção de gases e particulados dos materiais e apontar os impactos positivos e negativos da substituição. Os resultados iniciais apresentaram densidade aparente de $0,5075 \text{ g.cm}^{-3}$, por ser um material triturado e com maior compactação. Além disso, o material apresentou umidade de 9,13%, teor de carbono fixo de 19,64%, teor de voláteis de 79,10%, teor de cinzas de 1,27% e PCS de $4.601,80 \text{ Kcal.kg}^{-1}$, demonstrando ser uma biomassa de grande viabilidade para geração de calor com foco em produção alimentar. Ademais, o estudo mostrou que o PCS, a quantidade de energia total e a densidade energética deste material, para efeito de comparação, superaram a lenha, ao ter como base os padrões de consumo em volume de lenha no estabelecimento. Em relação as emissões de CO_2 , CO e particulados, o material cominuído mostrou ter menores concentrações emitidas quanto aos dois últimos contaminantes. Portanto, a biomassa proposta mostrou-se mais eficiente energeticamente que a lenha e contribui para atenuação de impactos ambientais da geração de gases poluentes e para a redução do acúmulo de resíduos na cidade.

Palavras-chave: Caroço de açaí cominuído; Eficiência energética; Gases e particulados;

ABSTRACT

In view of the problems of using firewood, such as the removal of vegetation generated to meet the demand for the production of the material and the environmental impacts of the generation of gases and particulates in the burning of biomass, the study proposes the replacement of this material by the açaí seed biomass. ground in commercial micro ovens. This waste has a high energy potential and great availability because it is marketed and discarded in various parts of the city of Belém. For this, the objective was to demonstrate the technical viability of using this biomass, through the determination of the thermophysical characteristics, to compare the environmental impacts of the emanation of gases and particulates from the materials and to point out the positive and negative impacts of the substitution. The initial results showed an apparent density of 0.5075 g.cm^{-3} , as it is a crushed material with greater compaction. In addition, the

material had a moisture content of 9.13%, fixed carbon content of 19.64%, volatile content of 79.10%, ash content of 1.27% and PCS of 4,601.80 Kcal.kg⁻¹, proving to be a highly viable biomass for heat generation with a focus on food production. Furthermore, the study showed that the PCS, the amount of total energy and the energy density of this material, for comparison purposes, surpassed firewood, when based on consumption patterns in volume of firewood in the establishment. Regarding CO₂, CO and particulate emissions, the comminuted material showed lower concentrations emitted for the last two contaminants. Therefore, the proposed biomass proved to be more energetically efficient than firewood and contributes to the mitigation of environmental impacts from the generation of polluting gases and to the reduction of waste accumulation in the city.

Keywords: Crushed açai seed; Energy efficiency; Gases and particulates;

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, a segunda maior fonte de combustível para cocção alimentar é a lenha (BRASIL, 2017). Este material ainda é extraído de forma imprópria e ilegal, principalmente em áreas de menor fiscalização, proporcionando a derrubada de inúmeras espécies arbóreas em diversos biomas brasileiros. A ausência de técnicas de exploração, o desmatamento ilegal e o monitoramento insuficiente são fatores que promovem esses danos (NDAGIJIMANA; PAREYN; RIEGELHAULP, 2015).

Para compreender o impacto da queima de lenha, segundo o autor Kurmar *et al.* (2016), somente no Estado de São Paulo, a quantidade média de lenha usada pelas pizzarias é de 48 toneladas por ano, correspondendo a um total de 7,5 hectares de floresta de eucalipto queimados por mês, tendo mais de 307 mil toneladas de madeira incineradas por ano, provocando um impacto de 321 quilogramas por dia de material particulado lançados para a atmosfera. Isso causa grande impacto na saúde da população e na qualidade do ar. Gioda (2018) conclui que no ano de 2016, em âmbito comercial, a taxa de emissão de dióxido de carbono em toneladas equivalente (tCO₂e) foi de aproximadamente 35.900.000 toneladas.

Além dos GEE's (Gases do Efeito Estufa), outra problemática ainda mais agressiva que altera as propriedades físicas e químicas da atmosfera e o pH da água, são os materiais particulados gerados durante a queima das biomassas (ARBEX *et al.*, 2004). Ainda de acordo com este autor, os particulados, tanto em ambientes internos como externos, apresentam maior toxicidade dentre todos os elementos emitidos na queima da lenha, atingindo o sistema respiratório e causando efeitos adversos para a saúde humana.

Arelado a necessidade de busca por alternativas para a produção de combustíveis, os autores (LIRA, 2018; PERES *et al.*, 2018) contribuem neste segmento ao expor o potencial das sementes de açai (*Euterpe oleracea*), subproduto do beneficiamento da polpa do açai, normalmente sem nenhum reaproveitamento, como alternativa para os processos de combustão e geração de energia mais sustentáveis, tendo em vista a sua disponibilidade, o seu poder calorífico e a possibilidade de reduzir os impactos da utilização de lenha.

No que concerne a disponibilidade, a Associação Brasileira dos Produtores Exportadores de Frutas e Derivados (ABRAFRUTAS) afirma que, no ano de 2018, mais de 150 mil litros de açai foram comercializados, apenas nos períodos de safra, tendo uma abrangência de mais de 5 mil pontos de vendas espalhados pela capital paraense (ABRAFRUTAS, 2018). No mesmo ano, conforma o dado da Associação dos Vendedores Artesanais de Açai de Belém e Região Metropolitana, cerca de 280 quilogramas de caroços foram produzidos diariamente em cada unidade que comercializa o produto (AVABEL, 2019).

Peres *et al.* (2018) contribui para essa perspectiva de falta de destinação econômica útil para os caroços de açaí, afirmando que este produto, além de não ser reutilizado, é geralmente descartado de maneira incorreta, promovendo inúmeros impactos ambientais oriundos do acúmulo de rejeitos em vias públicas e a possibilidade de proliferação de doenças. O autor conclui que o uso da biomassa para produção de energia térmica ou outra finalidade, geraria uma redução destes problemas, além de dar um destino ambientalmente correto para o produto.

Por fim, no que tange ao processo energético dos caroços do açaí, o estudo de Lira (2018) identificou um alto poder calorífico e potencial energético, sendo, respectivamente, em média 4.505 kcal/kg e 40.800 MWh/mês, chegando à conclusão que esta biomassa pode ser explorada como uma alternativa fundamentada no desenvolvimento sustentável, substituindo outros produtos que geram impactos ambientais notórios ao planeta. Portanto, deve-se considerar esta biomassa como uma fonte alternativa para a geração de energias diversas, devido seu elevado poder calorífico.

2. OBJETIVOS

2.1. Geral

O presente trabalho tem o objetivo de demonstrar a viabilidade técnica da utilização de caroços de açaí na substituição da lenha utilizada como combustível na cocção em micro fornos comerciais de pizzarias.

2.2. Específicos

- Determinar as características termo físicas dos caroços de açaí cominuídos para combustão em fornos de pizzaria;
- Quantificar e comparar os possíveis impactos ambientais causados pela emissão de gases e materiais particulados oriundos do processo de combustão dos caroços de açaí cominuídos e da lenha;
- Demonstrar os impactos positivos e negativos da utilização dos caroços de açaí cominuídos;

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. Panorama Geral da Utilização de Lenha e suas Problemáticas

Para Gioda (2018), os estudos estatísticos e análises a respeito da produção energética proveniente da lenha no Brasil são escassos. Isso ocorre principalmente devido as diversas formas de manipulação e a produção informal da biomassa. No entanto, apesar deste fato, o IBGE, estimou que a extração vegetal de lenha em 2020 no Brasil foi de aproximadamente 50 milhões de m³, sendo a segunda atividade de silvicultura, atrás somente da produção de madeira em toras (IBGE, 2020).

A nível estadual, o Pará, apesar de não ser um dos maiores produtores de lenha do país, se caracteriza pela grande dependência desta biomassa para cocção. Segundo os dados da Pesquisa Nacional por Domicílios PNAD, no estado, mais de 45% dos domicílios dependem deste aparato natural para subsistência (IBGE, 2018; GIODA, 2019).

Entretanto, a grande problemática da utilização de lenha consiste nos impactos gerados, como o desmatamento, principalmente promovido pelo manejo informal devido à falta de fiscalização das matas nativas. Além disso, é válido ressaltar os efeitos da combustão deste material, que acarreta grandes quantidades emanadas de gases do efeito estufa (CO₂, CO, CH₄ e N₂O) e os particulados que atingem o sistema respiratório humano. O Balanço Energético Nacional (BEN) registrou em 2016 as taxas de emissões dos principais GEE propagadas pelo processo de cocção alimentar, para um período compreendido em 100 anos, comprovando os efeitos negativos ao meio ambiente (BEN, 2017; GIODA, 2018).

Tabela 1: Comparativo entre os principais insumos propagadores dos GEE's.

Consumo em 2016	Consumo (TJ)	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	Total	
		Tonelada de gás por TJ			tCO ₂ e				
GLP	10,758x 10 ⁶ m ³	2,72 x10 ⁵	63,1	5	0,1	1,71 x 10 ⁷	3,80 x 10 ⁷	7,20 x 10 ⁶	6,24 x 10 ⁷
Lenha	19,561x 10 ⁶ t	2,54 x10 ⁵	119,9	300	4	3,04 x 10 ⁷	2,13 x 10 ⁹	2,69 x 10 ⁸	2,43 x 10 ⁹
Carvão Vegetal	6,64x 10 ⁵ t	1,80 x10 ⁴	101,4	200	1	1,82 x 10 ⁶	1,01 x 10 ⁸	4,76 x 10 ⁶	1,07 x 10 ⁸
Gás natural	4,05x 10 ⁸ m ³	1,49 x10 ⁴	56,1	5	0,1	8,37 x 10 ⁵	2,09 x 10 ⁶	3,95 x 10 ⁵	3,32 x 10 ⁶
Querosene	3,0x 10 ³ m ³	1,03 x10 ²	71,9	10	0,6	7,42 x 10 ³	2,89 x 10 ⁴	1,64 x 10 ⁴	5,27 x 10 ⁴

Fonte: Adaptado de Gioda (2018)

Na tabela 1 é possível identificar que o material que mais gerou os GEE foi a combustão de lenha, principalmente se tratando das emissões de CO₂, com uma estimativa de 3,04x10⁷. Somente em estabelecimentos comerciais, a estimativa realizada no ano de 2016 constatou que aproximadamente 3,59x10⁷ toneladas de CO₂ foram emitidos para a atmosfera (GIODA, 2018; GIODA, 2019).

De acordo com Arbex *et al.* (2004), os elementos mais nocivos para a saúde humana e que afetam diretamente as vias respiratórias são os materiais particulados gerados na combustão dessas biomassas. Diversos problemas à saúde humana podem ser desencadeados, principalmente os processos inflamatórios. Os particulados também podem ser nocivos ao meio ambiente, pois estes materiais interagem diretamente com diversas substâncias químicas da atmosfera, causando mudanças nas dinâmicas climáticas e nos ciclos naturais. (GUARIEIRO *et al.*, 2013).

3.2. Caroços de açaí: Características Gerais e Disponibilidade

O açaizeiro (*Euterpe* Mart.) se caracteriza por ser uma espécie endêmica da região amazônica, podendo apresentar 2 colorações diferentes, o açaí roxo ou preto e o açaí branco, que são variabilidades dessa espécie. De modo geral, as espécies mais comuns na região amazônica são a *Euterpe oleracea* Mart. e a *Euterpe Precatória* Mart., sendo a primeira a mais presente no cotidiano paraense, pois é a mais utilizada para extração da polpa (VIANNA, 2020).

O fruto extraído (açaí) possui um alto valor econômico e cultural para região e é altamente consumido e comercializado em pontos de vendas, principalmente na capital paraense, onde se contabilizam mais de 5 mil estabelecimentos (CORDEIRO *et al.*, 2017; ABRAFRUTAS, 2018). Em relação a produção do fruto no ano de 2020, cerca de 220.489 toneladas foram produzidas em âmbito nacional, enquanto, somente no estado do Pará, essa produção foi de 149.671, totalizando aproximadamente 70% da produção nacional (IBGE, 2021).

Figura 1: Comercialização do açaí em uma feira local.



