



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ

CENTRO DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS

DAVI SILVA DAMASCENO

**ANÁLISE DO POTENCIAL ENERGÉTICO DO RESÍDUO DA CASCA DA
CASTANHA DE CAJU GERADO NO NORDESTE DO BRASIL**

FORTALEZA

2025

DAVI SILVA DAMASCENO

ANÁLISE DO POTENCIAL ENERGÉTICO DO RESÍDUO DA CASCA DA CASTANHA
DE CAJU GERADO NO NORDESTE DO BRASIL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Graduação em Engenharia de Energias Renováveis da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro de Energias Renováveis.

Orientador: Prof^a. Dr^a. Mônica Castelo Guimarães Albuquerque.

FORTALEZA

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

D162a Damasceno, Davi Silva.

Análise do potencial energético do resíduo da casca da castanha de caju gerado no nordeste do Brasil.
/ Davi Silva Damasceno. – 2025.
67 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,
Curso de Engenharia de Energias Renováveis, Fortaleza, 2025.
Orientação: Prof. Dr. Mônica Castelo Guimarães Albuquerque..

1. Biomassa. 2. Casca da castanha de caju. 3. Sustentabilidade. 4. Energias Renováveis. I. Título.
CDD 621.042

DAVI SILVA DAMASCENO

ANÁLISE DO POTENCIAL ENERGÉTICO DO RESÍDUO DA CASCA DA CASTANHA
DE CAJU GERADO NO NORDESTE DO BRASIL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Graduação em Engenharia de
Energias Renováveis da Universidade Federal
do Ceará, como parte dos requisitos
necessários à obtenção do grau de Engenheiro
de Energias Renováveis.

Aprovada em: ____/____/____.

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dr^a. Mônica Castelo Guimarães Albuquerque (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof^a. Dr^a. Amanda Pereira Monteiro
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Me. Hariel Abreu Pereira
Pesquisador - Lacer/UFC

A Deus.

Aos meus pais, Maria A. Silva e Fco. Cláudio.

AGRADECIMENTOS

À Instituição Universidade Federal do Ceará, pelo apoio estrutural com a manutenção das áreas de estudo e realização de projetos de extensão à graduação.

A Prof^a. Dr^a. Mônica Castelo Guimarães Albuquerque, pela excelente orientação.

Aos professores participantes da banca examinadora Dr^a. Amanda Pereira Monteiro e Me. Hariel Abreu Pereira pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

Aos colegas e amigos do grupo projeto PET Engenharia de Energias Renováveis (PET Energias), pelos bons momentos e ensinamentos compartilhados.

Aos colegas das turmas de graduação, pelas reflexões, críticas e sugestões recebidas.

A minha família, minha namorada Thayná e os animais de estimação Dalila e Beethoven, pelo suporte psicológico e por estar sempre estar comigo em todos os momentos.

“Porque a sabedoria serve de defesa, como o dinheiro serve de defesa; mas a excelência do conhecimento é que a sabedoria dá vida ao seu possuidor.” (Eclesiastes 7:12).

RESUMO

A busca por fontes de energia renováveis e sustentáveis tem impulsionado pesquisas sobre biomassa como alternativa viável para a geração de eletricidade e calor. No Nordeste do Brasil, a agropecuária desempenha um papel fundamental na economia e no cotidiano da população. Entre as culturas mais relevantes, destaca-se o caju, cuja castanha possui grande influência no mercado local, tanto em pequenos quanto em grandes empreendimentos. Neste contexto, este trabalho tem como objetivo avaliar o potencial energético da casca da castanha de caju (CCC) como combustível, contribuindo para a sustentabilidade e o aproveitamento de resíduos agroindustriais. Para isso, foram aplicadas equações termodinâmicas a três amostras de biomassa provenientes de diferentes localidades e submetidas a distintos tratamentos, analisando parâmetros como teor de umidade, poder calorífico, composição elementar e rendimento na combustão. Além disso, foi realizada uma análise técnica em uma caldeira e o dimensionamento de uma planta de potência a vapor. Os resultados indicam que a CCC apresenta propriedades adequadas para uso energético, podendo ser empregada na geração de eletricidade ou de vapor para processos industriais, nos municípios produtores de casca da castanha de caju, como o de Bela Cruz abordado no trabalho. Dessa forma, o estudo reforça a importância do aproveitamento de resíduos agrícolas para a diversificação da matriz energética, contribuindo para a redução de impactos ambientais e para o desenvolvimento sustentável.

Palavras-chave: Biomassa; Casca da Castanha de Caju; Caracterização; Sustentabilidade.

ABSTRACT

The search for renewable and sustainable energy sources has driven research on biomass as a viable alternative for electricity and heat generation. In the Northeast of Brazil, agriculture and livestock play a fundamental role in the economy and daily life of the population. Among the most relevant crops, cashew stands out, as its nut has a significant influence on the local market, both in small and large enterprises. In this context, this study aims to evaluate the energy potential of cashew nut shell (CNS) as a biofuel, contributing to sustainability and the utilization of agro-industrial residues. For this purpose, thermodynamic equations were applied to three biomass samples from different locations and subjected to distinct treatments, analyzing parameters such as moisture content, calorific value, elemental composition, and combustion efficiency. Additionally, a technical analysis was conducted on a boiler, and a steam power plant was designed. The results indicate that CNS exhibits suitable properties for energy use, making it viable for electricity or steam generation in industrial processes, particularly in municipalities that produce cashew nut shells, such as Bela Cruz, which is addressed in this study. Thus, the study highlights the importance of utilizing agricultural residues to diversify the energy matrix, contributing to environmental impact reduction and sustainable development.

Keywords: Biomass; Cashew nut shell; Characterization; Sustainability.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Processos de conversão, produtos e aplicações. | 20 |
| Figura 2 – Participação na geração de bioeletricidade no Brasil | 22 |
| Figura 3 – Mapa do estado do Ceará - presença da produção da castanha de caju | 24 |
| Figura 4 – Esquema funcional de aquecimento de uma caldeira aquatubular | 36 |
| Figura 5 – Esquema funcional de aquecimento de uma caldeira flamotubular | 36 |
| Figura 6 – Esquema funcional de aquecimento de uma caldeira mista | 37 |
| Figura 7 – Foto ilustrativa do gerador de linha AG10 WEG | 53 |
| Figura 8 – Foto ilustrativa da turbina de contrapressão WEG Linha TS/TG | 54 |
| Figura 9 – Foto ilustrativa da caldeira HLM-200 COMPACT da marca BIOMAX | 55 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | |
|--|----|
| Gráfico 1 – Composição percentual de componentes oriundo da análise elementar das amostras de biomassa de cada autor | 50 |
| Gráfico 2 – Poder calorífico inferior na base seca, medidas em MJ/kg | 52 |
| Gráfico 3 – Volume dos gases nos produtos da combustão em m ³ /kg | 59 |
| Gráfico 4 – Concentração de cinzas nos produtos de combustão em porcentagem do valor de concentração em g/m ³ | 59 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|-----------|---|----|
| Tabela 1 | – Consumo de biomassa da região do ALC | 21 |
| Tabela 2 | – Análise elementar das amostras de biomassa para cada autor | 47 |
| Tabela 3 | – Análise imediata obtida pelos autores das amostras de biomassa | 47 |
| Tabela 4 | – Volume de ar teórico, volume de ar real e excesso de ar - m ³ /kg | 51 |
| Tabela 5 | – Dados operacionais do gerador de potência AG10 da WEG | 53 |
| Tabela 6 | – Dados operacionais da turbina de contrapressão - linha TS/TG | 54 |
| Tabela 7 | – Dados operacionais da caldeira HLM-200 COMPACT | 55 |
| Tabela 8 | – Poder calorífico inferior na base trabalho e calor disponível para as amostras de biomassa - calculados | 58 |
| Tabela 9 | – Volumes e entalpias dos gases de exaustão - com excesso de ar | 58 |
| Tabela 10 | – Dados calculados de eficiência pelo balanço inverso e perdas caloríficas para as 3 amostras de biomassa distintas | 60 |
| Tabela 11 | – Resultados de calor útil e vazão mássica de combustível calculada | 60 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|------------------|---|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| IBGE | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística |
| PL | Projeto de Lei |
| BEN | Balanço Energético Nacional |
| CONAB | Companhia Nacional de Abastecimento |
| ASTM | American Society for Testing and Materials |
| bu | Base úmida |
| bs | Base seca |
| CCC | Casca da Castanha de Caju |
| IEA | International Energy Agency |
| S ^t | Teor de enxofre na base trabalho |
| C ^t | Teor de carbono na base trabalho |
| N ^t | Teor de nitrogênio na base trabalho |
| O ^t | Teor de oxigênio na base trabalho |
| H ^t | Teor de hidrogênio na base trabalho |
| W ^t | Teor de umidade na base trabalho |
| A ^t | Teor de cinzas na base trabalho |
| PCI ^t | Poder calorífico inferior na base trabalho |
| PCS ^t | Poder calorífico superior na base trabalho |
| RPM | Rotações por minuto |
| IPECE | Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará |
| CNS | Cashew Nut Shell |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|-------------------|---|
| hg^o | Entalpia teórica dos gases de exaustão |
| har^o | Entalpia teórica para o ar |
| h_{aa} | Entalpia da água de arrefecimento |
| h_p | Entalpia dos produtos |
| h_{vap} | Entalpia do vapor superaquecido |
| β | Coeficiente de Bunte |
| λ | Coeficiente de excesso de ar |
| $(c. t)_{RO_2}$ | Entalpia média de 1 m ³ de gás com radical RO ₂ |
| $(c. t)_{N_2}$ | Entalpia média de 1 m ³ de gás N ₂ |
| $(c. t)_{H_2O}$ | Entalpia média de 1 m ³ de gás H ₂ O |
| $(c. t)_{cinzas}$ | Entalpia média de 1 m ³ de cinzas |
| $(c. t)_{ar}$ | Entalpia média de 1 m ³ de ar |
| M | Mega |
| J | Joule |
| k | Kilo |
| g | Grama |
| m ³ | Metro cúbico |
| h | hora |
| ton | Tonelada |
| cal | Caloria |
| G | Giga |

SUMÁRIO

| | | |
|----------------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 17 |
| 2 | OBJETIVOS | 19 |
| 2.1 | Objetivos específicos | 19 |
| 3 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 20 |
| 3.1 | Biomassa | 20 |
| 3.1.1 | <i>Biomassa no Brasil</i> | 21 |
| 3.1.2 | <i>Castanha de Caju</i> | 23 |
| 3.2 | Conversão energética da biomassa | 24 |
| 3.2.1 | <i>Combustão</i> | 25 |
| 3.2.1.1 | <i>Mistura ar-combustível</i> | 25 |
| 3.2.2 | <i>Gaseificação</i> | 27 |
| 3.2.3 | <i>Pirólise</i> | 27 |
| 3.2.4 | <i>Digestão Anaeróbia</i> | 27 |
| 3.3 | Pré-tratamento da biomassa | 28 |
| 3.3.1 | <i>Técnicas de briquetagem e peletização</i> | 28 |
| 3.4 | Caracterização da biomassa | 29 |
| 3.4.1 | <i>Granulometria</i> | 29 |
| 3.4.2 | <i>Análise elementar</i> | 30 |
| 3.4.3 | <i>Análise imediata</i> | 30 |
| 3.4.3.1 | <i>Determinação do teor de umidade</i> | 31 |
| 3.4.3.2 | <i>Determinação do teor de voláteis</i> | 31 |
| 3.4.3.3 | <i>Determinação do teor de cinzas</i> | 32 |
| 3.4.3.4 | <i>Determinação do teor de carbono fixo</i> | 33 |
| 3.4.4 | <i>Poder calorífico</i> | 33 |
| 3.4.4.1 | <i>Poder calorífico superior</i> | 33 |
| 3.4.4.2 | <i>Poder calorífico inferior</i> | 34 |
| 3.6 | Caldeiras | 35 |
| 3.6.1 | <i>Entalpia dos gases dos produtos da combustão</i> | 37 |
| 3.6.2 | <i>Avaliação de caldeiras</i> | 39 |
| 3.6.2.1 | <i>Balanço de energia (método indireto)</i> | 40 |
| 3.6.2.2 | <i>Eficiência da caldeira</i> | 40 |

| | | |
|-----------------|---|----|
| 3.6.2.3 | <i>Calor do combustível e do ar</i> | 40 |
| 3.6.2.4 | <i>Calor disponível e calor útil</i> | 41 |
| 3.6.2.5 | <i>Perda de calor nos gases de escape</i> | 41 |
| 3.6.2.6 | <i>Perda de calor devido à combustão química incompleta</i> | 42 |
| 3.6.2.7 | <i>Perda de calor devido à combustão mecânica incompleta</i> | 42 |
| 3.6.2.8 | <i>Perda de calor devido ao arrefecimento externo da caldeira</i> | 42 |
| 3.6.2.9 | <i>Perda de calor devido à escória</i> | 43 |
| 3.6.2.10 | <i>Eficiência pelo balanço inverso</i> | 43 |
| 3.6.2.11 | <i>Determinação da vazão de combustível</i> | 43 |
| 3.6.3 | <i>Dimensionamento de uma planta de potência a vapor.....</i> | 43 |
| 3.6.3.1 | <i>Demanda reprimida</i> | 45 |
| 3.6.3.2 | <i>Carga parasitária</i> | 45 |
| 4 | METODOLOGIA | 46 |
| 4.1 | Caracterização | 46 |
| 4.2 | Análises iniciais | 47 |
| 4.3 | Poder calorífico | 48 |
| 4.4 | Entalpia e emissões dos gases de escape | 48 |
| 4.5 | Quantitativo de resíduo a ser utilizado | 48 |
| 4.6 | Dimensionamento da planta térmica a vapor | 49 |
| 5 | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 50 |
| 5.1 | Caracterização e volume de ar | 50 |
| 5.2 | Poder calorífico | 51 |
| 5.3 | Dimensionamento de uma planta de potência a vapor | 52 |
| 5.3.1 | <i>Determinação dos equipamentos geradores</i> | 52 |
| 5.3.2 | <i>Avaliação da caldeira</i> | 56 |
| 6 | CONCLUSÃO | 62 |
| | REFERÊNCIAS | 64 |

1 INTRODUÇÃO

O setor energético brasileiro é variável, dependendo principalmente das condições econômicas e tecnológicas da época. Assim, não constante, nem no tempo e nem em escala. Mas sim, relacionado com a capacidade de recuperação e/ou do aproveitamento dos recursos envolvidos para a obtenção de energia, e, também, em função da conjuntura econômica que indicará se a fonte é viável financeiramente, com base em seus custos e impactos. Logo, as fontes energéticas podem ser classificadas conforme sua renovabilidade. Os combustíveis fósseis são considerados fontes não-renováveis, pois levam milhões de anos para se estarem disponíveis para uso. Enquanto, a hidroeletricidade, a energia solar, a energia eólica e a provinda da biomassa (queima de material orgânico ou aproveitamento como vapor) são fontes renováveis que, se bem manejadas, podem atingir a sustentabilidade (BERMANN, 2001).

Resíduos agrícolas são todos os descartáveis que restam dos processos primários, secundários e beneficiamento dos produtos agrícolas (UDDIN *et al.*, 2019). Podem ser utilizados para produção de energia, apresentando muitos benefícios, mas, também, limitações dependendo da origem da biomassa e do seu uso. A quantidade gerada de resíduo, armazenamento e transporte, são as principais variáveis influentes para o processo de aproveitamento e recuperação da energia da biomassa. Por isso, a briquetagem (densificação) e tratamento térmico são medidas altamente eficientes para aumentar a capacidade energética em unidade de volume, quando se tratando principalmente de um resíduo de granulometria muito pequena e que é manuseado em grandes volumes se tornando assim, mais eficiente (IBITOYE *et al.*, 2023).

Segundo o BEN (Balanço Energético Nacional) mais recente, com dados base de 2023, houve redução de 1,9% na participação da energia termelétrica se comparado ao ano anterior. E, a participação da energia de biomassa neste montante teve crescimento de 2,8% chegando a liderar a matriz energética (termelétrica) com 42,6% de influência na capacidade total.

Na região nordeste, a cultura do caju está presente desde a colonização do Brasil com as relações de troca e socialização dos povos indígenas com o povo europeu. Utilizado para saúde e como alimento, o cajueiro (*anacardium occidentale*) virou protagonista sócio-econômico brasileiro e, também, cultural da região nordestina, sendo atribuído à expressão ‘colher mais um caju’, que significa uma unidade de vida-tempo, na época atrelado a mais um ano de existência para uma pessoa ou instituição. Sendo assim, símbolo do Brasil

por muito tempo por seu suco, refresco, doce, licor, vinho, batida, resina, flor e identidade cultural (FREYRE, 1977 *apud* DUTRA, 2017).

Em 2004, o estado do Ceará já sinalizava domínio na produção da castanha de caju, comportando 90% da capacidade nacional para o processamento e 80% do volume e faturamento das exportações nacionais (FIGUEIRÊDO JUNIOR, 2017). Proposto pelo senador Eduardo Girão (Novo-CE), o PL 2.259/2024 busca instituir o município de Pacajus-CE como a Capital Nacional da Castanha de Caju. Como aponta o projeto de lei, a justificativa está no destaque na contribuição para a indústria deste fruto no estado, sendo o pilar na cajucultura não apenas pela quantidade mas pela qualidade e inovação no processamento da castanha.

O processo produtivo da castanha de caju é complexo e cada etapa gera resíduos específicos. A casca, por sua vez, tem porcentagem de aproximadamente 72,5% do fruto, em massa (SANTOS, 2017; LEITE, 1994). Segundo a análise mensal da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB) de Setembro de 2024, a produção média dos últimos 5 anos (período de 2019 a 2024) foi de aproximadamente 129,75 mil toneladas para a região Nordeste, com previsão de 151,91 mil toneladas para o ano de 2024. Portanto, simulando a quantidade em massa da casca da castanha de caju nesta região, tem-se um valor médio de 94,07 mil toneladas por ano (CONAB, 2024).

Neste contexto, se faz viável a utilização da biomassa oriunda da casca castanha de caju, no cenário nordestino e mais intrinsecamente no estado do Ceará que é líder no processamento e beneficiamento desta *commodity* (ALENCAR *et al.*, 2018, JÚNIOR *et al.*, 2014). A técnica de briquetagem possibilita o aumento da eficiência energética da fonte por volume, como aponta VIDAL *et al.* (2024). Este trabalho buscou analisar o potencial energético da casca da castanha de caju, aplicando equações termodinâmicas que relacionam as reações químicas e a geração de energia, a fim de analisar uma planta de potência alimentada a partir da combustão da casca da castanha de caju em formato de briquete e em pó, para geração de vapor.

2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho foi analisar a estimativa do potencial para geração de energia a partir do aproveitamento dos resíduos da casca da castanha de caju em uma planta de potência.

2.1 Objetivos específicos

Estão listados os objetivos específicos:

- Levantar dados sobre a geração de resíduos da cajucultura, especificamente sobre a casca da castanha de caju (CCC) no Nordeste brasileiro com foco no Ceará;
- Pesquisa de referencial teórico para entendimento das técnicas e meios de aproveitamento do resíduo da CCC;
- Avaliar os dados e analisar com projeto conceitual referente ao aproveitamento energético do resíduo da CCC;
- Avaliação técnica da caldeira utilizada com cálculo da eficiência do processo de geração de vapor a partir de resíduos da CCC.

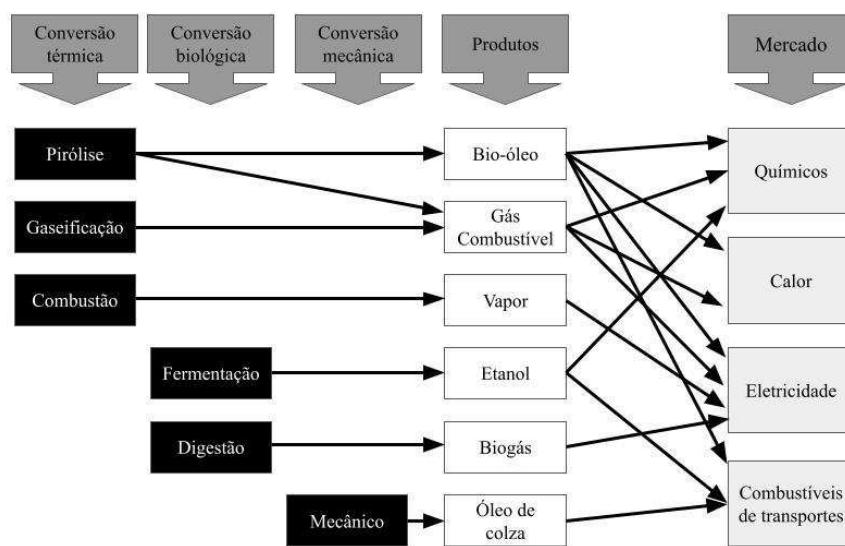
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Biomassa

Por definição, o termo “biomassa” refere-se ao conjunto de produtos energéticos ou matérias-primas renováveis, originados a partir de matéria orgânica biológica. Numa perspectiva energética, é qualquer recurso renovável proveniente de animais ou vegetais, que pode ser utilizado para a geração de energia (SEYE, 2003).