Fonte: G1 Pará (2018)

No entanto, no processo do beneficiamento do açaí, ao ponderar os dados de alguns autores, foi possível identificar que, em média, apenas 16,7% do fruto é aproveitado para a elaboração do suco do açaí, enquanto 83,3% torna-se resíduo (IBGE, 2003; FARINAS *et al.*, 2009; MOREIRA, SOUZA, 2020). No ano de 2017, a exemplo, foi gerado uma quantidade próxima de 117.788 toneladas do resíduo no estado do Pará (MOREIRA; SOUZA 2020), onde, somente município de Belém, cada ponto de comercialização produziu cerca de 280 quilogramas do resíduo diariamente em 2018 (AVABEL, 2019).

Essa problemática é preocupante tendo em vista que esse material ainda possui uma insuficiente destinação econômica ou ambientalmente correta, ocasionando diversos impactos ambientais, tais como: alagamentos, assoreamento, poluição dos corpos hídricos quando descartados às margens e possíveis proliferações de patógenos, como a doença de Chagas (BUFALINO *et al.*, 2018; DOL, 2020).

3.3. Potencial Energético e as Características Físico-químicas do Fruto

O uso do caroço de açaí como um material de potencial para a geração de energia térmica é uma realidade em diversas empregabilidades, seja por briquetes, pellets e gaseificação. Alguns fatores que garantem um aproveitamento dessa biomassa estão destacados na Tabela 1, onde é possível verificar propriedades como a de umidade, hemicelulose, celulose e lignina, sendo de suma importância para analisar o potencial energético do material com a queima (KÜHL; OLIVEIRA, 2019).

Tabela 2: Análise química dos caroços

Item analisado	Porcentagem
Umidade	13,60%
Extrato Estéreo	3,01%
Extrato Alcoólico	9,32%
Extrato Aquoso	2,80%
Proteínas Brutas	4,34%
Hemicelulose	12,26%
Celulose	34,41%
Lignina	7,73%
Cinzas	1,34%

Fonte: Kühl e Oliveira (2019)

Vale destacar que o caroço de açaí é rico em celulose, hemicelulose, lipídeos e cristais de inulina, componentes importantes a serem observados em materiais com finalidades de queima, justamente por serem propriedades importantes na indicação de um material adequado para esta finalidade (REIS *et al.*, 2002, p. 03).

Os autores Netto *et al.* (2006) e Nagaishi (2007) enaltecem, também, a importância do percentual de carbono fixo, o teor de voláteis e o teor de cinzas, para a avaliação do potencial energético dos caroços. Dessa forma, nos respectivos trabalhos desses autores, foram coletados os dados dessas análises do material e efetuada a média, apontando um valor percentual de carbono fixo de 17,80%, para o teor de voláteis a média é de 77,1% e o teor de cinzas apresentou uma média de 1,28% (NETTO *et al.*, 2006; NAGAISHI 2007; AZEVEDO 2011; PERES *et al.*, 2018).

Tabela 3: Poder calorífico superior dos caroços de açaí

AUTORES	PCS (Kcal/Kg)
Netto <i>et al.</i> (2006)	4.576
Nagaishi (2007)	4.252
Azevedo (2011)	4.333
Lira (2018)	4.505
Passinho <i>et al.</i> (2019)	4.858

Fonte: Adaptado de Netto *et al.* (2006), Nagaishi (2007), Azevedo (2011), Lira (2018) e Passinho *et al.* (2019).

Ao avaliar o potencial estabelecido pelos autores (Tabela 2), é possível chegar a uma média a partir dos valores encontrados na literatura, desta forma, obteve-se um Poder Calorífico Superior médio, para o caroço de açaí, de 4.720 kcal/kg. O PCS do caroço de açaí quando comparado com o poder calorífico da lenha comercial (*Eucalyptus* sp.), que varia de 4.540 kcal/kg a 4.660 kcal/kg (CARNEIRO *et al.*, 2014), aponta uma breve vantagem energética.

3.4. Legislação Voltada Para a Disposição de Resíduos Sólidos

A maioria das matérias-primas extraídas da natureza são subutilizadas, pois o uso normalmente ocorre de maneira excessiva para suprir as necessidades da civilização, gerando um desperdício acentuado e contínuo desses recursos, tendo como consequência a produção de abundante de resíduos, o que sem destinação adequada polui o meio ambiente. Essas atividades proporcionam um desequilíbrio tanto para escassez de recursos naturais, quanto para o aumento de resíduos nas cidades (QUIRINO; SANTOS; VASCONCELLOS NETO, 2017).

Oliveira Neto *et al.* (2015) afirma que para findar essas problemáticas, é de extrema importância buscar o desenvolvimento através do tripé da sustentabilidade, contemplando aspectos ambientais, econômicos e sociais, haja vista que, embora conflitantes no meio capitalista, as empresas estão cada vez mais preocupadas em gerar menos impactos, pois se criou a exigência em ter produções mais limpas com o intuito de agregar valor ao produto, mantendo a alta competitividade de mercado. Logo, é de suma importância concretizar uma nova perspectiva moldada conforme os preceitos do tripé, para se adequar a nova ordem mundial da economia verde (KÜHL e OLIVEIRA, 2019).

O Brasil, buscando se adequar ao cenário de alternativas energéticas a partir de fontes renováveis e destinos ambientalmente corretos para os resíduos, instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos, estabelecida pela Lei Federal n.º 12.305 de 2010, que criou as normas referentes a gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, atribuindo responsabilidade aos geradores e ao poder público, além de ressaltar, em um dos instrumentos legais, o incentivo as práticas de aproveitamento energéticos oriundos de resíduos, ao passo que demonstrem viabilidade técnica e ambiental certificada (BRASIL, 2010; KÜHL, OLIVEIRA, 2019).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Tipologia de Pesquisa Científica

O estudo visa comprovar, por meio de dados quantitativos e qualitativos, a aplicabilidade do uso do caroço do açaí como uma fonte energética alternativa adequada para combustão em pizzarias, tendo em vista seu papel energético e sua baixa interferência no alimento. Vale ressaltar, que se trata de uma pesquisa explicativa com caráter quantitativo, por se basear na coleta de dados em bibliografia e de campo, por meio de gráficos e tabelas, e qualitativo, por realizar a análise descritiva de outros autores e utilizar-se de experiências empíricas. Além disso, trata-se de uma pesquisa aplicada, na qual é possível gerar conhecimento para a aplicação prática (GERHARDT; SILVEIRA, 2009).

4.2. Procedimento de Campo

Inicialmente, foi realizada a pesquisa de campo em um estabelecimento de Belém, que cedeu o espaço para análises e estudos da parte prática, consistindo na observação do processo de fabricação de pizza com o intuito de obter dados referentes a aplicação da lenha, as emissões de gases e particulados e as características energéticas da lenha. Posteriormente, em ambiente simulado, foram feitas as mesmas análises com os caroços de açaí, expondo, por fim, a comparação entre os dois produtos estudados e os pontos positivos do uso da última biomassa, quanto a eficiência energética e impactos ambientais gerados.

4.3. Alterações necessárias no material estudado

A partir das coletas de informações iniciais, notou-se que os caroços de açaí, em seu formato original (Figura 2), apresentaram resultados insatisfatórios no processo de queima nos fornos, devido à sua alta resistência à combustão, dada as suas características isométricas, como a esfericidade e a camada externa rígidas presentes nestes materiais, o que dificultou o processo inicial de abrasamento e a sua progressão da queima.

Figura 2: Caroços de açaí secos.



Fonte: Portal Amazônia (2022)

De acordo com Passinho *et al.* (2019), o material *in natura*, é utilizado adequadamente em caldeiras e em fornos industriais por operarem com altas temperaturas (1000°C) e pressões que diferem da realidade dos micros fornos com a finalidade de produção alimentar. Em geral, os fornos precisam manter uma temperatura entre 250°C e 400°C para a produção de alimentos como pizzas ou massas (REEMAQ, 2022).

Dessa forma, entendendo que os ambientes são distintos, houve a necessidade de alterar as propriedades físicas do material para o cominuído, a fim de facilitar o processo de combustão dos caroços e potencializar as características energéticas presentes na biomassa.

4.4. Lista de Materiais Utilizados

Para obter os resultados propostos por meio dos objetivos do estudo, foi necessário o manuseio de alguns equipamentos técnicos, listados na Tabela 4. Os itens descritos se subdividem em 3 segmentos, chamados de módulos de quantificação, módulos de dimensionamento e módulos de procedimento. Estes módulos apresentam os equipamentos técnicos utilizados para quantificação da emissão de gases, o dimensionamento espacial das amostras avaliadas e os procedimentos adotados para alcançar os resultados propostos, respectivamente.

Tabela 4: Lista de materiais e equipamentos técnicos utilizados.

Segmento	Materiais	Objetivos
Módulos de quantificação	Detector de Qualidade do Ar (Kailishen)	Detectar o nível de materiais particulados no ar
	Medidor de Co ₂ e Temperatura (Rosh JSM-131)	Detectar o nível de dióxido de carbono no ar e temperatura
	Medidor de Monóxido de Carbono (DG-5080)	Detectar o nível de monóxido de carbono presente no ar
Módulos de dimensionamento	Balança Analítica de Precisão (Shimadzu AY220)	Detectar a massa dos materiais estudados
	Paquímetro (Salvi Casagrande)	Medir dimensões dos recipientes
	Placa Petri	Recipiente utilizado para conter as amostras e dimensionar densidade
Módulos de procedimentos	Balde Adaptado	Filtrar impurezas das amostras de caroço de açaí
	Cadinho	Recipiente utilizado para conter as amostras
	Dessecador	Resfriamento do cadinho
	Estufa	Remoção de umidade das amostras
	Forno de simulação	Ambiente simulado para a análises dos experimentos
	Forrageiro (TRF 80 Junior)	Triturar as amostras
	Peneiras (0,2 mm; 0,71 mm; 0,84 mm)	Filtrar impurezas das amostras de caroço de açaí

Fonte: Autores (2022)

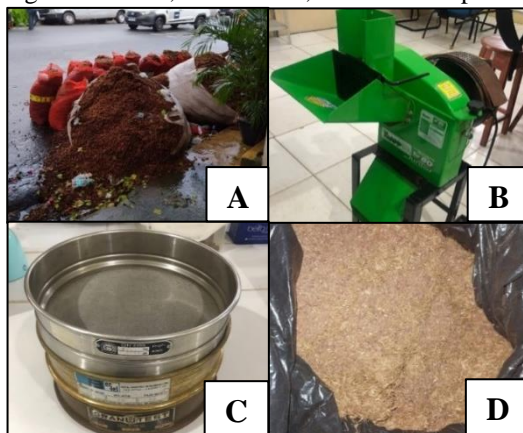
4.5. Procedimentos Laboratoriais

4.5.1 Produção do Material Cominuído

Os caroços de açaí foram coletados em frente a um ponto de venda ao lado da UEPA onde ficam estocados em grandes sacas, conforme a Figura 3, à espera da coleta periodicamente realizada pela prefeitura de Belém ou por terceiros. Após a coleta, o material foi levado ao laboratório de Morfologia e Anatomia da Madeira da UEPA onde

foi submetido à estufa durante 24 horas a 100°C para a secagem e, logo em seguida, peneirado com auxílio de duas peneiras de granulometrias diferentes (0,71 mm; 0,84 mm) segundo a Figura 3C, para remoção dos resquícios matéria orgânica das amostras (resto de polpa seca, folhas etc.). Posteriormente, foi realizado a trituração dos caroços em um forrageiro de modelo Trapp TRF 80 Junior, como mostra a Figura 3B, para obter o material proposto.

Figura 3: Coleta e tratamento dos caroços de açaí. A: Coleta do material *in natura*; B: Forrageiro TRF 80; C: Peneiras; D: Material após trituração.