Segundo Bridgwater (2004), resíduos e combustíveis oriundos de biomassa podem ser convertidos em energia por processos térmicos, biológicos e mecânicos ou físicos. Sendo conversões biológicas em biocombustíveis, como etanol ou biogás, mais lentas que os demais processos mencionados. A forma térmica, origina múltiplos e complexos produtos que podem ser aplicados a vários mercados, com maiores qualidades a serem exploradas e uma gama de funcionalidades bem maior, além de ser bem mais rápida que todas as outras formas de conversão. Estão indicadas na Figura 1, as possíveis formas de conversão para geração de energia ou produto oriundo de biomassa e os mercados de seus produtos finais.

Figura 1 – Processos de conversão, produtos e aplicações.



Fonte: BRIDGWATER, 2004 (adaptado).

É um fato que a busca por uma matriz energética sustentável e verde tem sido um assunto recorrente no mundo, conjuntamente com a necessidade de reutilização de resíduos urbanos e industriais. Nesse contexto, há várias pesquisas na área de energias renováveis que propõem a produção de energia a partir de fontes alternativas como solar, hídrica, marés e

biomassa. A energia por biomassa é versátil, pois pode ser produzida para diversas finalidades como a eletricidade, calor ou transporte de fluidos (vapor). E, diferentemente de outras fontes energéticas, pode ser armazenada e movimentada, sendo economicamente viável a questão de implementação de uma planta, podendo ser de pequena geração ou de grandes produções (EUROPEAN COMISSION, 1997).

3.1.1 Biomassa no Brasil

Segundo o BEN (2024), 89% da oferta interna de eletricidade no Brasil é oriunda de fontes renováveis, liderada pela fonte hídrica com 58,9%. Com a biomassa tendo a participação de 7,5% do todo, representa a terceira maior dentre as fontes energéticas, devido a influência da agroindústria brasileira na estrutura econômica do país, bem como da abundância de fontes renováveis, solo para agricultura, água e vento.

PIEDRAHITA (2009) explana sobre uma visão de futuro para o setor energético na região da América Latina e Caribe (ALC) para o ano de 2023, indicando potenciais promissores para diversas fontes, como hidroenergia, solar por radiação, energia eólica e a biomassa. Com o protagonismo virado para o Brasil, devido a sua maior extensão e abundância de recursos. Além disso, está relacionado também ao desenvolvimento de tecnologias que envolvem a cadeia industrial e agrícola, atingindo boa parte do setor econômico do país, sendo uma alternativa viável para diminuição do uso de combustíveis fósseis.

Na Tabela 1 é visível que o Brasil é o país onde mais se consome biomassa sólida na região da América Latina e Caribe, afirmação essa muito relacionada com o uso da lenha e carvão vegetal em grandes siderúrgicas para queima direta.

Tabela 1 – Consumo de Biomassa da região do ALC

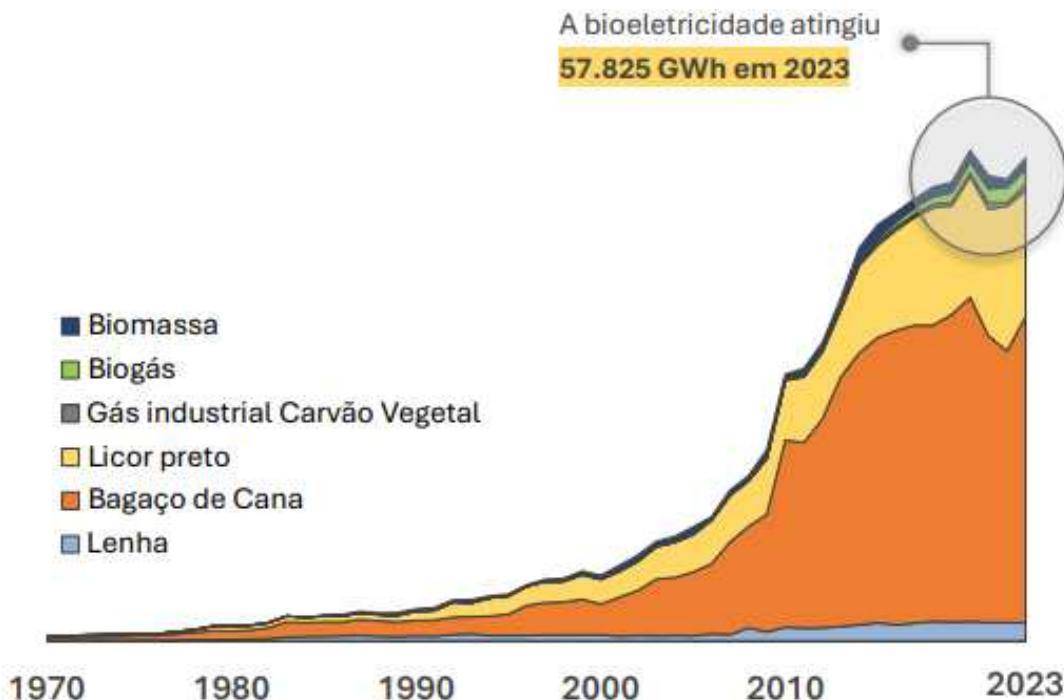
| Países | Biomassa Sólida (Mil TJ) |
|-----------|--------------------------|
| Argentina | 94,4 |
| Bolívia | 31 |
| Brasil | 2021,5 |
| Chile | 192 |
| Colômbia | 172 |
| Equador | 221,2 |
| Paraguai | 90,6 |
| Peru | 95 |

| Países | Biomassa Sólida (Mil TJ) |
|-----------|--------------------------|
| Uruguai | 186,3 |
| Venezuela | 22,6 |

Fonte: IEA (International Energy Agency), 2006 (adaptado) *apud* OLADE, 2009.

Mantendo essa relação até os tempos modernos com o crescimento de outras fontes, como o bagaço da cana que é utilizado em larga escala como indicado na Figura 2. Relacionado à abundância ao uso da geração de energia primária provinda da queima direta dos resíduos agrícolas (BEN, 2024).

Figura 2 - Participação na geração de bioeletricidade no Brasil



Fonte: Balanço Energético Nacional, Relatório síntese 2024.

Na maioria dos casos, a biomassa sólida é queimada para produção de calor ou vapor aquecido para mover uma turbina e gerar trabalho ou energia elétrica. Nas fontes primárias, o combustível (matéria prima) é diretamente utilizado para uma finalidade, sem a necessidade de um refinamento ou secundarização para se obter o produto desejado. Diferentemente de fontes secundárias, como o biogás e o etanol, em que há perdas na transformação da matéria prima (GOLDEMBERG, 2009).

3.1.2 Castanha de Caju

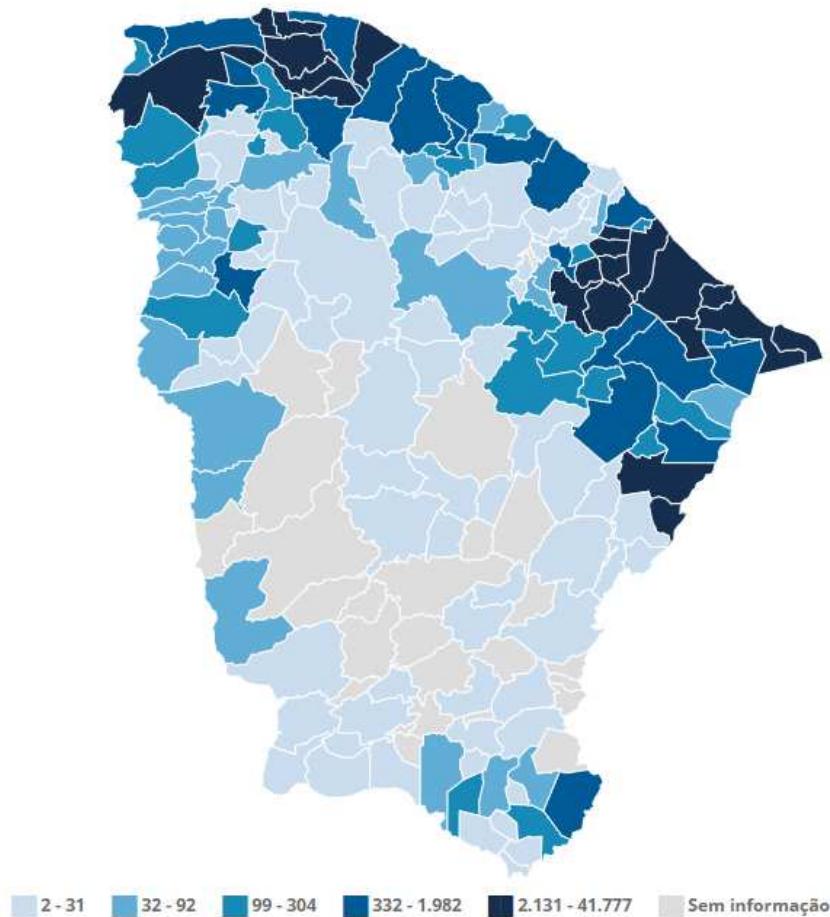
A cultura do caju é perene, nativa do Brasil. Isso é, a planta não precisa ser replantada anualmente e pode produzir frutos por bastante tempo. Esta é uma das razões desta ser atrativa para agricultores de pequeno cultivo, já que não há necessidade de muitos processos de manutenção e sazonalidade de colheita para o fruto. O caju tem origem tropical, especificamente da região da mata atlântica e regiões próximas ao litoral. A cajucultura faz parte do ecossistema brasileiro há muitos anos e está marcada historicamente na economia e ecologia do país, mais especificamente nas regiões norte e nordeste (CARVALHO, 2003).

Os estudos e pesquisas sobre o plantio e otimizações no cultivo desta cultura são essenciais para a produção em larga escala e produção efetiva. Zambolim (2017) explica sobre a influência da gestão agrícola e manejo para a longevidade do cultivo com enfoque no controle das pragas e técnicas de irrigação. E, menciona sobre a adoção de práticas para prevenir doenças, como: seletividade de variedades resistentes, utilização de mudas sadias, espaçamento e poda adequada.

No estado do Ceará, a Embrapa (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) tem desenvolvido papel fundamental para o protagonismo do estado na produção e beneficiamento para o cultivo de Caju. Com várias ações voltadas para a pesquisa e o desenvolvimento de tecnologias modernas para melhorar a produtividade das microproduções, em especial nas regiões metropolitanas e interioranas, onde a agricultura ainda é um dos principais fornecedores de renda e movimento de indústria, como nos municípios de Bela Cruz, Pacajus, Beberibe, Horizonte e Camocim (ALENCAR *et al.*, 2018).