Fonte: Autores (2022)

4.5.2. Determinação da Densidade Aparente

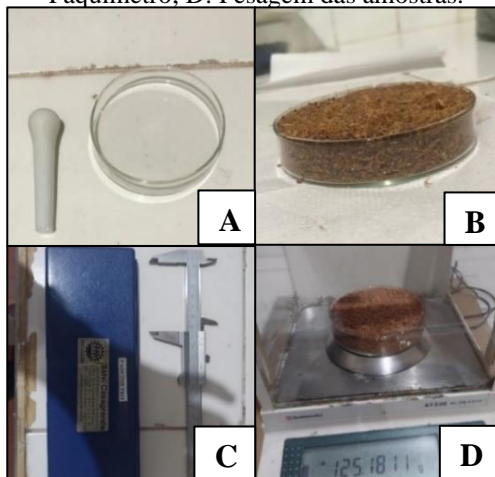
Para a determinação da densidade aparente, foi necessário acesso ao laboratório de Química Experimental da UEPA. A análise foi realizada através da Equação 1, sendo derivada da equação geral de densidade. Utilizou-se uma placa Petri, uma balança analítica e o paquímetro para calcular a densidade do material estudado. As amostras foram compactadas no recipiente para preencher ao máximo os espaços vazios. Quanto aos caroços cominuídos, utilizou-se o método de retenção de umidade durante 7 dias ao ar livre para realizar o experimento proposto, onde a massa do material com umidade é chamada de P2.

Para a lenha, utilizou-se como base a densidade comercial do material de 390 kg/m³ (EPE, 2020).

$$D = m/V$$

$$D(\text{g/cm}^3) = P2/(\pi \cdot d^2 \cdot h/4) \quad (1)$$

Figura 4: Determinação da densidade aparente. A: Placa Petri; B: Material compactado no recipiente; C: Paquímetro; D: Pesagem das amostras.



Fonte: Autores (2022)

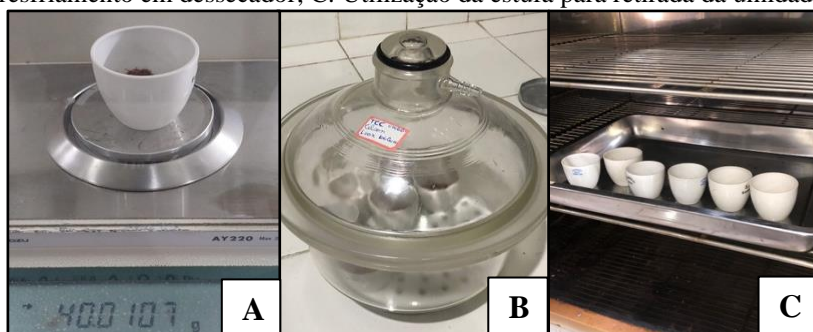
4.5.3. Determinação do Teor de Umidade

Para o teor de umidade (TU), utilizou-se o laboratório de Química Experimental, o qual possibilitou o acesso aos cadinhos, dessecador e balança analítica para verificação da massa antes e após a secagem, e de Morfologia e Anatomia da Madeira, que disponibilizou a estufa para a secagem das amostras. O método consistiu em utilizar 6 cadinhos, livres de umidade, ao ficarem durante 1 hora na estufa e posteriormente no dessecador por 30 minutos para resfriamento, a fim de realizar a pesagem da massa de caroço cominuído antes e após a secagem.

O cálculo foi realizado a partir da Equação 2, que está expresso em forma de porcentagem, onde se utilizou como referência a massa inicial (P1) a qual foi submetida à estufa para secagem a 100° C durante 24 horas, e a massa final (P2), que foi verificada após as amostras passarem por um período de estabilização ao ar livre durante 7 dias. Esta metodologia foi adaptada de Carrera e Monteiro (2021) a partir da interpretação do método de Souza e Vale (2016).

$$TU (\%) = [(P2 - P1) / P1] \times 100 \quad (2)$$

Figura 5: Determinação da umidade dos caroços cominuídos. A: Pesagem das amostras; B: Processo de resfriamento em dessecador; C: Utilização da estufa para retirada da umidade.



Fonte: Autores (2022)

4.6. Análise Comparativa das Propriedades Físico-químicas dos Caroços Cominuídos e da Lenha

Os estudos comparativos dos materiais em questão foram realizados a partir do levantamento de dados expostos nas principais literaturas que trazem informações das propriedades físico-químicas destas biomassas, tais como, Teor de Cinzas, Teor de Materiais Voláteis e Teor de Carbono Fixo, com exceção do teor de umidade, cujos testes foram realizados em laboratório.

Essas informações são de cunho essencial, pois viabilizam um entendimento maior a respeito do comportamento dos resíduos durante a combustão, bem como sua eficiência térmica e energética. O Teor de Cinzas quantifica o percentual de material inorgânico que estão presentes no material em forma de óxidos. Os Materiais voláteis são substâncias que se desprendem durante a carbonização. Já o Teor de Carbono Fixo indica a taxa de materiais que ficam retidos no material após o processo térmico.

4.7. Poder Calorífico Superior

O Poder Calorífico Superior (PCS) é determinante para a viabilizar a utilização da biomassa como insumo térmico, pois esse parâmetro identifica a quantidade de energia liberada no processo de combustão. Para calcular este item, foi adaptado o método utilizado por Carrera e Monteiro (2021) com base na literatura de Parikha, Channiwalab e Ghosalc (2005), o qual visa correlacionar dados de Carbono Fixo, Teor de Voláteis e Teor de Cinzas, através da Equação 3, que segue o modelo de erro chamada Erro Absoluto Médio Percentual (MAPE) de 3,71%. Vale ressaltar que houve a necessidade de mudar a unidade para kcal.kg⁻¹ para padronizar os dados pelo fator de conversão 238,85.

$$\text{PCS (kcal.kg}^{-1}\text{)} = [(0,3536 \text{ CF}) + (0,1559 \text{ TV}) - (0,0078 \text{ TC})] \times 238,85 \quad (3)$$

4.8. Eficiência Energética

A análise de eficiência energética consistiu na comparação entre o caroço cominuído e a lenha, tendo como referência o volume de lenha utilizado mensalmente no estabelecimento de 8 m³. Logo, buscou-se identificar qual das biomassas apresentaria maiores vantagens energéticas tendo as mesmas dimensões volumétricas.

Primeiramente, foi avaliado qual a massa total (Mt) e a quantidade de energia (Q) presente no volume de lenha estabelecido anteriormente, sendo esta medida o parâmetro para avaliação energética comparativa, conforme é mostrado nas Equações 4 e 5, considerando o valor do PCS obtido anteriormente na Equação 3 e considerando os valores das massas obtidas na Equação 4, como requisito para identificar o Q.

Em sequência, estimou-se a densidade energética (DE) com base nas densidades encontradas para a lenha (EPE, 2020) e caroços de açaí cominuídos, de acordo a Equação 5. Outrossim, o estudo avaliou o rendimento energético (R), conforme a Equação 7, utilizando como base os quocientes de PCS dos caroços cominuídos (PCSc) e da lenha (PCSl).

É válido ressaltar que as informações energéticas para o caroço de açaí foram obtidas a partir de adaptações dos modelos matemáticos do estudo Carrera e Monteiro (2021). Em relação às informações energéticas da lenha, utilizou-se como referência os dados do Balanço Energético Nacional (EPE, 2020), que expõem as características da lenha comercial.

$$\text{Mt (kg)} = 8 \text{ m}^3 \times \text{D (kg.m}^{-3}\text{)} \quad (4)$$

$$\text{Q (kcal)} = \text{PCS (kcal.kg}^{-1}\text{)} \times \text{Mt} \quad (5)$$

$$\text{DE (kcal.m}^{-3}\text{)} = \text{PCS (kcal.kg}^{-1}\text{)} \times \text{D (kg.m}^{-3}\text{)} \quad (6)$$

$$\text{R} = (\text{PCSc}/\text{PCSl}) \quad (7)$$

Ademais, foi avaliado o comportamento térmico comparativo dos materiais durante o processo de combustão no forno de estudo do estabelecimento comercial. A análise ocorreu ao longo de 30 minutos de utilização de lenha e de caroço de açaí cominuído, separadamente, onde buscou-se correlacionar as informações encontradas através das Equações 4, 5, 6 e 7 aos valores térmicos obtidos.

4.9. Análise Estatística

A partir da obtenção dos dados brutos, foi utilizada a técnica da análise estatística descritiva no *software* Microsoft Excel para a obtenção da tendência central e variabilidade, que consiste em determinar a média e o desvio padrão, com exceção para o coeficiente de variação que não se encaixa na metodologia, haja vista que o estudo apresenta poucas amostragens.

Em relação à estatística inferencial, foi realizado o estudo da média da população e análise da variância para a densidade aparente e umidade dos caroços de açaí cominuídos, onde se construiu um intervalo de confiança, no qual podem estar os valores possíveis para os parâmetros populacionais, através do teste t (teste de hipóteses). Foi utilizado o teste t, pois para amostragens pequenas é o que mais se encaixa. O software utilizado foi o RStudio, onde o nível de confiança foi de 95% ($\alpha \leq 0,05$).

O comportamento térmico foi exposto através de um gráfico com informações de temperatura de produção por unidade de tempo. Utilizou-se linhas de tendências polinomiais para alcançar melhor ajuste no R², que chegou a aproximados 99% e 97% para a lenha e para o caroço de açaí cominuído, respectivamente, quanto a proximidade da linha de regressão.

4.10. Emissões Atmosféricas e Análise Comparativa com as Normas Vigente

Foram realizadas simulações no micro forno do estabelecimento como intuito de quantificar as emissões de gases e particulados gerados a pleno funcionamento durante a produção das iguarias do local. Após a coleta dos dados, foi feita a avaliação comparativa com as normas vigentes expostas na Tabela 5 para verificar se a saída do processo térmico está respeitando os limites de emissões permitidos.

De acordo com a Tabela 5, as normas consultadas foram a NR-15, que trata a respeito dos limites de tolerância para as atividades e operações insalubres que podem causar danos à saúde do trabalhador (MTP, 2020), e as Resoluções CONAMA nº 436 e 491, cujos objetivos são estabelecer os limites máximos de emissões de poluentes atmosféricos e determinar os padrões de qualidade do ar, respectivamente.

Tabela 5: Parâmetros normativos de emissões atmosféricas

Normas	Fator avaliado
NR-15	CO
NR-15	CO ₂
Resolução CONAMA nº 436	MP
Resolução CONAMA nº 491	Padrões de qualidade do ar

Fonte: MMA (2011); MMA (2018); MTP (2020).

Dessa maneira, utilizaram-se equipamentos técnicos mostrados na Figura 6, para determinar o nível de CO, CO₂ e materiais particulados (MP₁₀, MP_{2.5}). As medições foram realizadas em triplicatas a cada 5 minutos, partindo do minuto 0, ao longo de 30 minutos de funcionamento do forno.

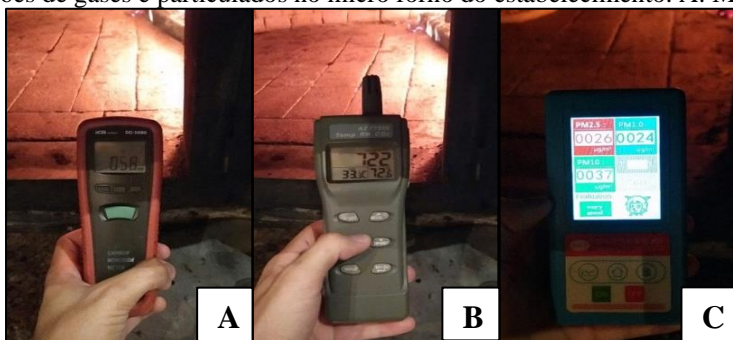
Figura 6: Medidores de emissões de gases e particulados. A: Medidor de Monóxido de Carbono (DG-5080); B: Medidor de Co2 e Temperatura (Rosh JSM-131); C: Detector de Qualidade do Ar (Kailishen)



Fonte: Autores (2022)

Vale ressaltar que as medições não foram aferidas na saída da chaminé do micro forno, o que traria resultados mais satisfatórios, devido aos riscos de acidentes e a ausência de equipamentos de segurança para tal finalidade. Logo, as análises foram realizadas na coifa superior do micro forno, conforme mostrado na Figura 7, para se obter informações mais consistentes dentro da realidade do estudo.

Figura 7: Medições de gases e particulados no micro forno do estabelecimento. A: Medição de CO₂; B:



Fonte: Autores (2022)

As análises de emissões realizadas nos aparelhos medidores de CO₂ e CO que estão expostos nas Figuras 7A e 7B, tiveram um período total de 30 minutos, onde foram submetidas 6 verificações, a cada 5 minutos, considerando os valores no tempo inicial iguais a 0, que representa o período antes de iniciar o processo de combustão.