Segundo o IBGE, no censo de 2023 indicou que houve produção de castanha de caju de 63.258 toneladas com impacto em 25.430 estabelecimentos no estado do Ceará e receita de 222,3 milhões de reais. Com maior presença na região litorânea do estado, no conjunto de municípios do vale do Acaraú e região mais próxima do Rio Grande do Norte dos municípios próximos à Aracati, como indicado no mapa da Figura 3, representa cerca de aproximadamente 280 mil hectares de área produzida e colhida. Para a mesma região, de acordo com o Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará (IPECE), a produção em 2022 foi de 95 mil toneladas no ano e o retorno financeiro foi de 389 milhões de reais, indicando como a produção deste fruto é impactante na economia cearense.

Figura 3 - Mapa do estado do Ceará - presença da produção da castanha de caju



Fonte: IBGE (Produção agropecuária - 2023).

Os dados numéricos categorizados por cores na parte inferior da Figura 3 estão na unidade de tonelada.

3.2 Conversão energética da biomassa

A conversão de energia a partir da biomassa desempenha um papel fundamental na transição para uma matriz energética mais limpa e renovável, sendo particularmente relevante no Brasil devido à abundância de recursos naturais e resíduos agroindustriais. Esse processo consiste em transformar a energia química contida nos materiais orgânicos em formas de energia útil, como calor, eletricidade ou combustíveis, por meio de diferentes tecnologias e rotas de conversão.

De acordo com os processos para conversão de energia explicados por Bridgwater (2006), destacam-se os processos de combustão direta ou indireta, gaseificação, pirólise e

digestão anaeróbica, quando se trata de métodos para se obter energia térmica oriundo de biomassa vegetal.

3.2.1 Combustão

A combustão direta é a forma mais tradicional de conversão de energia da biomassa e envolve a queima do material em presença de oxigênio para gerar calor. Esse calor pode ser utilizado diretamente em processos industriais ou para a geração de eletricidade, quando associado a turbinas a vapor. No Brasil, o bagaço de cana-de-açúcar se destaca como uma das principais fontes de biomassa para combustão, representando uma parcela significativa da geração elétrica a partir de fontes renováveis no país (EPE, 2024).

Segundo Nogueira e Rendeiro (2008), para cada átomo de carbono, são necessários dois átomos de oxigênio para obter-se o CO₂ (dióxido de carbono) e para cada dois átomos de hidrogênio é preciso fornecer um átomo de oxigênio para se formar uma molécula de água. Essa reação com quantidades de combustível e oxidante em precisa quantidade é denominada de reação estequiométrica, como o exemplo da equação química:



A quantidade de oxidante na reação estequiométrica depende do combustível e é obtida a partir do balanço de átomos dos reagentes e dos produtos.

3.2.1.1 Mistura ar-combustível

De acordo com o conceito básico da combustão, o ar necessário para a queima do combustível deve ser suficiente para oxidá-lo completamente, o que envolve a mistura do oxigênio (O₂) com o combustível na caldeira. A quantidade de ar necessária para uma combustão ideal é chamada de "ar estequiométrico". No entanto, na prática, é comum utilizar um excesso de ar para garantir uma combustão mais completa, o que pode ser monitorado por meio do coeficiente de excesso de ar "lambda" (λ), que compara o ar real com o ar teórico necessário. A utilização de excesso de ar pode ser vantajosa para evitar a combustão incompleta, mas também apresenta o desafio de reduzir a eficiência térmica da caldeira, já que a quantidade excessiva de ar aumenta a produção de CO₂ e diminui o aproveitamento energético do combustível (MORAN; SHAPIRO, 2006).

De acordo com Cortez e Lora (2008), os valores de volume de ar teórico, excesso de ar e volume de ar real podem ser definidos pelas equações (2), (3) e (4), respectivamente:

$$V_{ar}^{\circ} = 0,0888(C^t + 0,375S^t) + 0,265H^t - 0,0333O^t \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{21}{(21-O_2)} \quad (3)$$

$$V_{ar} = \lambda V_{ar}^{\circ} CO_2 \quad (4)$$

onde C^t representa o teor de carbono, S^t o teor de enxofre, H^t o teor de hidrogênio e O^t o teor de oxigênio, ambos na base trabalho ou base seca. V_{ar}° representa o volume de ar teórico, V_{ar} o volume de ar real e " λ " o coeficiente de excesso de ar.

Segundo Çengel (2006), a relação ar-combustível pode ser expressa em base mássica como sendo a razão entre a massa de ar e a massa de combustível num processo de combustão. Expresso pela equação (5):

$$Relação\ ar/combustível = \frac{m_{ar}}{m_{combustível}} \quad (5)$$

O excesso de ar é usado para controlar a temperatura da chama e garantir a máxima eficiência da combustão. Isso ocorre porque a presença de ar em excesso pode ajudar a reduzir a temperatura da chama, o que pode ser crucial em algumas situações industriais, como em fornos, para evitar o superaquecimento e a formação de poluentes. Além de ser a quantidade estequiométrica necessária para que haja uma completa oxidação do combustível, denominando este caso de combustão completa. Sendo desejada para que o combustível seja eficientemente utilizado e não haja poluentes oriundos de combustão incompleta, bem como, perdas caloríficas oriundos disso (ÇENGEL, 2006).

Na prática, o excesso de ar também tem um impacto direto na composição dos produtos de combustão. A adição de mais ar ao processo de combustão pode aumentar a produção de dióxido de carbono (CO_2) e vapor d'água (H_2O), contribuindo para uma combustão mais limpa e controlada (ROSADO, 2018).

3.2.2 Gaseificação

A gaseificação é um processo termoquímico que ocorre em condições de quantidade limitada de oxigênio ou em atmosfera de vapor, convertendo a biomassa em um gás de síntese (*syngas*) rico em monóxido de carbono e hidrogênio. Esse gás pode ser utilizado como combustível ou como insumo para a síntese de produtos químicos. O processo de gaseificação converte a biomassa em um gás combustível, geralmente passando por etapas como pré-tratamento da biomassa, gaseificação, e limpeza do gás gerado. Este processo pode ser integrado a tecnologias para a produção de biometanol, uma alternativa renovável ao metanol convencional (EICHLER *et al.*, 2015).

3.2.3 Pirólise

A pirólise é um processo de decomposição térmica da biomassa na ausência de oxigênio e em temperaturas relativamente baixas, resultando em três produtos principais: bio-óleo, carvão vegetal e gases. O bio-óleo, em particular, possui aplicações como combustível líquido ou como matéria-prima para a indústria química (BEENACKERS; BRIDGWATER, 1989 *apud* CORTEZ, 2008).

Esta também pode ser realizada utilizando briquetes provenientes de processos de compactação de resíduos vegetais, como subprodutos da agroindústria, resíduos da indústria de madeira e culturas agrícolas. Por meio desse processo térmico, os briquetes passam a apresentar um teor mais elevado de carbono e um aumento no poder calorífico, o que os torna mais eficientes para geração de energia e como redutores siderúrgicos. Além disso, possuem a vantagem de um formato geométrico uniforme e alta resistência mecânica, características que facilitam seu manuseio e uso em diferentes aplicações (CORTEZ; LORA, 2008).

3.2.4. Digestão Anaeróbia

A digestão anaeróbia é um processo biológico que utiliza microrganismos para decompor a matéria orgânica na ausência de oxigênio, gerando biogás (rico em metano) e digestato (um fertilizante orgânico). Esse método tem sido amplamente utilizado no Brasil para tratar resíduos provenientes da agroindústria e dejetos de origem animal. A biodigestão anaeróbia gera, como um de seus principais produtos finais, o biogás, uma mistura de gases composta principalmente por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), podendo conter

também pequenas quantidades de gás sulfídrico (H_2S), nitrogênio (N_2), hidrogênio (H_2) e outros componentes. Devido ao elevado teor de metano, o biogás pode ser aproveitado como uma eficiente fonte de combustível (CORTEZ, 2008).

3.3 Pré-tratamento da biomassa

Para a utilização de uma fonte de biomassa como combustível para energia, esta deve estar em sua melhor forma de aplicação, e, para isso, existem aprimoramentos e pré-tratamento que podem ser adotados. Portanto, pode-se afirmar que o real custo da biomassa está determinado por quatro questões: o investimento realizado, o rendimento operacional do processo, a demanda energética e a densidade final do material. Um sistema com menor quantidade de equipamentos, menor consumo de insumos e alto rendimento, resultam em custos menores e maior viabilidade (CORTEZ; LORA, 2008).

Como explica Bridgwater (2004), os tipos de pré-tratamento podem ser oriundos de processos biológicos, físicos ou mecânicos, com transformação da biomassa diretamente num produto energético ou em outro subproduto a ser beneficiado e destinado. Os processos biológicos são mais explorados pela maior gama de resultados, podendo obter-se da mesma biomassa com características melhoradas ou outros subprodutos como a cana de açúcar e o etanol. Geralmente é realizado mais de um processo para obter-se um resultado desejado, e essa mistura é determinada pelo possível retorno do investimento como abordado anteriormente. Os efeitos positivos e negativos do uso de técnicas de pré-tratamento da biomassa são abordados por diversos autores, como: Linde, J. *et al.* (2017), Cheng, Y. *et al.* (2018), Zhao, X. *et al.* (2012), Zhang, Y. *et al.* (2016), Taherezadeh, M. J e Karimi, K. (2007).

3.3.1 Técnicas de briquetagem e peletização

A técnica de adensamento é a aplicação de pressão a uma massa de partículas com ou sem adição de ligante, e com ou sem tratamento térmico posterior. Necessitando conhecer propriedades químicas e físicas do material durante o processo de aquecimento e prensa (SALEME, 1992). Com a finalidade de aumentar o teor do poder calorífico no processo de combustão, obtido com a compactação dos resíduos, em que há maior densidade de resíduo por metro quadrado e a diminuição da umidade, oriundo da prensa (QUIRINO, 2003). Porém, para se obter sucesso neste processo, é necessário que os resíduos tenham granulometria fina e

umidade entre 8 a 15% para após o processo se mantenham as características químicas (BIOMAX, 2015).

Segundo Moro (1987 *apud* BORGHI, 2012), o processo de briquetagem deve conter as etapas de: moagem do resíduo, mistura com o aglutinante (caso necessário), peneiramento (granulometria), secagem, prensagem, estocagem e embalagem. Como a biomassa oriunda da casca da castanha de caju é de grande quantidade e em pequenos tamanhos entre 30 a 50 mm, a moagem é uma necessidade para utilizá-la em processos térmicos para melhoramento da densidade. Com a presença de LCC (Líquido da Casca da Castanha), que é o óleo da casca da castanha de caju, não há necessidades de adição de aglutinantes para realização da briquetagem, se tornando viável em detrimento dos custos para realização desta prática e o aumento de eficiência calorífica resultante (GANESAN, 2022). Além de ser benéfico no processo de adensamento (briquetagem), o LCC também pode aumentar o poder calorífico da casca em alguns casos, devido a migração do óleo da castanha para a casca (FIGUEIREDO, 2009).