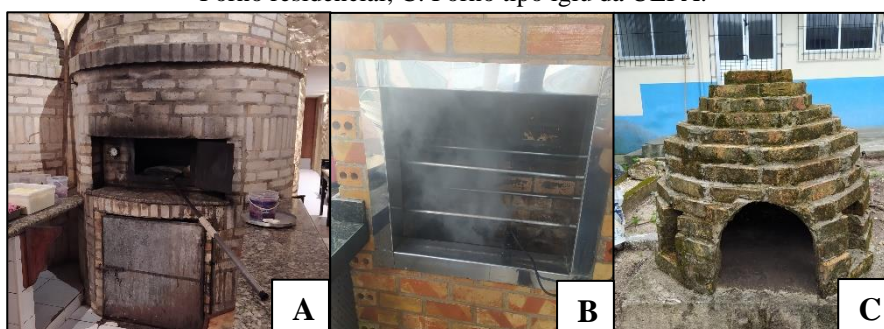
Na determinação dos particulados, conforme a Figura 7C, as métricas de medição seguiram os mesmos padrões dos gases citados. Os materiais analisados foram os particulados com diâmetro aerodinâmico menor do que 2,5 μm e 10 μm que são, respectivamente, MP_{2,5} e MP₁₀.

4.11. Análise Qualitativa das Características de Combustão dos Micros Fornos

Durante os ensaios nos micros fornos, o estudo avaliou algumas características qualitativas importantes, tendo como base o *modus operandi* desses equipamentos, as condicionantes de queima, como, por exemplo, a necessidade de se utilizar materiais extras para potencialização do processo térmico, o modo de manejo e armazenamento dos combustíveis térmicos e a adaptabilidade dos micros fornos ao material proposto pela pesquisa. Este levantamento ocorreu de maneira empírica, fundamentado nas averiguações durante o decorrer do estudo nos fornos cedidos para as análises, que estão presentes na Figura 8.

Vale ressaltar que a atratividade do carvão cominuído para o âmbito comercial é influenciada diretamente pelos resultados dessas análises, haja vista que podem ou não agregar em custos adicionais para a implementação nesses espaços comerciais, afetando diretamente o interesse dos proprietários.

Figura 8: Fornos de simulação utilizados no estudo. A: Forno à lenha do estabelecimento comercial; B: Forno residencial; C: Forno tipo iglu da UEPA.



Fonte: Autores (2022)

A Figura 8A mostra o forno à lenha de produção da pizzaria no qual foram realizadas todas as análises definitivas para o estudo, como as quantificações das emissões atmosféricas, análise térmica de produção comparativa entre os materiais de estudo e os aspectos qualitativos avaliados durante a queima do material cominuído.

As figuras 8B e 8C apresentam, respectivamente, um forno residencial e um forno tipo iglu disponibilizado pela UEPA, os quais foram utilizados para a realização de experimentos prévios importantes para percepção, à priori, das características de queima dos caroços cominuídos quanto a odores, emanação de gases, particulados e fumaça gerada. Esses estudos iniciais foram importantes para identificar possíveis problemas durante a combustão da biomassa em questão antes de levá-la ao estabelecimento comercial.

4.12. Análise de Impactos Positivos e Negativos da substituição da Lenha

Diante dos resultados coletados em campo e com as informações encontradas na literatura, será realizada uma análise descritiva dos pontos negativos e positivos do uso do caroço de açaí, tendo como base as informações comparativas das gráficas e tabelas expostos nos tópicos anteriores. Dessa forma, será considerada a proporção de resultados positivos em relação aos negativos e assim, será concluído se o material tem respaldo técnico e se atende aos critérios do tripé sustentável: vantagem econômica, ambiental e social.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Propriedades Físicas Obtidas em Laboratório

5.1.1. Densidade Aparente

Ao cominuir os caroços de açaí, foi possível realizar a densificação energética do material, pois em granulometrias bem inferiores ao da biomassa original permite-se o maior adensamento e maior quantidade de calor na queima ao compará-lo com o seu estado original (GRANADO; ROSSI; CONTI, 2018), o que pode ser atrativo tendo em vista o cenário comercial que precisa de maiores densidades energéticas em volumes inferiores. O estudo de Kaliyan e Morey (2009) ainda afirma que essas características são interessantes, pois proporcionam uma abrangência maior tendo em vista a área da superfície do material e interação de forma mais consistente na queima.

A análise da densidade aparente presente na Tabela 6 apresentou média de 0,5075 g.cm⁻³ ou 507,5 kg.m⁻³ e desvio padrão de 1,03, representando baixa variação amostral. De acordo com Quirino *et al.*, (2012), biomassas com maiores índices de densidade aparente são mais atrativas, pois esta característica está diretamente ligada ao aumento da densidade energética.

Tabela 6: Análise da densidade aparente das amostras de caroços de açaí cominuídos.

Amostras	Massa das amostras (g)	Densidade aparente (g.cm ⁻³)
A6	69,8132	0,4991
A5	71,2983	0,5097
A4	70,4060	0,5033
A3	72,7270	0,5199
A2	69,2243	0,4948
A1	72,5297	0,5185
MÉDIA	70,9998	0,5075
D.Padrão (%)		1,0287
Variância (%)		0,0106
Limite 1 (%)		0,4967
Limite 2 (%)		0,5183

Fonte: Autores (2022)

*O intervalo de confiança para uma média da população, usando uma distribuição t de Student, a 95% de confiança e quantidade amostral de 6, foi utilizado $T = 2,571$. Os limites 1 e 2 definem os limites inferiores e superiores para a amostragem.

Logo, conclui-se que os valores encontrados para um resíduo triturado são altamente recomendáveis para o âmbito comercial, pois apresenta densidade superior a materiais como a lenha comercial de eucaliptos, que possui $0,390 \text{ g.cm}^{-3}$. Além disso, o material cominuído ainda supera os briquetes provenientes de resíduos agroflorestais, que apresentaram no estudo de Dias Júnior, Andrade e Costa Júnior (2014) valores entre $0,21$ a $0,47 \text{ g.cm}^{-3}$.

5.1.2. Umidade

O teor umidade dos materiais pode interferir no processo de queima de modo a ser necessária uma quantidade maior de energia para retirá-lo, o que não é viável em termos de eficiência energética. A literatura de Seye *et al.* (2008), afirma que um teor de umidade de até 14% é o ideal para não interferir na combustão do material. A tabela 7 abaixo apresenta o teor de umidade dos caroços cominuídos que foram coletados nas análises laboratoriais, tendo o desvio padrão de 0,3197% e variância de 0,0010%, o que indicam valores com mais proximidades uns dos outros, portanto, maior confiabilidade aos dados encontrados.

Tabela 7: Análise do teor de umidade das amostras de caroços de açaí cominuídos.

Amostras	Massa úmida (g)	Massa seca (g)	Massa de água (g)	TU%
A6	5,0078	4,5929	0,415	9,03
A5	5,0152	4,5762	0,439	9,59
A4	5,0014	4,5768	0,425	9,28
A3	5,0093	4,5886	0,421	9,17
A2	5,0008	4,5834	0,417	9,11
A1	5,0133	4,6156	0,398	8,62
MÉDIA	5,01	4,59	0,42	9,13
D.Padrão (%)				0,3197
Variância (%)				0,0010
Limite 1 (%)				8,80
Limite 2 (%)				9,47

Fonte: Autores (2022)

*O intervalo de confiança para uma média da população, usando uma distribuição t de Student, a 95% de confiança e quantidade amostral de 6, foi utilizado $T = 2,571$. Os limites 1 e 2 definem os limites inferiores e superiores para a amostragem.

Os dados expostos na Tabela 7 mostram que o teor de umidade de 9,13% presente nas 6 amostras de caroços de açaí cominuídos, após a secagem por 24 horas em estufa, são satisfatórios tendo em vista o parâmetro utilizado por Seye *et al.* (2008). Tal característica proporciona um ótimo desempenho energético durante a queima do material, pois é necessária menos energia para iniciar o processo térmico.

É válido ressaltar que a trituração do material facilitou o desprendimento das moléculas de água do material ao submetê-lo à temperatura de 100°C , tendo perdido aproximadamente 0,42g de massa de água em cada amostra durante o período de desumidificação na estufa.

5.2. Comparação das Propriedades Químicas Imediatas

Em relação às características químicas do caroço de açaí, quando comparados as propriedades da lenha são relevantes para o estudo, uma vez que apresentam um indicador do material para a queima. Entre os aspectos que estão em discussão nesse tópico estão o Carbono Fixo (CF), o Teor de Voláteis (TV) e Teor de Cinzas (TC). Na

tabela 8, é mostrado os valores comparativos desses materiais de acordo com dados encontrados nas principais literaturas.

Tabela 8: Comparação das análises químicas imediatas com base nas principais literaturas encontradas.

LENHA				CAROÇO DE AÇAÍ			
Amostras	CF(%)	TV(%)	TC(%)	Amostras	CF(%)	TV(%)	TC(%)
Média (%)	14,21	83,12	0,35	Média (%)	19,64	79,10	1,27
D. Padrão (%)	3,22	4,93	0,02	D. Padrão (%)	0,83	1,01	0,19

Fonte: Netto *et al.* (2006); Nagaishi (2007); Rendeiro *et al.* (2008); Azevedo *et al.* (2011); Barros, Nascimento e Azevedo (2012); Nakai (2014); Nones *et al.* (2014).

Diante dos valores mostrados, é válido analisar que a média do Teor de Cinzas do caroço encontrado é de 1,25%, enquanto o da lenha é de 0,35%, sendo uma característica comum entre espécies de eucalipto (lenha comercial) os baixos teores de cinzas da madeira, em geral, abaixo de 1% (CHAVES *et al.*, 2013), como pode ser observado e confirmado pelos dados da literatura.

Segundo Peres *et al.* (2018), um alto percentual de teor de cinzas indica problemas quanto a manutenção da queima, assim como o processo de combustão, já que as cinzas representam a parte da biomassa que sobra após a queima. Vale *et al.* (2011) determina que os valores acima de 7% geram essa problemática, todavia, dentre as biomassas estudadas nenhuma ultrapassa esses valores, mostrando que os valores obtidos da literatura estão numa qualidade aceitável para o processo de combustão.

O teor de carbono fixo representa a porcentagem da biomassa após a retirada da umidade, das cinzas e do material volátil. Além disso, o teor de carbono fixo é considerado uma das características mais importantes no procedimento de qualificação do carvão para uso energético, visto que ele está diretamente ligado ao poder calorífico (BATAUS *et al.*, 1989). Um maior teor de carbono fixo implica em um maior tempo de residência no aparelho de queima (CHAVES *et al.*, 2013), dessa forma, comparando o carbono fixo da lenha com o do caroço de açaí, é possível perceber uma maior porcentagem dessa propriedade para o resíduo do açaí, atribuindo uma vantagem do material em relação à lenha.

Quanto ao teor de voláteis, é uma característica que expressa a facilidade de se queimar um material. Tendo disponível a informação do índice percentual do material volátil, pode-se estimar o índice de carbono fixo (já que essas informações são inversamente proporcionais), que irá apontar quais combustíveis irão queimar mais lentamente. Os materiais que apresentam maior carbono fixo têm essa característica citada anteriormente que contribui para entender o grau de combustão de um combustível. Portanto, materiais com baixos índices de voláteis poderão requerer longo tempo de residência na fornalha para queima total quando comparadas com combustíveis que possuam alto índice (SOLUMAD, 2018).

Diante desse dado, é possível prever que o caroço de açaí terá um processo de queima mais lento, uma vez que o teor de voláteis (de 79,10%) é menor que o da lenha (83,12%). Porém, com a alteração da geometria do produto (ao se utilizar o material cominuído como o do presente trabalho), essa questão pode ser modificada, tendo em vista que com o material triturado a superfície de contato aumenta, aumentando também a velocidade da reação.