3.4 Caracterização da biomassa

A caracterização engloba a análise de suas propriedades físicas, químicas e estruturais de uma biomassa, para determinar seu potencial de aplicação. Essa etapa inicial inclui medições de composição química (como teor de lignina, celulose, hemicelulose, carbono fixo e cinzas), estrutura física (como granulometria e densidade) e propriedades térmicas ou de absorção. No Brasil, há poucas normas regulamentadoras orientadas pela ABNT que estipulam condições para maiores exatidões e aceitação de análise para o estudo. Dessa pode-se citar a norma NBR 8112 referente a procedimentos para avaliação imediata e determinação de propriedades como teor de cinzas, carbono fixo, umidade e voláteis. Por conta da escassez de materiais brasileiros, as normas internacionais ASTM são adotadas para complemento e referência para os ensaios.

3.4.1 Granulometria

Parte essencial para determinação de qual aplicação a biomassa será destinada e quais equipamentos poderão ser utilizados, em critérios de limitação física e química. A granulometria é a análise da distribuição dos tamanhos de partículas em um material sólido,

pode ser feita de maneira manual com peneiras ou mecanizada por meio do peso, densidade ou peneiras automatizadas (ABRÃO FILHO *et al.*, 2011).

Materiais com granulometria muito fina podem gerar problemas, como empacotamento excessivo e dificuldade de aeração, prejudicando processos de secagem ou combustão (KOPPEJAN; VAN LOO, 2007).

3.4.2 Análise elementar

A análise elementar é fundamental para caracterização da biomassa e a avaliação do seu potencial energético. Esse tipo de análise determina a composição básica de elementos como carbono (C), hidrogênio (H), nitrogênio (N), enxofre (S) e oxigênio (O), que são fundamentais para realizar cálculos e experimentos, buscando prever o comportamento térmico e ambiental da biomassa em processos como combustão, gaseificação e pirólise (NOGUEIRA; RENDEIRO, 2008). Esta análise fornece frações em peso dos elementos dos materiais combustíveis. Os principais elementos são carbono, nitrogênio e hidrogênio (FIGUEIREDO, 2009).

Pode ser realizada de várias maneiras por experimentos normatizados, como a espectrometria de fluorescência de raio-X (EFRX) que é um método analítico múltiplos elementos que possibilita medir, de forma simultânea, a concentração de diversos elementos presentes na amostra. Para isso, aplica-se um método de calibração multivariada, que minimiza os impactos das interferências entre elementos. Os dados obtidos são processados por meio de análise multivariada, utilizando-se uma curva de calibração baseada em materiais de referência certificados (BUENO, 2006 *apud* FIGUEIREDO, 2011).

3.4.3 Análise imediata

A análise imediata da biomassa é essencial para determinar propriedades críticas, como o teor de umidade, materiais voláteis, cinzas e carbono fixo. Esses parâmetros influenciam diretamente a eficiência energética e a adequação da biomassa para diferentes usos, como combustão, pirólise e gaseificação. Por exemplo, o poder calorífico da biomassa, um indicador de qualidade energética, está relacionado ao teor de umidade e à presença de componentes minerais. Altos níveis de umidade podem reduzir significativamente a eficiência energética, enquanto a quantidade de cinzas pode afetar os processos de conversão térmica e aumentar os custos de manutenção de equipamentos (PROTÁSIO *et al.*, 2011).

Estudos realizados com diferentes tipos de biomassa, como bagaço de cana e serragem de eucalipto, mostram que materiais com menor teor de umidade e cinzas possuem maior densidade energética, sendo mais apropriados para fins energéticos (MUZEL *et al.*, 2014).

3.4.3.1 Determinação do teor de umidade

É a quantidade percentual de água presente em um material em relação à sua massa total. Pode ser expressa tanto na base úmida (bu) quanto na base seca (bs) e é um parâmetro fundamental para a caracterização de diversos materiais, especialmente biomassa, alimentos, solos e madeira, pois afeta diretamente propriedades físicas e químicas, como densidade energética e estabilidade molecular (NOGUEIRA; RENDEIRO, 2008).

O teor de umidade pode ser obtido segundo a norma E871 da ASTM (citada na NBR 8112), em que se aplica 500g de amostra (preparada segundo a NBR 6923) de granulometria inferior a 19 mm, em estufa pré-aquecida a 105°C até que a massa da amostra permaneça constante. Após este ensaio, pode ser calculada analiticamente a umidade em base úmida, pela razão entre a diferença da massa inicial (m_1) e a massa final após o aquecimento (m_2), pelo valor inicial, expressa pelas equações (6) e (7):

$$\text{Teor de umidade} = (m_1 - m_2) / m_1 \times 100 (\%bu) \quad (6)$$

$$\text{Teor de umidade} = (m_1 - m_2) / m_2 \times 100 (\%bs) \quad (7)$$

3.4.3.2 Determinação do teor de voláteis

Refere-se à quantidade de substâncias que se volatilizam quando um material é submetido a altas temperaturas. É uma propriedade fundamental em diversos contextos, como na análise de combustíveis sólidos (carvão e biomassa), polímeros, e outros materiais termoativos, e é utilizado para avaliar a composição química e o comportamento térmico desses materiais. O cálculo do teor de voláteis é realizado por meio de análise de ensaios, que seguem procedimentos padronizados como os descritos nas normas ASTM D3175 ou ISO 562 para materiais sólidos combustíveis. Nesse método, a amostra é aquecida em uma atmosfera controlada, sem oxigênio, a uma temperatura específica (geralmente cerca de 900°C) por um tempo determinado. A perda de massa durante o aquecimento, excluindo a umidade previamente eliminada, é atribuída aos voláteis.

Segundo Speight (2015), o teor de voláteis é diretamente relacionado ao comportamento de combustão dos materiais, pois essas substâncias são geralmente os primeiros componentes a serem liberados e queimados em processos térmicos.

De acordo com a NBR 8112 e E872 da ASTM, pode ser calculado o valor de teor de voláteis medindo-se a fração em massa da biomassa que volatiza durante o aquecimento de uma amostra padronizada até temperaturas de aproximadamente 850°C num forno mufla por 7 minutos, obtendo o resultado a partir da seguinte equação (8):

$$\text{Teor de voláteis} = \frac{m_2 - m_3}{m_2} \times 100 (\%)_{\text{bs}} \quad (8)$$

onde m_2 é a massa da amostra inicial e m_3 é a massa residual da amostra após o experimento de aquecimento em alta temperatura, ambos em unidades de gramas.

3.4.3.3 Determinação do teor de Cinzas

O teor de cinzas na biomassa é um parâmetro importante para avaliar a qualidade do combustível, já que influencia a eficiência da combustão e pode causar problemas operacionais. As cinzas representam a parte não combustível da biomassa, podendo ser composta por materiais como sais, minerais e elementos metálicos, que podem se comportar de maneiras distintas durante a queima. A quantidade de cinzas pode variar substancialmente a depender da biomassa, o que impacta a produção de energia e pode levar a formação de escórias e incrustações nos sistemas de combustão (BIEDERMANN, 2005).

De acordo com Vamvuka (2009), a precisão na determinação do teor de cinzas depende de fatores como a temperatura de calcinação, o tempo de permanência e a homogeneidade do aquecimento. Alterações nesses parâmetros podem levar à perda de componentes voláteis das cinzas ou à formação de compostos secundários, o que pode subestimar ou superestimar o valor real.

Segundo a NBR 8112 e a D1102 da ASTM, experimentalmente um grama de biomassa, já sem umidade e voláteis, é colocada em um cadinho e levada ao interior de um forno. Com temperatura já elevada para 710°C, permanece por uma hora até que no cadinho fique apenas as cinzas, assim é possível calcular, pela seguinte equação (9):

$$\text{Teor de cinzas} = (m_3 - m_4) / m_3 \times 100 (\%)_{\text{bs}} \quad (9)$$

onde m_3 é a massa da amostra inicial e m_4 é a massa residual da amostra após o experimento de aquecimento em alta temperatura com cadinho, ambos em unidades de gramas.

3.4.3.4 Determinação do teor de carbono fixo

O carbono fixo é a fração de carbono presente na biomassa após a remoção de voláteis e água, e é responsável pela maior parte da energia liberada durante a combustão. Em biomassa, o teor de carbono fixo tende a ser menor em comparação ao carvão, que tem uma maior proporção de carbono fixo e menor de voláteis. A determinação do carbono fixo também pode ser feita a partir de técnicas de análise como a análise termogravimétrica (TGA) ou análise proximal, que examinam as perdas de massa da amostra em diferentes condições térmicas (FIGUEIREDO, 2011).

Segundo a NBR 8112, após determinados os teores de umidade, voláteis e de cinzas, o teor de carbono fixo é obtido por diferença, pela seguinte equação (10):

$$\text{Teor de carbono fixo} = 100 - (\text{Teor de voláteis} + \text{Teor de cinzas}) (\%_{\text{bs}}) \quad (10)$$

3.4.4 Poder calorífico

O poder calorífico é uma medida que pode ser definida como a quantidade de energia liberada pela biomassa durante a combustão completa por unidade de massa do combustível, com medida comum de kJ/kg. Pode ser classificado em poder calorífico superior (PCS), que inclui a energia de condensação da água gerada, e poder calorífico inferior (PCI), que desconsidera essa energia (CORTEZ; LORA, 2008).

Esses valores são determinados experimentalmente ou por correlações baseadas em análises químicas da biomassa. Na literatura acadêmica, há diversas pesquisas de determinação do poder calorífico, com relação à informações químicas do combustível e simulações de uso. Por exemplo, Demirbas (1997) desenvolveu uma equação para prever o PCS a partir do carbono fixo presente, mostrando forte correlação experimental.

O PCS da biomassa é diretamente influenciado por sua composição química, especialmente pelo teor de carbono fixo e pela presença de voláteis e cinzas. Estudos indicam que espécies como o eucalipto apresentam elevados valores de PCS devido à baixa proporção de umidade e cinzas, o que aumenta sua eficiência energética (PROTÁSIO, 2011).

3.4.4.1 Poder calorífico superior

O poder calorífico superior (PCS) é um parâmetro essencial na análise da biomassa, pois mede a quantidade total de energia liberada durante a combustão completa de um material, incluindo o calor de condensação do vapor d'água gerado. No Brasil, materiais como o bagaço de cana-de-açúcar, o capim-elefante, resíduos de madeira e carvão vegetal têm se destacado como fontes importantes de biomassa. Por exemplo, o bagaço de cana-de-açúcar apresenta um PCS médio de 2.130 kcal/kg, enquanto a lenha alcança cerca de 3.100 kcal/kg, sendo amplamente utilizada em caldeiras para geração de energia térmica e elétrica em usinas (SILVA, 2016).

A partir de uma análise estatística de dados de composição de amostra e poder calorífico, Jenkins (1990 *apud* CORTEZ;LORA, 2008) obteve algumas relações empíricas que estimam o poder calorífico com base na composição de uma amostra, nas equações (11) e (12):

$$\text{PCS}^s = 2,3381 + 0,351C^s \quad \text{com um } R^2 = 0,805 \quad (11)$$

$$\text{PCS}^s = 20,180 - 0,203A^s \quad \text{com um } R^2 = 0,498 \quad (12)$$

onde A^s representa o teor de cinzas da amostra e C^s o teor de carbono, ambos na base trabalho ou base seca. “ R^2 ” é a taxa de erro percentual da equação.

Para conversão de base seca para base trabalho, é feita a exclusão da porcentagem de umidade na base trabalho, na seguinte operação (13):

$$\text{PCS}^t = \text{PCS}^s \times [100 - W^t] \quad (13)$$

onde W^t representa o teor de umidade da amostra e PCS^s o poder calorífico superior da amostra, ambos na base trabalho ou base seca.

3.4.4.2 Poder calorífico inferior

O poder calorífico inferior (PCI) refere-se à quantidade de energia liberada durante a combustão, considerando a perda de energia associada à evaporação da água presente nos gases de combustão. Esta medida é essencial para avaliação de viabilidade energética de diferentes tipos de biomassa e aplicações, como geração de energia térmica.

No Brasil, por exemplo, o bagaço de cana-de-açúcar, uma biomassa amplamente utilizada no país, apresenta um PCI médio de cerca de 18.135 kJ/kg, sendo uma opção eficiente para uso em caldeiras e processos industriais. Outras biomassas, como serragem e cavaco de eucalipto, possuem valores similares, destacando-se pela densidade energética e baixa emissão de poluentes. (SILVA, 2023).

A biomassa com altos valores de PCI é a preferida, pois, indica maior eficiência na liberação de energia durante a combustão, uma característica desejável para substituir combustíveis fósseis (FERREIRA *et al.*, 2024).

Cortez e Lora (2008) atribuem que para o cálculo do poder calorífico inferior (em kJ/kg) a fórmula mais adequada é a de Mendeliev a partir dos dados da composição elementar do combustível é a seguinte equação (14):

$$\text{PCI}^t = 339C^t + 1030H^t - 109(O^t - S^t) - 24W^t \quad (14)$$

onde C^t representa o teor de carbono, S^t o teor de enxofre, H^t o teor de hidrogênio, O^t o teor de oxigênio e W^t o teor de umidade da amostra, ambos na base trabalho ou base seca.

De forma breve, a equação de Mendeliev apresentou um erro menor em detrimento das propostas por Jenkins, mas, requer uma análise elementar completa, sendo baseada na composição química da amostra e não em uma relação estatística (CORTEZ;LORA, 2008).

3.6 Caldeiras

Segundo Çengel (2006), caldeiras são dispositivos utilizados para gerar vapor a partir de água, que é aquecida por uma fonte de calor. Esse processo ocorre através da transferência de calor dos gases de combustão para a água presente nos tubos da caldeira. Dependendo do tipo de caldeira, a transferência de calor pode ser realizada de diferentes maneiras, com caldeiras de tipo flamotubular ou aquatubular sendo algumas das opções mais comuns.

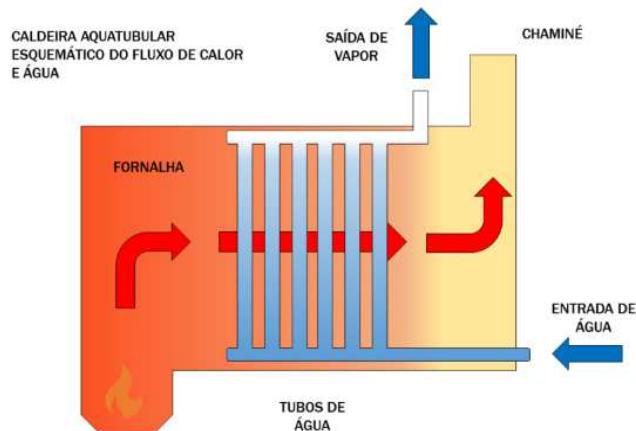
Caldeiras mistas (Figura 6) combinam características estruturais e funcionais de caldeiras flamotubulares e aquatubulares. A geração de vapor inicia-se na fornalha, que é revestida por tubos metálicos preenchidos com água, conhecidos como paredes d'água. Esses tubos recebem calor diretamente dos gases aquecidos que passam pelo lado externo, um atributo típico das caldeiras aquatubulares. Na etapa seguinte, o processo assume

características das caldeiras flamotubulares, onde os gases quentes fluem pelo interior dos tubos, transferindo calor para a água ao redor. Essa combinação oferece uma solução eficiente e econômica, particularmente em cenários onde combustíveis sólidos de baixo custo estão disponíveis, tornando-se uma escolha vantajosa para várias aplicações industriais.

As caldeiras de tipo flamotubular, por exemplo, têm os gases de combustão circulando por dentro dos tubos enquanto a água está ao redor desses tubos. As aquatubulares têm a água circulando pelos tubos e sendo aquecida externamente pelos gases de combustão (CENGEL, 2006).

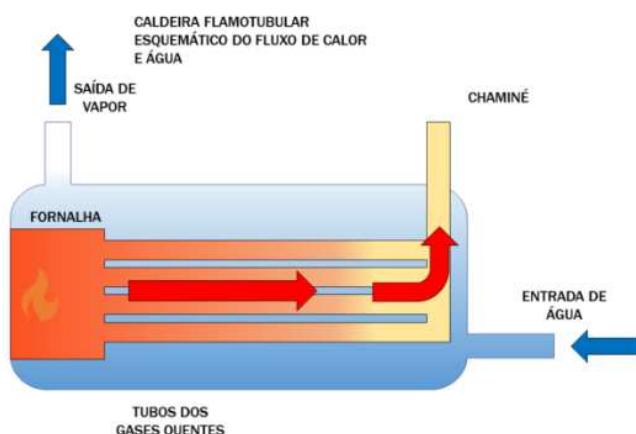
Nas Figuras 4, 5 e 6 é possível verificar imagens esquemáticas do funcionamento de caldeiras do tipo aquatubular, flamotubular e mista, respectivamente:

Figura 4 - Esquema funcional de aquecimento de uma caldeira aquatubular



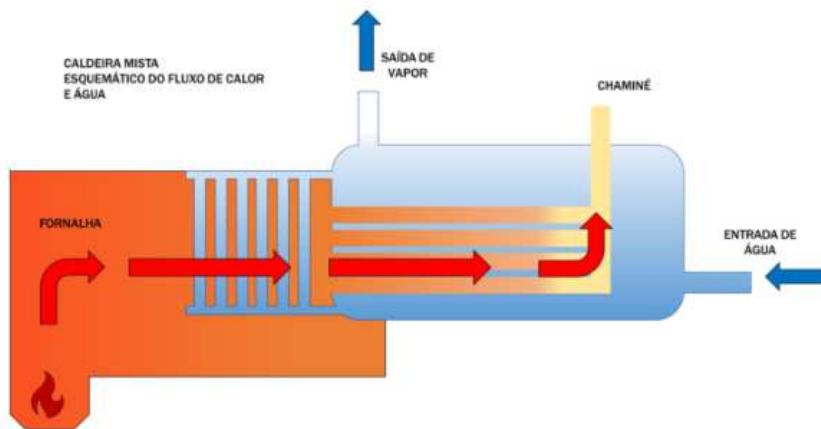
Fonte: Togawa Engenharia (2020). Blog.

Figura 5 - Esquema funcional de aquecimento de uma caldeira flamotubular



Fonte: Togawa Engenharia (2020). Blog.

Figura 6 - Esquema funcional de aquecimento de uma caldeira mista



Fonte: Togawa Engenharia (2020). Blog.

3.6.1 Entalpia dos gases dos produtos da combustão

Cortez e Lora (2008), explicam que a entalpia real dos gases produtos da combustão pode ser determinada (para um volume de gases obtidos durante a combustão de 1 kg de combustível) pela equação (15):

$$hg = hg^\circ + har^\circ(\lambda - 1), \text{ kJ/kg} \quad (15)$$

onde hg é a entalpia dos gases, hg° representa a entalpia teórica dos gases e har° corresponde à entalpia teórica do ar de admissão (vapor).

Sendo, a entalpia teórica dos gases (hg°) definida pela equação (16):

$$hg^\circ = V^\circ_{RO_2}(c.t)_{RO_2} + V^\circ_{N_2}(c.t)_{N_2} + V^\circ_{H_2O}(c.t)_{H_2O} + (c.t)_{cinzas} \left(\frac{At}{100} \right) a_{arr}, \text{ kJ/kg} \quad (16)$$

onde $(c.t)_{RO_2}$, $(c.t)_{N_2}$, $(c.t)_{H_2O}$, $(c.t)_{cinzas}$ representam as entalpias médias dos gases triatômicos (RO_2), nitrogênio, vapor d'água e cinzas, respectivamente. At corresponde ao teor de cinzas da amostra na base trabalho e “ a_{arr} ” é a fração de cinzas arrastada pelos gases (%).

E, a entalpia teórica do ar calculada pela equação (17):

$$h_{ar}^\circ = V^\circ_{ar}(c.t)_{ar}, \text{ kJ/kg} \quad (17)$$

onde $(c.t)_{ar}$ representa a entalpia média do ar em temperatura dos gases de exaustão.