5.3. Poder Calorífico Superior

Em relação ao poder calorífico superior do caroço de açaí, vale ressaltar que esta característica demonstra a quantidade de energia liberada em forma de calor durante o processo térmico de uma biomassa. Logo, através da execução da Equação 3, que visa

determinar o PCS da amostra de caroço de açaí, foi possível encontrar o valor de 4.601,80 Kcal.kg⁻¹. Esse valor foi identificado a partir da coleta de dados das literaturas que realizaram as análises químicas imediatas das biomassas estudadas, sendo possível, posteriormente, utilizar a Equação 3 para identificar o PCS (NETTO *et al.*, 2006; NAGAISHI, 2007; RENDEIRO *et al.*, (2008); AZEVEDO *et al.*, 2011).

Este valor é considerado um alto poder calorífico tendo em vista que se trata de uma biomassa lignocelulósica e pode estar relacionado aos índices de CF, TV e TC, o que segundo Vale *et al.* (2011) são imprescindíveis para uma combustão eficiente de uma biomassa. Além disso, outro fator crucial para o desempenho no processo de combustão é a umidade do material, que em caso de altos teores, pode comprometer a eficiência energética. Portanto, recomenda-se que o TU% não extrapole os 14%, conforme a análise de Seye *et al.* (2008).

Por outro lado, a lenha comercial utilizada como parâmetro para as análises, possui um PCS identificado de 4.240,79 Kcal.kg⁻¹ (Barros, Nascimento e Azevedo, 2012; Nakai, 2014; Nones *et al.*, 2014). O PCS encontrado se aproxima da literatura de Quirino *et al.* (2004) que expõe o poder calorífico superior de 28 gêneros de *Eucalyptus*. Esse valor, portanto, é inferior ao comparar com o caroço de açaí, demonstrando a grande viabilidade técnica da utilização do resíduo em relação à lenha.

5.4. Eficiência Energética na Queima de Caroços de Açaí Cominuídos

Para estimar a eficiência energética do caroço de açaí em comparação a lenha, adotou-se como padrão o volume de lenha utilizado no estabelecimento mensalmente, cerca de 8 m³. Tendo como base a densidade do segundo material, de 390 kg.m⁻³, a estimativa de utilização de lenha a cada mês é de 3.120 kg. Por outro lado, ao considerar a densidade do caroço de açaí 507 kg.m⁻³, conforme o obtido em laboratório, a massa total estimada de utilização durante o mesmo período seria 4060 kg. Logo, pode-se observar que a quantidade de massa dos caroços cominuídos presentes no mesmo volume seria superior, o que geraria maior eficiência tendo em vista o transporte e armazenamento, que ocuparia um espaço físico menor em relação à lenha.

Tabela 9: Comparação dos dados de eficiência energética dos materiais

Item	Lenha	Caroços de açaí
Mt (kg)	3120	4060
PCS (kcal.kg ⁻¹)	4.240,79	4.601,80
Q (kcal)	1,32x10 ⁷	1,87x10 ⁷
DE (kcal.m ⁻³)	1,65x10 ⁶	2,33x10 ⁶

Fonte: Autores (2022)

*Os dados têm como parâmetro o volume de 8m³, quantitativo médio utilizado no estabelecimento comercial em 15 dias.

A quantidade de energia total (Q) gerada por respectivos resíduos demonstra a prevalência energética dos caroços de açaí cominuídos conforme mostrado na Tabela 9, em razão do seu poder calorífico ser consideravelmente superior ao da lenha. Essa característica presente no material triturado é importante tendo em vista a geração de energia mecânica, o que pode ser atrativo comercialmente pelo seu desempenho térmico.

Além disso, quanto a densidade energética (DE) dos caroços de açaí, pôde-se perceber também a superioridade deste material, tendo em vista o alto PCS e a densidade aparente encontrada em laboratório, ou seja, a boa relação entre a quantidade de energia presente no resíduo seco por unidade de volume. Essas características energéticas, segundo Souza e Vale (2017), são de extrema importância para o ambiente comercial, pois definem a qualidade da biomassa nos aspectos químicos, umidade e da

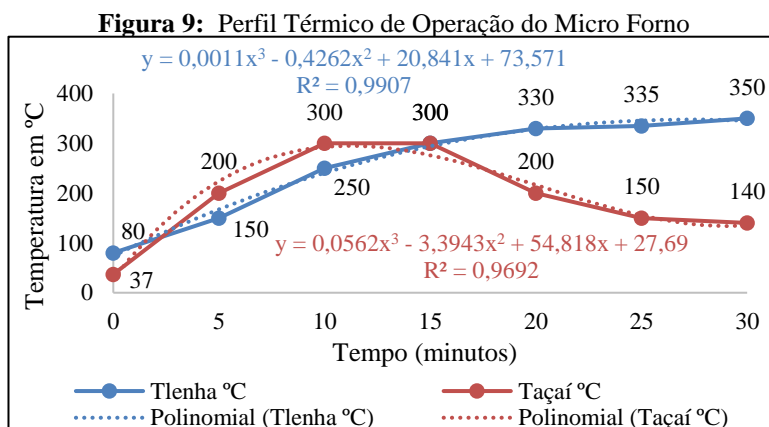
quantidade de calor que é liberado durante o processo térmico, haja vista a alta demanda térmica exigida pelos micros fornos para a produção alimentar.

O rendimento energético (R) dos caroços de açaí superou em 8% a lenha na avaliação realizada. Vale ressaltar que, em estudos como o de Passinho *et al.* (2019), esse rendimento energético pôde alcançar até 33% em comparação a lenha, haja vista que os ensaios foram executados em uma caldeira flamo tubular, que se caracteriza pelo alcance de altas temperaturas, por volta de 1000°C, e o controle da temperatura e umidade no equipamento. Logo, o estabelecimento poderia ter uma rentabilidade econômica maior quando comparado ao uso da lenha, tendo em vista que seria necessária uma quantidade menor de resíduo para atender as necessidades do empreendimento.

5.5. Comportamento Térmico dos Resíduos no Micro Forno

A Figura 9 expõe o perfil térmico em testes in loco de ambos os materiais no micro forno do estabelecimento. Esta representação gráfica demonstra que a análise foi realizada a cada 5 minutos para avaliar a variação térmica na queima da lenha e do caroço de açaí cominuído, tendo ajuste no R² maior que 95%, a partir da utilização da linha de tendência polinomial.

Foram realizados 7 testes ao longo de 30 minutos, sendo o primeiro o de pré- operação do micro forno, avaliando a temperatura antes da combustão dos materiais, e os 6 testes com a operacionalização do micro forno para ambas as biomassas.



Fonte: Autores (2022).

*Legenda: Tlenha: Temperatura do forno com a lenha; Taçaí: Temperatura do forno com o caroço de açaí.

A temperatura de pré- operação t(0) aferida no dia de avaliação da lenha foi de 80°C, enquanto a do caroço de açaí foi de 37°C. A diferença de temperatura de pré- operação se deu devido à presença de brasa quente antes da aferição para a lenha, por outro lado, no dia da análise do segundo material o forno encontrava-se em temperatura próxima do ambiente.

A quantidade de ambos os materiais utilizados para realizar essas análises foi de aproximadamente 8 kg de lenha e 4 kg de caroços cominuídos. É importante salientar que durante o processo de combustão dos caroços foi possível alcançar a temperatura ideal para fabricação das pizzas em um menor tempo (10 minutos) em relação à lenha (15 minutos), ainda que com a metade da massa total presente. Esse resultado pode estar atrelado ao maior poder calorífico presente nos caroços e demonstra que é necessário menor quantidade do material para alcançar as mesmas temperaturas de forma mais rápida.

No entanto, a apesar de ocorrer mais lentamente, a Tlenha se estabilizou após os 15 minutos de queima tendo aumentado a sua temperatura no micro forno em todos as 6

verificações e estabilizado em 350°C, com média de 286°C durante o período completo. Notou-se o inverso para a Taçaí, que alcançou mais rapidamente os 300°C, permanecendo durante o t(10) e o t(15), mas regredindo posteriormente e alcançando temperatura final de 140°C e média de 215°C.

O comportamento térmico inferior dos caroços ante a lenha, em razão da temperatura média inferior, ocorreu devido a algumas características do material interferirem na continuidade do processo de combustão. Um dos fatores possíveis é que os caroços triturados se compactam no ambiente do forno de modo a preencher os espaços vazios, diminuindo a entrada de oxigênio disponível para a combustão, enquanto a lenha possui arranjos que favorecem a oxigenação e, conseqüentemente, a manutenção da queima. Além disso, percebeu-se que durante a queima dos caroços criava-se uma camada externa que não permite o alcance do fogo na região mais interna da massa do material.

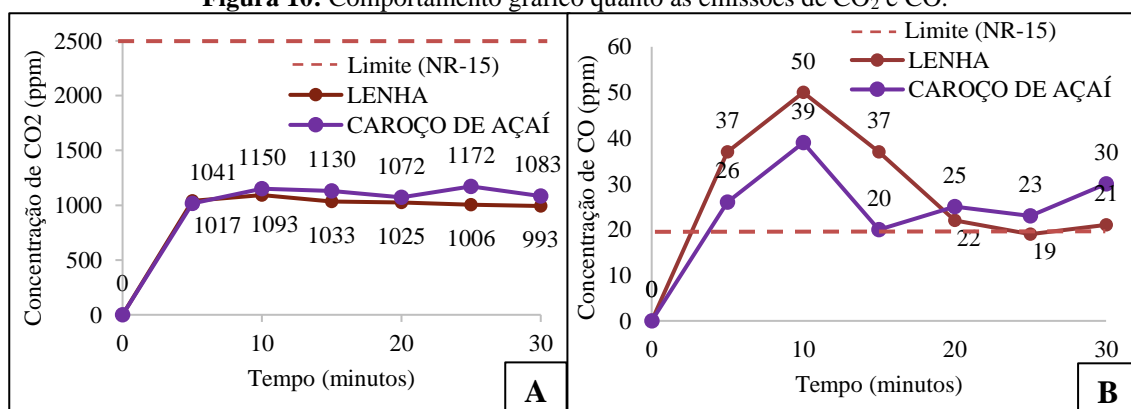
A solução encontrada para essas problemáticas foi a agitação esporádica do material com uma haste, a fim de facilitar a entrada da chama na parte interna e manter a mesma acesa e, com este mecanismo, foi possível manter a temperatura próxima da ideal.

5.6. Emissões Atmosféricas

5.6.1. Dióxido de Carbono e monóxido de carbono

Durante o período de análises das emissões de dióxido de carbono, notou-se que as duas biomassas apresentaram comportamentos aproximados, porém com uma pequena prevalência do material cominuído (figura 10A), tendo valores médios de 1033 e 1104 ppm emitidos, na queima da lenha e caroço de açaí cominuído, respectivamente.

Figura 10: Comportamento gráfico quanto às emissões de CO₂ e CO.



Fonte: Autores (2022)

Ao longo de cada verificação, notou-se um aumento em dois momentos para os caroços (t5-t10;t20-t25) e em um momento para a lenha (t5-t10), material este que mostrou redução nas emissões ao longo das demais verificações. O t25 representou o ponto de maior diferença entre os valores obtidos para os materiais, 1006 e 1172 ppm, para a lenha e caroços, respectivamente, apontando uma vantagem do primeiro material em relação ao segundo no que diz respeito as emissões de CO₂.