Para a determinação do volume dos gases produtos da combustão para os gases triatômicos (RO_2), do gás nitrogênio e do gás de vapor d'água (H_2O), podem ser utilizadas as equações (18), (19) e (20), respectivamente:

$$V^o_{RO_2} = 0,01866(C^t + 0,375S^t) \quad (18)$$

$$V^o_{N_2} = 0,79V^o_{ar} + 0,008N^t \quad (19)$$

$$V^o_{H_2O} = 0,111H^t + 0,01214W^t + 0,016V^o_{ar} \quad (20)$$

A equação fundamental da combustão é deduzida a partir da equação de equilíbrio do oxigênio, uma vez que o oxigênio representa 21% do volume do ar, a porcentagem de oxigênio presente nos produtos da combustão deve representar essa fração volumétrica (JZMALIAN, 1976 *apud* CORTEZ; LORA, 2008). Portanto, temos a equação (21) fundamental para uma combustão incompleta (real):

$$21 = RO_2 + O_2 + \beta RO_2 + (0,605 + \beta)CO \quad (21)$$

Organizando, tem-se a equação (22) para estimar a percentagem de CO na saída dos produtos de combustão:

$$CO = \frac{21 - \beta RO_2 - (RO_2 + O_2)}{\beta + 0,605} \quad (22)$$

onde β (coeficiente de Bunte) e a percentagem de RO_2 nos gases de escape são determinados pelas equações (23) e (24), respectivamente:

$$\beta = 2,35 \frac{H^t - 0,12640^t + 0,038N^t}{C^t + 0,375S^t} \quad (23)$$

$$RO_2 = \frac{(21 - O_2)}{1 + \beta} \quad (24)$$

Portanto, para a determinação do volume dos gases produtos da combustão, tem-se que é igual a soma dos gases secos com o de vapor d'água, originando nas equações de

gases secos (25), vapor d'água (26), volume teórico de gases (27) e volume real de gases (28), respectivamente:

$$V_{gs} = V^o_{RO_2} + V^o_{N_2} + (\lambda - 1)V^o_{ar} \quad (25)$$

$$V_{H_2O} = V^o_{H_2O} + 0,0161(\lambda - 1)V^o_{ar} \quad (26)$$

$$V^o_g = V^o_{RO_2} + V^o_{N_2} + V^o_{HO_2} \quad (27)$$

$$V_g = V^o_g + 1,0161(\lambda - 1)V^o_{ar} = V_{gs} + V_{H_2O} \quad (28)$$

A concentração de cinzas nos produtos de combustão podem ser determinadas pela equação (29):

$$\mu = \frac{(10A^t a_{ar})}{V_g} \quad (29)$$

A determinação do coeficiente de excesso de ar na saída da caldeira é dado pela equação (30):

$$\lambda_{ge} = \frac{21}{(21 - O_2)} \quad (30)$$

A entalpia de ar frio pode ser determinada pela equação (31):

$$h_{af}^o = V^o_{ar} \times C_{af} \times t_{af} \quad (31)$$

3.6.2 Avaliação de caldeiras

Por balanço energético pode-se avaliar a relação entre as propriedades térmicas de saída e entrada, logo, a eficiência de uma caldeira a partir de um material energético. Objetivando o rendimento positivo do sistema térmico, buscando entender quais variáveis são mais influentes nas perdas térmicas do processo, como a utilização e passagem em cada equipamento da caldeira, bem como as características naturais da biomassa ou material energético. Esse balanço pode ser realizado de forma direta, se comparando o calor útil na queima e o calor disponível; e de forma indireta, onde se consideram perdas caloríficas mais aprofundadas e oriundas dos processos da combustão (CORTEZ; LORA, 2008).

3.6.2.1 Balanço de energia (método indireto)

Devido ao poder de quantificar as perdas energéticas para um fluxo de massa especificado, conhecendo as causas e intensidades é possível encontrar técnicas para mitigá-las ou amenizá-las para um funcionamento da caldeira mais eficiente (NOGUEIRA; RENDEIRO, 2008).

Para isso, o balanço térmico pode ser descrito para um fluxo de massa de combustível unitário, sendo atribuída a equação (32) e mais especificamente na equação (33):

$$Q_{\text{entrada}} = Q_{\text{saída}} \quad (32)$$

$$Q_c + Q_{ar} = Q_{\text{Útil}} + Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_c + Q_{ar} \quad (33)$$

onde, Q_{entrada} é a soma do calor do combustível previamente aquecido ou calor necessário para aquecer o combustível (Q_c) e o calor do ar previamente aquecido ou o calor para aquecê-lo (Q_{ar}). E, $Q_{\text{saída}}$ é a soma de todas as perdas caloríficas de Q_1 a Q_5 , e de Q_c e Q_{ar} .

3.6.2.2 Eficiência da caldeira

Quando o combustível e/ou o ar já são aquecidos na caldeira, devem ser desconsiderados, uma vez que o calor ganho é igual ao calor gasto para aquecer o sistema. Portanto, a eficiência do sistema pode ser obtida pela equação (34):

$$n = 100 - \left(\frac{\sum Q_{\text{Perdas}}}{Q_{\text{Disponível}}} \right) \times 100 \quad (34)$$

3.6.2.3 Calor do combustível e do ar

Para aquecimento do ar e do combustível, é realizada a diferença da temperatura de entrada de cada um destes para a temperatura de referência de (25°C) multiplicada pela massa e calor específico. Podem ser obtidos pelas equações (35) e (36):

$$Q_{ar} = m_{ar} \times c_{p,ar} \times (T_{ar} - T_{\infty}) \quad (35)$$

$$Q_c = m_c \times c_p \times (T_c - T_\infty) \quad (36)$$

onde m_{ar} e m_c são as massas de ar de admissão e de combustível, respectivamente. $c_{p,ar}$ corresponde ao calor específico do ar admitido e c_p equivale ao calor específico do combustível.

3.6.2.4. Calor disponível e calor útil

O calor necessário para transformar a água em vapor e elevá-la à temperatura desejada é denominado calor útil. Já o calor disponível corresponde à quantidade de energia térmica efetivamente aproveitável para a geração de vapor e aquecimento, sendo a soma de PCI e calor físico de combustível e ar. Podem ser obtidos pelas equações (37) e (38):

$$Q_{Disponível} = PCI^t + Q_c + Q_{ar} \quad (37)$$

$$Q_{Útil} = m_v \times [(h_{vap} - h_{aa}) + (\frac{m_p}{m_v}) \times (h_p - h_{aa})] \quad (38)$$

3.6.2.5 Perda de calor nos gases de escape

O calor perdido nos gases de escape é a energia térmica que não é aproveitada no processo e é liberada junto com os gases resultantes da combustão, reduzindo a eficiência do sistema. Pode ser obtido pela equação (39) com referência a relação de ar/combustível que pode ser obtida a partir dos dados químicos da biomassa pela equação (40):

$$Q_1 = m_c \times (\frac{A}{C} + 1) \times (T_g - T_\infty) \quad (39)$$

$$\frac{A}{C} = 0,1149C^t + 0,3448H^t + 0,0431(S^t - O^t) \quad (40)$$

onde $\frac{A}{C}$ é a relação ar/combustível calculada pelos teores dos componentes químicos do combustível. T_g equivale a temperatura dos gases de escape e T_∞ é a temperatura de referência padrão 25°C.

3.6.2.6 Perda de calor devido à combustão química incompleta

A perda de calor devido à combustão química incompleta ocorre quando o combustível não queima totalmente, resultando na formação de monóxido de carbono (CO) e outros resíduos combustíveis, reduzindo a eficiência do sistema e desperdiçando energia potencial. Pode ser obtida pela equação (41):

$$Q_2 = \left(\frac{m_{ar} + m_c}{\rho_g} \right) \times V_g \times (126 CO + 108H_2 + 358 CH_4) \quad (41)$$

onde V_g é o volume dos gases de exaustão e CO , H_2 e CH_4 são os teores dos gases monóxido de carbono, hidrogênio e metano presentes nos gases de exaustão.

3.6.2.7 Perda de calor devido à combustão mecânica incompleta

A perda de calor devido à combustão mecânica incompleta (q_3) ocorre quando parte do combustível não é devidamente pulverizada, misturada ou alimentada na câmara de combustão, resultando na sua queima parcial ou na eliminação de resíduos não queimados, o que reduz a eficiência do processo de combustão. Pode ser obtida pela equação (42):

$$q_1 = \left(\frac{h_{gee} - a_g \times h_{af}^0}{Q_d^t} \right) \times (100 - q_3) \quad (42)$$

onde, “ q_1 ” é a percentagem de perda de calor nos gases de escape em relação ao calor disponível total.

3.6.2.8 Perda de calor devido ao arrefecimento externo da caldeira

A perda de calor devido ao arrefecimento externo da caldeira ocorre quando a energia térmica se dissipa para o ambiente através das superfícies da caldeira, devido a isolamento inadequado ou trocas térmicas naturais, reduzindo a eficiência do sistema. Pode ser obtida pela equação (43):

$$Q_4 = A_v(h_{conv} + h_{rad}) \times (T_g - T_\infty) \quad (43)$$

onde os coeficientes de radiação (h_{rad}) e convecção (h_{conv}) são determinados por meio de correlações específicas de transferência de calor.

Em caldeiras com paredes totalmente irradiadas, como aquelas com parede d'água e revestimento refratário, as perdas térmicas variam entre 0% e 2%. Por outro lado, caldeiras desprovidas de paredes podem apresentar perdas de até 6% (CORTEZ; LORA, 2008).

3.6.2.9 Perda de calor devido à escória

A perda de calor devido à escória ocorre quando parte da energia térmica é absorvida e retida pelos resíduos sólidos da combustão, como cinzas e depósitos fundidos, que são removidos do sistema sem que seu calor seja reaproveitado, resultando em uma diminuição da eficiência térmica da caldeira. Esta perda pode ser obtida pela equação (44):

$$Q_5 = m_c (1 - a_{arr}) \times \left(\frac{A_t}{100}\right) \times c_{p,ar} [(T_{esc} - T_\infty) + Q_{fusão}] \quad (44)$$

onde “ a_{arr} ” é aproximado para biomassa e foi utilizado como base de cálculo neste trabalho no valor de 0,6. E, o valor do calor de fusão da escória “ $Q_{fusão}$ ” é em torno de 250 kJ/kg.

3.6.2.10 Eficiência pelo balanço inverso

Ademais, para cálculo da eficiência também pode ser aplicada a equação obtida pelo balanço inverso, onde se consideram apenas as perdas térmicas, que pode ser descrita pela equação (45) que é o somatório das perdas em percentual subtraído de 100:

$$n_b = 100 - \frac{(Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5)}{Q_{disponível}} \quad (45)$$

3.6.2.11 Determinação da vazão de combustível

A partir dos valores de eficiência obtida do balanço inverso, calor disponível total e calor útil, é possível estipular um valor ideal para a vazão de entrada de combustível, uma vez que determinada uma vazão inicial. Visando obter a melhor opção de caldeira para a biomassa explorada, o valor de vazão é importante para que esta seja aceitável e possa ser tecnicamente aceita. O valor calculado para a vazão pode ser obtido pela equação (46) que é a razão entre o calor útil e o calor disponível multiplicado pela eficiência:

$$m_c = \frac{Q_{\text{útil}}}{0,01 \times Q_d \times n_b} \quad (46)$$

3.6.3 Dimensionamento de uma planta de potência a vapor

O dimensionamento de uma planta de potência é o processo de definir a capacidade, os equipamentos e a infraestrutura necessários para atender à demanda de energia de um determinado local ou aplicação. Esse processo envolve a análise de fatores como consumo energético, disponibilidade de combustível (no caso de uma usina a biomassa), eficiência dos equipamentos, perdas no sistema e aspectos econômicos e ambientais (MORAN; SHAPIRO, 2006).