Por outro lado, no que concerne às emissões de CO, houve a prevalência da lenha do t5 ao t15, tendo alcançado a maior concentração do estudo de 50 ppm, e dos caroços cominuídos do t20 ao final da análise, ainda que essa diferença tenha sido maior no período em que a lenha esteve com valores superiores, conforme demonstram as médias, 27 e 23 ppm, para a lenha e os caroços cominuídos, respectivamente. Essas verificações podem ser explicadas por Reis *et al.* (2012), estudo no qual se afirma que taxas mais elevadas de voláteis e taxas inferiores de carbono fixo podem acarretar

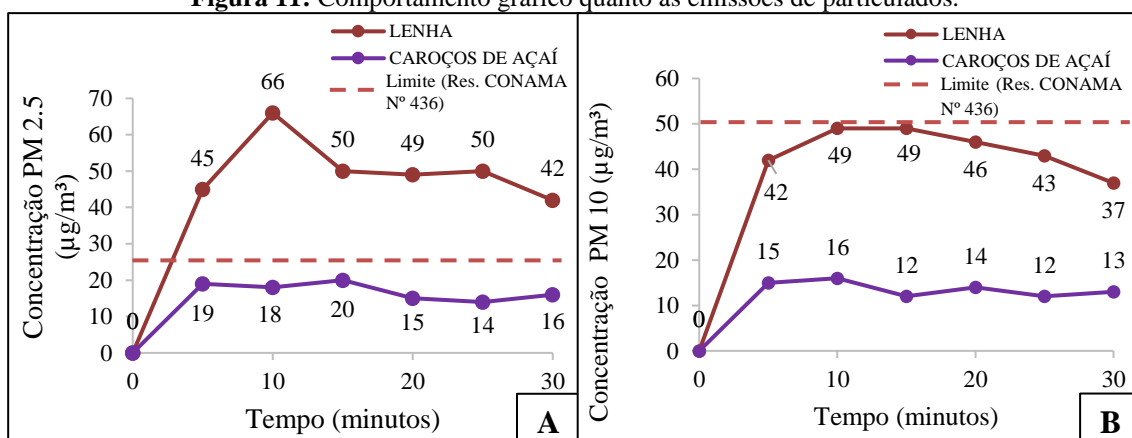
maiores níveis de emissões de gases, bem como é mostrado nos gráficos de monóxido de carbono (figura 10B).

É válido pontuar que durante os 30 minutos de queima dos materiais não houve combustão completa, pois de acordo com Vieira (2005), são necessários no mínimo 40 minutos de queima para obter a estabilização das emissões de CO em valores mínimos, o que não foi alcançado na pesquisa e explica o aumento nas emissões entre o t25 e o t30 de ambas as biomassas.

5.6.2. Materiais Particulados

Os MP's são subdivididos conforme o tamanho das partículas, sendo identificados por partículas finas ou respiráveis, com o diâmetro inferior a $2,5 \mu\text{m}$ ($D_p < 2,5 \mu\text{m}$) e as partículas grossas ou inaláveis, com o diâmetro superior a $2,5 \mu\text{m}$ e menor que $10 \mu\text{m}$ ($2,5 \mu\text{m} < D_p < 10 \mu\text{m}$). Segundo Guariero, Vasconcellos e Solci (2011) e Vinikoor-Imler, Davis, Luben (2011), quanto menores as partículas, mais elas tornam-se nocivas à saúde humana, pois podem adentrar as vias respiratórias e nos alvéolos pulmonares.

Figura 11: Comportamento gráfico quanto às emissões de particulados.



Fonte: Autores (2022)

As Figuras 11A e 11B mostraram que em todas as análises dos particulados com diferentes diâmetros, a concentração em $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ foi maior na queima da lenha. Na Figura 11A, que representa a concentração de $\text{MP}_{2,5}$ (partículas finas) a lenha obteve média de $50,3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ e máxima concentração encontrada de $66 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, já os caroços cominuídos apresentaram média de $17 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ e máxima de $20 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Ademais, para as análises apresentadas na Figura 11B referente as concentrações de MP_{10} , também ficou notória a prevalência da lenha, que teve média de $44,3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ e máxima de $49 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

5.6.3. Comparação com os Parâmetros Normativos de Emissões

Os padrões de qualidade do ar são níveis de referências estabelecidos por normas e determinam um limite máximo para a concentração dos poluentes atmosféricos, tendo como intuito garantir a saúde e o bem-estar das pessoas. Para isso, adotam-se critérios científicos de qualidade do ar partindo de avaliações objetivas, conhecidas como padrões primários e secundários que definem as concentrações visando o bem-estar da população e do meio ambiente (EPA, 2009).

Logo, são definidos os parâmetros normativos para tais finalidades, conforme a Tabela 10, cuja avaliação estabelece os níveis máximos de emissões de gases e particulados toleráveis em ambientes comerciais que utilizam biomassas para fins de geração de energia, em períodos limites de 24 horas.

Tabela 10: Padrões normativos de emissões em concentrações e períodos de referência.

Contaminante	Limite de Tolerância	Grandeza	Período de Referência (horas)
Monóxido de Carbono (CO)	20	ppm	24
Dióxido de Carbono (CO ₂)	2500	ppm	24
Material Particulado MP ₁₀	50	µg.m ⁻³	24
Material Particulado MP _{2.5}	25	µg.m ⁻³	24

Fonte: MMA (2011); MMA (2018); BRASIL (2020).

Quanto aos níveis de CO emitidos, notou-se que ambos os materiais apresentaram concentrações acima do limite de tolerância, no entanto, as concentrações para o caroço de açaí cominuído mostraram-se bem inferiores em comparação a lenha, segundo o exposto no Tópico 5.6.1.

Vale ressaltar que a exposição a altos níveis de monóxido de carbono pode desencadear, desde problemas mais leves como fadiga e dor no peito, a processos de intoxicação grave do sistema nervoso humano quando em longos períodos de exposições ao gás, sendo extremamente perigoso para os ambientes comerciais. Além disso, este composto pode contribuir massivamente para impactos ambientais como a chuva ácida e possui influência indireta no agravamento do efeito estufa (SUSTENTÁVEL, 2020).

Em relação à essa condição humana, a forma mais adequada de controle desses poluentes seria a partir da instalação de câmaras isoladas (filtros) de queima da biomassa adaptadas entre a fonte de ar e a câmara de trabalho (BRASIL, 2020), para evitar o contato direto do gás com o ambiente interno do empreendimento. Já em relação ao meio ambiente, seria imprescindível a instalação de catalisadores que transformam monóxido de carbono em dióxido de carbono, gás menos nocivo ao meio ambiente, através do processo de oxidação.

Para a avaliação de CO₂, os materiais apresentaram concentrações que respeitaram os limites expostos, o que daria margem para as modificações necessárias no micro forno citadas anteriormente, a fim de possibilitar a utilização dos caroços cominuídos.

Quanto aos particulados, na avaliação dos MP₁₀, os dois materiais apresentaram níveis de tolerância aceitável. Por outro lado, a avaliação do MP_{2.5}, material mais nocivo à saúde humana, pois pode ser inalado afetando diretamente os pulmões, mostrou que a lenha excedeu a concentração de particulados durante todos os períodos analisados, enquanto os caroços cominuídos apresentaram valores dentro do permitido.

No que se refere a essas informações, ficou evidente o grau de periculosidade que as pessoas em contato direto com os gases e particulados podem estar suscetíveis ao manusearem a lenha, sendo imprescindível a utilização de máscaras de EPI para evitar a inalação dos particulados emitidos durante o processo de produção alimentar. Portanto, é possível identificar benefícios ao utilizar os caroços de açaí cominuídos, que proporcionariam melhorias no sentido de reduzir a problemática da geração de gases e particulados nocivos ao meio ambiente e aos seres humanos.

5.7. Análise Qualitativa

Antes de realizar os experimentos no estabelecimento comercial, buscou-se avaliar nos fornos das Figuras 8B e 8C a percepção quanto a odores, fuligem e fumaça, pois tratava-se de um resíduo cominuído, com pouca ou nenhuma aplicação em outros

estudos que embasassem o procedimento em questão. Logo, por questões de segurança, foram feitas essas análises prévias. Os resultados não indicaram nenhuma percepção fora do padrão para esses indicadores ao compará-los a lenha utilizada na pizzaria.

Em sequência, foi possível manusear o material proposto no forno do ambiente comercial e, diante das observações efetuadas durante a queima das biomassas, foi possível ressaltar alguns detalhes importantes notados em relação à queima de cada um dos materiais. As imagens da Figura 12 mostram a condução da queima de lenha e dos caroços de açaí cominuídos, durante o clímax do processo de geração de energia térmica, ambas biomassas à 300°C marcadas no termostato do micro forno.

Figura 12: Processo de combustão das biomassas para produção de pizzas. A: Queima da lenha; B: Queima dos caroços cominuídos.



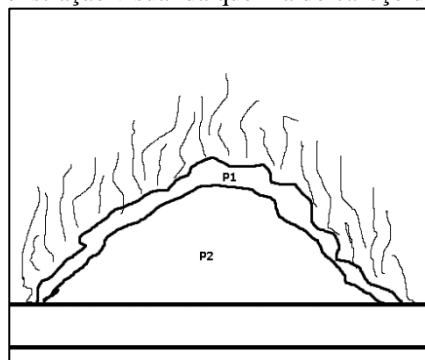
Fonte: Autores (2022)

Considerando que o processo de combustão da lenha (Figura 12A) é feito de maneira simples, que consiste em introduzir a biomassa no forno e organizá-lo de forma que fiquem próximos, iniciando o processo de combustão introduzindo algum material que esteja em chamas. Nesse caso, o material para auxiliar na etapa inicial do processo de queima foi o álcool em gel 70 INPM, que é adicionado no aglomerado de lenha, iniciando o processo de queima do combustível. Quando necessário, é adicionado mais madeira manualmente para manter altas temperaturas por mais tempo.

Feitas as observações ressaltadas anteriormente, é válido destacar que durante o processo de queima dos caroços de açaí cominuídos (Figura 12B), não houve a percepção de qualquer odor incomum e produção de fumaça que não fossem aquelas produzidas normalmente na combustão da lenha.

Outrossim, o material da Figura 12B no quesito de manuseio, apresentou uma necessidade de agitação da biomassa, haja vista que durante a combustão é criada uma película espessa de material carbonizado, que dificulta a propagação da chama para a região interna do material em combustão. A Figura 13 apresenta uma demonstração visual do processo de queima e das particularidades observadas *in loco* na combustão do material cominuído.

Figura 13: Demonstração visual da queima do caroço de açaí cominuído.



Fonte: Autores (2022)

Na figura, é possível observar a película de material carbonizado indicada pela área P1, a qual é criada durante a combustão e impede a entrada da chama na região interna do material (P2). Isso ocorre devido ao grande adensamento do resíduo, característica peculiar de materiais cominuídos, impedindo a entrada de oxigênio para as regiões mais internas e dificultando a manutenção da combustão.

Diante dessa problemática, notou-se que a agitação desse material é imprescindível para haver um maior aproveitamento da energia térmica e assim, maior eficiência na queima dessa biomassa.

5.8. Impactos positivos e negativos da substituição pelos caroços cominuídos

Diante das informações coletadas e das análises realizadas no presente estudo, foi possível chegar a um resultado quanto aos impactos gerados pela substituição da lenha pelos caroços cominuídos, que indicam a biomassa mais adequada do ponto de vista energético, ambiental e econômico.

As propriedades físicas e químicas mostraram que o resíduo proveniente da produção de açaí, apresentou as condições necessárias e desejadas para um bom aproveitamento de energia térmica. Por ter as suas características nas indicações técnicas, foi possível observar algumas propriedades superiores à lenha, como a densidade do resíduo cominuído em relação à lenha comercial, o poder calorífico superior, a quantidade total de energia, densidade energéticas e o rendimento energético presente nas mesmas proporções mássicas.

Outrossim, é indubitável que do ponto de vista ambiental, o resíduo do açaí também se mostrou vantajoso em alguns aspectos, uma vez que apresentou menores emissões de particulados para a atmosfera e de monóxido de carbono comparados a lenha, porém obteve maior quantidade de CO₂ emitida. Dessa maneira, seria possível reduzir diversos impactos da geração de gases poluentes e da propagação de particulados no meio ambiente, ambos nocivos ao ciclo de vida na terra. Além disso, a substituição também proporcionaria a redução do desmatamento ao diminuir a demanda de florestas de monocultura para manejo de eucaliptos e pinos, gêneros mais utilizados para a produção de lenha.

Já em relação ao quesito socioeconômico, por ser um material descartável e sem um interesse dos setores produtivos, o caroço de açaí apresenta uma vantagem em relação a lenha por estar disponível nas próprias cidades e ao alcance dos empreendimentos. Em face desse cenário, seria possível reduzir os altos custos logísticos de compra e transporte do material, característica peculiar a lenha, tornando atrativa a aquisição a baixo custo do resíduo. Dessa forma, uma nova cadeia produtiva seria implementada gerando movimentação de renda e novas oportunidades de emprego dentro desse nicho.

Quanto aos impactos negativos, a queima dos caroços de açaí, mesmo propagando menores quantidades de monóxido de carbono em relação a lenha, apresentou níveis acima dos parâmetros de emissões expostos. Essa emanção do gás, em longos períodos de exposição, poderia ser danosa à saúde dos colaboradores do estabelecimento. Logo, seria de suma importância a utilização de EPI's e as adaptações propostas anteriormente a fim de minimizar os danos à saúde e nivelar as emissões aos padrões permitidos por leis.

Além disso, notou-se que os estabelecimentos comerciais que admitissem o uso desse material, teriam custos para introduzi-lo no seu ciclo produtivo, como a compra de um triturador de biomassa e adaptações nos micros fornos para manuseio desse material. No entanto, a longo prazo, os benefícios ficariam evidentes ao não depender da compra de lenha para manutenção do processo de produção alimentar.

Tendo em vista a necessidade da agitação do material para a manutenção da temperatura, é indubitável a necessidade de adaptações nos fornos como uma abertura ao lado da área de queima com o intuito de fazer o manejo do material de forma mais fácil ou utilizar um instrumento que permita chegar até a biomassa e fazer essa mistura de forma manual, sem atrapalhar ou congestionar a abertura principal do forno, que tem se destina ao manuseio de entrada e saída das pizzas produzidas.

6. CONCLUSÃO

Em vista do que foi exposto neste estudo, pôde-se observar que as características apontadas mostraram grande potencial de uso dos resíduos provenientes do beneficiamento da polpa de açaí, os caroços, em formato cominuído. Os resultados indicaram composições físico-químicas que potencializam o seu coeficiente energético, tornando atrativas para o cenário atual de buscas de energias alternativas, podendo ser aproveitado como combustível para a geração de calor em micro fornos comerciais, desde que se atendam aos cuidados necessários para o manuseio correto.

Foi possível notar que o material em questão apresentou algumas complexidades de uso antes da queima, através da necessidade de realizar o tratamento para cominuí-lo e secá-lo, a fim de atender as necessidades térmicas. Além disso, durante o processo térmico percebeu-se a necessidade de agitação do material para manutenção da chama e da temperatura ideal de operação.

Logo, recomenda-se que sejam realizados novos estudos que possam identificar as melhores adaptações aos fornos, visando um baixo custo e melhor eficiência na mistura do material. Além disso, é importante que esses estudos, também, verifiquem qual a melhor granulometria para a biomassa do caroço de açaí cominuído, tendo em vista seu uso para a cocção alimentar em micro fornos.

Nesse viés, ainda que o caroço de açaí apresente esses requisitos para viabilizar o seu uso, o material demonstrou ser muito eficiente energeticamente. Por ser um resíduo extremamente abundante em diversas regiões do estado do Pará, podendo ser coletado em qualquer ponto da cidade de Belém onde se comercialize o fruto, recomenda-se a utilização deste para fins energéticos. Dessa maneira, seria possível minimizar os impactos ambientais provenientes da ausência de manejo adequado dos resíduos na cidade e gerar o incremento de uma economia circular ao valorar o recurso natural que outrora seria considerado descartável.

Logo, ressaltam-se os ganhos ao considerar o Tripé da Sustentabilidade, base do desenvolvimento sustentável que deve respeitar os aspetos econômico, social e ambiental. Em primeiro lugar, foi possível identificar que, devido à grande oferta do resíduo, seria possível minimizar os custos do empreendimento com transporte e com o preço comercial da biomassa. Dessa forma, haveria a criação de um novo mercado para alimentar essas demandas, movimentando a economia a partir da geração de emprego e renda, refletindo diretamente no meio social.

Além disso, quanto ao aspecto social, ao implementar a utilização dos caroços de açaí no empreendimento, seria possível melhorar as condições de saúde e segurança no ambiente de trabalho, ao minimizar as problemáticas das emissões de gases e particulados.

Tendo em vista as questões ambientais, a substituição da lenha pelos caroços, além de minimizar a emissão de gases e particulados nocivos à saúde humana e ao meio ambiente, iriam promover na esfera local a redução das problemáticas do acúmulo de entulhos nas ruas. De tal modo, seria possível atenuar a proliferação de patógenos e melhorar o conforto visual das ruas, beneficiando diretamente a população.

Por fim, é possível afirmar que ao propor uma destinação útil aos caroços de açaí, uma cadeia de impactos positivos seria gerada, sendo assim um forte indicador dos

benefícios práticos trazidos pela implementação da teoria do desenvolvimento sustentável.

7. REFERÊNCIAS

ABRAFRUTAS. **Açaí**: A pequena fruta que movimenta milhões na economia paraense: A pequena fruta que movimenta milhões na economia paraense. Disponível em: <https://abrafrutas.org/2019/08/13/acai-a-pequena-fruta-que-movimenta-milhoes-na-economia-paraense/>. Acesso em: 03 mar. 2020.

ARBEX, Marcos Abdo *et al.* Queima de biomassa e efeitos sobre a saúde. **Jornal Brasileiro de Pneumologia [online]**. 2004, v. 30, n. 2 [Acessado 19 Dezembro 2022], pp. 158-175. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1806-37132004000200015>>. Epub 08 Jun 2004. ISSN 1806-3756. <https://doi.org/10.1590/S1806-37132004000200015>.

AVABEL. **Lista de estabelecimentos com selo de qualidade 2018**. Recuperado Fevereiro 22, 2019. Disponível em: <http://www.avabel.com.br/institucional/>. Acesso em: 22 dez. 2021

AZEVEDO, A. K. P. “**Relatório do caroço de Açaí**”. Universidade Federal do Pará, Belém, Pará. 2011.

BARBOSA, Andrezza de Melo *et al.* Caracterização de partículas de açaí visando seu potencial uso na construção civil. **Matéria (Rio de Janeiro) [online]**. 2019, v. 24, n. 3 [Acessado 14 Outubro 2022] , e12435. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1517-707620190003.0750>>. Epub 16 Set 2019. ISSN 1517-7076. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620190003.0750>.

BARROS, Sâmia Valéria dos Santos; NASCIMENTO, Claudete Catanhede do; AZEVEDO, Celso Paulo de. Caracterização tecnológica da madeira de três espécies florestais cultivadas no Amazonas: Alternativa para produção da lenha. **Floresta**, v. 42, p. 725-732, nov. 2012.

BATAUS, Y. S. de L. et al. **Carbonização integral de frutos de palmáceas**. Brasília: IBAMA, LPF, 1989. (Série Técnica, 2).

BRASIL. Lei Federal nº 12.305 de 02 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências**. Brasília, 2010. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=636>. Acesso em: 04 dez. 2021.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional. **Relatório de atividades 2016**. Brasília, 2017.

BUFALINO, L.; CAIXETA, L. A.; DE PAULA PROTÁSIO, T.; SCATOLINO, M. V.; MESQUITA, R. G. A.; MENDES, L. M.; TONOLI, G. H.; MARCONCINI, J. M. **Options for chemical modification of wastes from a Brazilian hardwood species and potential applications**. *Key Engineering Materials*, v. 634, p. 321-328, 2014. Disponível em: < [Local variability of yield and physical properties of açaí waste and improvement of its energetic attributes by separation of lignocellulosic fibers and seeds:](#)

[Journal of Renewable and Sustainable Energy: Vol 10, No 5 \(scitation.org\)](#)>. Acesso em: 28 dez. 2021

CARRERA, Beatriz Alves; MONTEIRO, Thais da Silva. **CARACTERIZAÇÃO DE BRIQUETES PRODUZIDOS A PARTIR DE LODO DE ETA, FIBRAS DE COCO (Cocos nucifera L.) E SERRAGEM DE MANGUEIRA (Mangifera indica L.)**. 2021. 34 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Ccnt, Universidade do Estado do Pará, Belém, 2021.

CARNEIRO, Angélica de Cássia Oliveira *et al.* Potencial energético da madeira de Eucalyptus sp. em função da idade e de diferentes materiais genéticos. **Revista Árvore [online]**. 2014, v. 38, n. 2 [Acessado 3 Outubro 2022] , pp. 375-381. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0100-67622014000200019>>. Epub 18 Jun 2014. ISSN 1806-9088. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622014000200019>.

CHAVES, Antonio M. Brito; VALE, Ailton Teixeira do; MELIDO, Raul C. N.; ZOCH, Vanessa P.. **CARACTERÍSTICAS ENERGÉTICAS DA MADEIRA E CARVÃO VEGETAL DE CLONES DE Eucalyptus spp.** **Enciclopédia Biosfera: Centro Científico Conhecer**, Goiânia, v. 9, n. 17, p. 533-542, 01 dez. 2013. Disponível em: <https://www.conhecer.org.br/enciclop/2013b/CIENCIAS%20AGRARIAS/CARACTERISTICAS%20ENERGETICAS.pdf>. Acesso em: 16 dez. 2022.

CORDEIRO, T. R.; PAULA, C. C. de A.; SOUSA, D. R. de; AMORIM, M. S. **Aproveitamento do caroço do açaí como fonte de energia térmica para as olarias do município de Bragança Pará**. Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, VIII, 2017, Campo Grande/MS. p. 1-8. Disponível em: <https://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2017/XI-050.pdf>. Acesso em: 15 out. 2022.

DOL (ed.). **Do concreto à biomassa: o reaproveitamento do caroço do açaí**. **Dol: Diário Online**. Belém, nov. 2020. Disponível em: <https://dol.com.br/noticias/para/noticia-555119-do-concreto-a-biomassa---o-reaproveitamento-do-caroco-do-acai.html?d=1>. Acesso em: 29 dez. 2021.

EPA - Environmental Protection Authority. **EPA annual U.S. Inventory of Greenhouse Gas Emissions and Sinks**. Government of Western Australia. Australia, 2009.

ENERGÉTICA, Empresa de Pesquisa (EPE). **Balço Energético Nacional**. Rio de Janeiro, 2020.

FARINAS, C. S. *et al.* **Aproveitamento do caroço do açaí como substrato para a produção de enzimas por fermentação em estado sólido**. Embrapa Instrumentação-Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento (INFOTECA-E), 2009.

GERHARDT, Tatiana Engel; SILVEIRA, Denise Tolfo (org.). **Métodos de Pesquisa**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009. 114 p. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/cursopgdr/downloadsSerie/derad005.pdf>. Acesso em: 15 ago. 2022.

GIODA, Adriana. Características e procedência da lenha usada na cocção no Brasil. **Estudos Avançados [online]**. 2019, v. 33, n. 95 [Acessado 27 Abril 2022] , pp. 133-

150. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/s0103-4014.2019.3395.0009>>. ISSN 1806-9592. <https://doi.org/10.1590/s0103-4014.2019.3395.0009>.

GIODA, Adriana. COMPARAÇÃO DOS NÍVEIS DE POLUENTES EMITIDOS PELOS DIFERENTES COMBUSTÍVEIS UTILIZADOS PARA COCÇÃO E SUA INFLUÊNCIA NO AQUECIMENTO GLOBAL. **Quím. Nova**, São Paulo, v. 41, n. 8, p. 839-848, ago. 2018. Disponível em http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422018000800839&lng=pt&nrm=iso. acessos em 28 fev. 2020.

GIODA, A. T. G. B.; LEON, A. P. de. Exposição ao uso da lenha para cocção no Brasil e sua relação com os agravos à saúde da população. **Ciência & Saúde Coletiva [online]**. v. 24, n. 8 [Acessado 27 Abril 2022], pp. 3079-3088. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/1413-81232018248.23492017>>. ISSN 1678-4561. <https://doi.org/10.1590/1413-81232018248.23492017>.

GRANADO, Marcos Paulo Patta; ROSSI, Gabriel Granado; CONTI, Andrea Cressoni de. DENSIFICAÇÃO DE BIOMASSA: PRODUÇÃO DE 133 BRIQUETES A PARTIR DA PODA DE GRAMA. **Revista Hipótese**, Itapetininga, v. 5, n. 1, p. 133-145, 30 out. 2018. Disponível em: <https://revistahipoteses.emnuvens.com.br/revista/article/download/119/110#:~:text=Para%20um%20melhor%20aproveitamento%20energ%C3%A9tico,aumenta%20a%20energia%20por%20volume..> Acesso em: 23 dez. 2022.

GUARIEIRO, L. L. N.; VASCONCELLOS, P. C.; SOLCI, M. C. Poluentes Atmosféricos provenientes da queima de combustíveis fósseis e biocombustíveis: Uma breve revisão. **Revista Virtual de Química**, v. 3, n. 5, p. Programa de Pós-graduação em Gestão e Tecnologia Industrial 434–445, 2011.

GUARIEIRO, L. L. N. *et al.* Vehicle Emissions : What Will Change with Use of Biofuel In: **Biofuels - Economy, Environment and Sustainability**, p 357–386, 2013.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção da extração vegetal e da silvicultura 2003**. Rio de Janeiro – RJ, Brasil, 2003.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura - PEVS - series históricas**. 2018. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas-novoportal/economicas/agricultura-e-pecuaria/9105-producao-da-extracao-vegetal-e-da-silvicultura.html?=&t=series-historicas>. Acesso em: 27 abr. 2022.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção da Extração Vegetal e Silvicultura 2020**. Rio de Janeiro: IBGE, 2021. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pa/pesquisa/16/12705>. Acesso em: 28 dez. 2021

KALIVAN, N.; MOREY, R. V. Factors affecting strength and durability of densified biomass products. **Biomass and Bioenergy**, v. 33, n. 3, p. 337-359, 2009.

KÜHL, Ricardo Marino; OLIVEIRA, Gilmara Maureline Teles da Silva de. Análises da viabilidade econômica da gaseificação de caroço de açaí no restaurante universitário da universidade federal rural da Amazônia. **Brazilian Journal Of Development**, Belém, v.

5, n. 11, p. 1-18, nov. 2019. Disponível em: <https://brazilianjournals.com/ojs/index.php/BRJD/article/view/4764/4393>. Acesso em: 04 jan. 2022.

KURMAR, Prashant; ANDRADE, Maria; YNOUE, Rita; FORNARO, Adalgiza; FREITAS, Edmilson; MARTINS, Jorge; MARTINS, Leila; ALBUQUERQUE, Taciana. ZHANG, Yang; MORAWSKA, Lidia. New directions: From biofuels to wood stoves: The modern and ancient air quality challenges in the megacity of São Paulo. **Atmospheric Environment**. V 140. 2016. Pages 364-369. ISSN 1352-2310. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.05.059>.

LIRA, Rinalda Silva. **A VIABILIDADE DO USO DO CAROÇO DO AÇAÍ COMO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL NA GERAÇÃO DE COMBUSTÍVEL NO ESTADO DO PARÁ**. 2018. 8 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, Centro Universitário Estácio São Paulo, Belém, 2018. Disponível em: http://www.editorarealize.com.br/revistas/conepetro/trabalhos/TRABALHO_EV104_MD1_SA_121_ID959_11072018174350.pdf. Acesso em: 28 fev. 2020.

MMA, Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 491, de 19 de novembro de 2018. **Dispõe sobre padrões de qualidade do ar**. Diário Oficial da União. Brasília, 2018. Brasília, 2018.

MMA, Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 436, de 22 de dezembro de 2011. **Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas instaladas ou com pedido de licença de instalação anteriores a 02 de janeiro de 2007**. Diário Oficial da União. Brasília, 2011.

MOREIRA, M. A.; FERREIRA DE SOUSA, A. L. Tratamento e análise de resíduos da produção de açaí: um estudo sob a ótica da ecoeficiência. **REVISTA AMBIENTE CONTÁBIL** - Universidade Federal do Rio Grande do Norte - ISSN 2176-9036, [S. l.], v. 12, n. 2, p. 279-297, 2020. DOI: 10.21680/2176-9036.2020v12n2ID18923. Disponível em: <https://periodicos.ufrn.br/ambiente/article/view/18923>. Acesso em: 12 jan. 2023.

MTP, Ministério do Trabalho e Previdência. **Norma Regulamentadora nº 15 (NR-15)**. Brasília, 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-previdencia/pt-br/composicao/orgaos-especificos/secretaria-de-trabalho/inspecao/seguranca-e-saude-no-trabalho/ctpp-nrs/norma-regulamentadora-no-15-nr-15>

NAKAI, Diogo Keiji. **AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DE Eucalyptus spp. EM GASEIFICADOR DO TIPO CONTRACORRENTE**. 12014. 73 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências Mecânicas, Universidade de Brasília, Brasília, 2014. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/33550354.pdf>. Acesso em: 07 dez. 2022.

NDAGIJIMANA, C.; PAREYN, F. G. C.; RIEGELHAULT, E. **Uso do solo e desmatamento da Caatinga: um estudo de caso na Paraíba e no Ceará - Brasil**. Estatística Florestal da Caatinga, Recife, v.2, p.18-29, 2015.

NETO, Celso Boushosa Mendes; COSTA, Leon Gabriel Brasil; NORONHA, Rebeca Izabela Fernandes; LUCENA, Stefany Monteiro. **SEMENTES DE AÇAÍ:**

ALTERNATIVA PARA REDUÇÃO DOS IMPACTOS PRODUZIDOS PELA UTILIZAÇÃO DE LENHAS EM PIZZARIAS. In: PROF^a DR^a ANTONELLA CARVALHO DE OLIVEIRA. **Desenvolvimento Sustentável, Interdisciplinaridade e Ciências Ambientais 2**. Ponta Grossa: Atena Editora, 2021. p. 1-244.

NETTO, G. B. F.; OLIVEIRA, A. G. P.; COUTINHO, H. W. M.; NOGUEIRA, M. F. M.; RENDEIRO, G. **Caracterização energética de biomassas amazônicas**. Anais do 6º Encontro de Energia no Meio Rural. 2006. 08 p.

NONES, Daniela Letícia; BRAND, Martha Andreia; CUNHA, Alexsandro Bayestorff da; CARVALHO, Adriel Furtado de; WEISE, Solange Maria Krug. DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES ENERGÉTICAS DA MADEIRA E DO CARVÃO VEGETAL PRODUZIDO A PARTIR DE *Eucalyptus benthamii*. **Floresta**, [S.L.], v. 45, n. 1, p. 57, 12 ago. 2014. Universidade Federal do Parana. <http://dx.doi.org/10.5380/ufpr.v45i1.30157>.

OLIVEIRA NETO, G. C. DE; FILHO, M. G.; GANGA, G. M. D.; NAAS, I. A.; VENDRAMETTO, O. Princípios e ferramentas da produção mais limpa: um estudo exploratório em empresas brasileiras. **Gestão & Produção**, v. 22, n. 2, p. 326-344, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/0104-530X1468-14> . Acesso em: 03 jan. 2022.

PARÁ, G1. **Técnicos e pesquisadores definem padrões de qualidade do açaí**. 2018. Disponível em: <https://g1.globo.com/para/para/noticia/tecnicos-e-pesquisadores-definem-padroes-de-qualidade-do-acai.ghtml>. Acesso em: 16 dez. 2022.

PARIKHA, J.; CHANNIWALAB, S. A.; GHOSALC, G. K. A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels. **Fuel**, v. 84, p. 487 – 494, jun. 2005.

PASSINHO, M. S.; BARBOSA, D. de L. B.; SOUZA, M. J. R.; XAVIER, N. M. de Q. X. USO DA SEMENTE DE AÇAÍ COMO ALTERNATIVA ENERGÉTICA NA INDÚSTRIA DE BENEFICIAMENTO DE POLPA DE AÇAÍ. **Enciclopédia Biosfera**. 16.1473-1484. 10.18677/EnciBio_2019A131. Goiânia, 2019.

PERES, Roberto S. *et al.* **CAROÇO DE AÇAÍ COMO FONTE DE ENRGIA ALTERNATIVA NA PRODUÇÃO DE TIJOLOS EM OLARIAS DA CIDADE DE IMPERATRIZ/MA**. 2018. 5 v. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal da Amazônia, Manaus, 2018. Disponível em: <https://even3.blob.core.windows.net/anais/92557.pdf>. Acesso em: 27 mar. 2022.

PORTAL AMAZÔNIA (comp.). **Caroços de açaí são transformados em embalagens biodegradáveis**. 2022. Disponível em: <https://portalamazonia.com/estados/amapa/carocos-de-acai-sao-transformados-em-embalagens-biodegradaveis>. Acesso em: 25 jan. 2023.

QUIRINO, M. G.; SANTOS, P. dos A. B. S. dos; NETO, L. G. de M. V. **Compósito laminar produzido com a fibra da semente do açaí (Euterpe precatoria)**. In: ANAIS DO CONGRESSO INTERNACIONAL E WORKSHOP DESIGN & MATERIAIS, 2017. Anais eletrônicos. Campinas, Galoá, 2017. Disponível em: <https://proceedings.science/dm/papers/composito-laminar-produzido-com-a-fibra-da-semente-do-acai-euterpe-precatoria-->. Acesso em: 04 jan. 2022.

QUIRINO, W. F. *et al.* Densitometria de raios x na análise da qualidade de briquetes de resíduos de madeira. **Scientia Forestalis**, v. 40, n. 96, p. 525-536, 2012. Disponível em: <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr96/cap11.pdf>. Acesso em: 26 dez. 2022.

QUIRINO, W. F. *et al.* Poder calorífico da madeira e de resíduos lignocelulósicos. **Biomassa & Energia**, v. 1, n. 2, p. 173-182, 2004. Disponível em: <http://www.lippel.com.br/dados/download/05-05-2014-10-46poder-calorifico-da-madeira-e-de-materiais-ligno-celulosicos.pdf>. Acesso em: 26 dez. 2022.

REIS, Aliny Aparecida dos; PROTÁSIO, Thiago de Paula; MELO, Isabel Cristina Nogueira Alves de; TRUGILHO, Paulo Fernando; CARNEIRO, Angélica de Cássia Oliveira. Composição da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus urophylla* em diferentes locais de plantio. **Pesquisa Florestal Brasileira**, [S.L.], v. 32, n. 71, p. 277-290, 28 set. 2012. Embrapa Florestas. <http://dx.doi.org/10.4336/2012.pfb.32.71.277>.

RENDEIRO, Gonçalo. *et al.* Brasil. Ministério de Minas e Energia. **Combustão e Gaseificação de Biomassa Sólida: soluções energéticas para amazônia**. Brasília: Ministério de Minas e Economia, 2008. 190 p.

REEMAQ. **Qual a temperatura ideal para assar pizza no forno a gás, a lenha e elétrico**. 2022. Disponível em: <https://www.reemaq.com.br/temperatura-forno-pizza/>. Acesso em: 25 jan. 2023.

SEYE, O.; SOUZA, R.C.R.; BACELLAR, A.A.; RAMOS DE SOUZA, C.D.; DE MORAIS, M. R. **Caracterização do Caroço de Açaí como insumo para geração de Eletricidade via Gaseificação**. In: Proceedings: AGRENER GD 2008-7º Congresso Internacional sobre Geração Distribuída e Energia no Meio Rural. Universidade de Fortaleza – Unifor: Fortaleza (CE); 23rd to 26th September 2008.

SOLUMAD. **Análises mais importantes para a caracterização da biomassa como combustível**. 2018. Disponível em: https://www.solumad.com.br/noticia/view_noticia?id=21#:~:text=O%20conte%C3%BAdo%20de%20vol%C3%A1teis%20expressa,aproximadamente%2085%C2%BAC%2C%20por%207%20minutos. Acesso em: 23 jan. 2023.

SOUZA, F. de; VALE, A. T. do. Densidade Energética de Briquetes de Biomassa Lignocelulósica e sua Relação com os Parâmetros de briquetagem. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 36, n. 88, p. 405 – 413, dez. 2016.

SUSTENTÁVEL, Site (org.). **Monóxido de carbono: o que é e quais são os seus efeitos no meio ambiente?** 2020. Disponível em: <https://sitesustentavel.com.br/monoxido-de-carbono-o-que-e-e-quais-sao-os-seus-efeitos-no-meio-ambiente/>. Acesso em: 14 mar. 2023.

VIANNA, S. A. **Euterpe in Flora do Brasil**. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. 2020. Disponível: <https://floradobrasil2020.jbrj.gov.br/FB15713>. Acesso em: 03 out. 2022.

VINIKOOR-IMLER, L. C.; DAVIS, J. A.; LUBEN, T. J. An ecologic analysis of county-level PM2.5 concentrations and lung cancer incidence and mortality. **International journal of environmental research and public health**, v. 8, n. 6, p. 1865–1871, 2011.