Para isso pode ser utilizada a metodologia adotada por Nogueira e Rendeiro (2008) para dimensionamento de uma planta a vapor, tendo como parâmetros iniciais a potência nominal da planta a ser adotada e o consumo específico de vapor da turbina. A partir destas informações, pode-se determinar a quantidade de biomassa a ser consumida com base nos cálculos anteriormente apresentados. Para as informações dos equipamentos periféricos da planta como o volume do tanque de condensado e a capacidade térmica do condensador podem ser obtidos pela quantidade e qualidade do vapor gerado no ciclo termodinâmico.

A metodologia adotada para dimensionar uma planta de potência a vapor passa pelos seguintes pontos:

1. Quantificar a demanda de energia a ser fornecida para a planta utilizando-se da curva de carga calculada;
2. Quantificar e qualificar a biomassa disponível para o processo, conhecendo o PCI^t e características da biomassa;
3. Escolher o tipo de máquina a vapor a ser utilizada no projeto: turbina ou máquina alternativa a vapor;
4. Obter do fabricante da turbina ou máquina alternativa a vapor, o consumo específico e as características dimensionais dos equipamentos;
5. Calcular a quantidade de vapor necessária para atender a demanda de energia;
6. Com base na quantidade e qualidade do vapor necessário, determinar o dimensionamento da caldeira e obter do fabricante suas especificações dimensionais. Escolher o tipo de fornalha adequado conforme a biomassa disponível;
7. Identificar a quantidade de biomassa a ser disponibilizada;

8. Calcular o volume do tanque de condensado determinada por 1,5 vezes a quantidade de vapor/h necessária no processo;
9. Calcular a capacidade térmica do condensador com base nos dados de pressão e temperatura do vapor na entrada, vazão de vapor, temperatura do condensado na saída, além da vazão e temperatura da água de resfriamento. Solicitar ao fabricante as especificações dimensionais do equipamento;
10. Realizar um levantamento de consumo de energia da planta para definir as cargas parasitas da usina.

3.6.3.1 Demanda reprimida

A demanda reprimida refere-se à necessidade ou desejo por um bem ou serviço que não é atendido devido a barreiras como restrições econômicas, falta de infraestrutura ou limitações regulatórias. Esse conceito é amplamente discutido em setores como energia, saúde e transporte. No setor de energia elétrica, representa o consumo potencial que não é realizado devido a restrições de acesso, seja por ausência de infraestrutura ou por limitações econômicas dos consumidores (EPE, 2015).

3.6.3.2 Carga parasitária

A carga parasitária (conhecida como consumo fantasma ou *standby power*) refere-se à energia elétrica consumida por dispositivos eletrônicos quando não estão em uso ativo, mas permanecem conectados à rede elétrica. Esse consumo ocorre, por exemplo, em aparelhos como televisores, carregadores de celular, micro-ondas, roteadores e computadores que ficam em modo de espera (*standby*) ou mesmo desligados, mas ainda conectados à tomada. No setor de energia, a carga parasitária está presente nos maquinários onde há alimentação elétrica para que operem ou perdas durante a geração de energia elétrica. Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA, 2014), no mundo, o consumo de energia devido a cargas parasitas chega a cerca de 400 TWh por ano.

4 METODOLOGIA

Neste trabalho, foram analisadas diferentes composições de materiais combustíveis da mesma espécie e como suas quantidades de teor de carbono, cinzas e umidade se comportam em situações específicas. Para isso, foram utilizados dados de caracterização de três amostras de biomassa de casca da castanha de caju, oriundas de pesquisas científicas de outros autores, descritas pela Amostra 1 referente ao trabalho de Figueiredo (2009), Amostra 2 referente a pesquisa de Tavares (2014) e Amostra 3 referente a pesquisa de Figueiredo (2011). Utilizando-se das informações de análise elementar e análise imediata, foram aplicadas as equações termodinâmicas adequadas para o dimensionamento de uma planta de potência a vapor e posterior avaliação de caldeira, para obtenção da eficiência por balanço térmico e vazão mássica de combustível necessária. O principal objetivo foi entender como as variações químicas do combustível de uma mesma espécie influenciam na eficiência de uma planta de potência a vapor, ajudando a esclarecer aspectos importantes sobre seu impacto no ambiente e no setor energético.

Foram avaliados dados calculados, como emissão de gases de exaustão, poder calorífico e perdas de calor, para dimensionar o potencial energético e viabilidade do aproveitamento do resíduo da casca da castanha de caju. E, ao final, foram feitos comparativos entre os resultados obtidos para escolha da amostra de biomassa mais adequada e obtenção da eficiência da planta de potência a vapor, bem como sugeridas melhorias e formas de mitigação das perdas caloríficas.

4.1 Caracterização

Os dados iniciais de natureza das amostras de biomassa foram obtidos explorando resultados experimentais de três diferentes fontes da casca da castanha de caju do Nordeste do Brasil, sendo submetidas (ou não) a processos de beneficiamento específicos como briquetagem e moagem em bolas (visando atingir valores em análise imediata adequados para uma melhor combustão).

Para Amostra 3, a análise elementar foi obtida a partir dos ensaios realizados via EF14RX (espectrometria de fluorescência de raio-x), utilizando de um equipamento EDX 700 da Shimadzu e amostras de 200 mg, que foram diretamente irradiadas com 6 replicatas. Na Amostra 2 utilizou-se um instrumento microanalisador CHN, Perkin Elmer, Série 2-2400m, onde determinou os teores de carbono, nitrogênio e hidrogênio, com amostras de 1g secadas

em estufa a 100°C e pré-trituradas. Já para Amostra 1 obteve-se os valores de análise elementar por um laboratório parceiro, no *Instituto de Carboquímica da Unidad de Apoyo a La Investigación de Zaragoza* (ICB-CSIC), onde foram seguidas as normas da ASTM. Os resultados dos valores obtidos de análise elementar e de análise imediata estão dispostos nas Tabelas 2 e 3, respectivamente.

Tabela 2 - Análise elementar das amostras de biomassa para cada autor.

| | Amostra 3 | Amostra 2 | Amostra 1 |
|-------|------------------|------------------|------------------|
| C (%) | 49,88 | 47,49 | 52,91 |
| H (%) | 6,65 | 6,01 | 6,87 |
| N (%) | 0,60 | 0,44 | 0,78 |
| O (%) | 42,87 | 46,06 | 39,44 |
| S (%) | 0 | 0 | 0 |

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 3 - Análise imediata obtida pelos autores das amostras de biomassa.

| | Amostra 3 | Amostra 2 | Amostra 1 |
|------------------------------|------------------|------------------|------------------|
| UMIDADE (%) | 7,60 | 6,04 | 9,31 |
| CARB. FIXO (%) | 20,10 | 22,36 | 20,71 |
| VOLÁTEIS (%) | 78,40 | 65,32 | 78,12 |
| CINZAS (A ^t) (%) | 1,60 | 12,32 | 1,16 |

Fonte: elaborado pelo autor.

4.2 Análises iniciais

A partir das informações básicas de análise elementar e análise imediata das amostras de biomassa abordadas, foi possível utilizar equações para estimar características importantes para o funcionamento do processo da combustão. Utilizando os dados da Tabela 2 e as equações 2, 3 e 4, obteve-se a quantidade necessária de ar para se ter uma combustão completa ou volume de ar teórico (Var^o), o coeficiente de excesso de ar e o volume de ar real (Var).

Como explica Çengel (2006), o excesso de ar é necessário para se garantir a eficiência do processo, uma vez que evita emissões de COx nos produtos e outros materiais não esperados e utiliza a maioria do combustível disponível para a combustão.

4.3 Poder calorífico

Utilizando-se dos dados da Tabela 2 e da equação 14 de Mendeliev, foi feito o cálculo do poder calorífico inferior na base seca, para as três fontes de casca da castanha de caju e comparados em gráfico a diferença entre cada. Com a ênfase no impacto dos dados de teor de carbono, teor de oxigênio e umidade explanados nas Tabelas 2 e 3, durante análise elementar e imediata das amostras para o valor final de poder calorífico inferior, indicados na equação utilizada. Com valores bem próximos para o PCI na base seca, a biomassa beneficiada de Figueiredo (2009) foi superior às demais, por conta dos valores de umidade mais adequados à biomassa e menor teor de concentração de cinzas, atingindo valor de PCI de 20,45 MJ/kg.

Semelhantemente, para o cálculo do poder calorífico superior na base seca foram utilizadas a informação de teor de carbono da Tabela 2 e a equação 10, resultando em valores aproximados ao PCI, já que a mesma considera a energia de condensação da água gerada (CORTEZ; LORA, 2008).

4.4 Entalpia e emissões dos gases de escape

Com base nos dados experimentais conhecidos da natureza da biomassa, de análise elementar descritos na Tabela 2 e análise imediata na Tabela 3, foram utilizadas as equações 17, 18 e 19 para obter os dados de volume dos gases de escape triatômicos, nitrogênio e de vapor d'água, que estavam intrinsecamente atrelados aos teores químicos do combustível, umidade e valor de excesso de ar.

A partir dos valores em massa dos gases de escape e cinzas, pode-se encontrar o valor de entalpia dos gases pelas equações 14, 15 e 16. Uma vez que conhecida a temperatura desejada na saída dos gases de escape, com dados tabelados para as informações de entalpia média para RO₂, H₂O, N₂, ar e cinzas. Que para este estudo foi estipulado uma temperatura de gases de escape em 200°C.

4.5 Quantitativo de resíduo a ser utilizado

Para o dimensionamento da planta a vapor, a quantidade de resíduo e geração esperada foi ambientada na cidade de Bela Cruz no Ceará, segunda maior produtora de castanha de caju do estado e terceira da região nordeste, seguida por Beberibe, no Ceará, e

Serra do mel, no Rio Grande do Norte. Em 2023, houve produção de 7.803 toneladas no ano, com perspectivas positivas para os anos seguintes no município e em toda a região do vale do Acaraú (IBGE, 2023). Segundo o IPECE (2024), o consumo anual de energia elétrica para o município de Bela Cruz é de 23.239,31 MWh, com boa parte advinda das residências e clientes de baixa potência. Por se tratar de uma região interiorana, não predomina o consumo industrial como as capitais e os centros das maiores cidades do estado.

Conforme explica Santos (2017), em massa, a casca da castanha tem parcela de aproximadamente 72,5% do fruto, logo, pode-se estimar a quantidade deste resíduo com base na quantidade produzida da castanha de caju *in natura* para uma região. Portanto, aplicando a razão de casca/fruto e considerando que no ano tem 365 dias e cada dia 24 horas, pode-se adotar a seguinte equação (47):

$$\text{Vazão de resíduo (casca)} = \text{Peso em toneladas por ano} \times \frac{72,5}{100} \times \frac{1000}{365 \times 24} \quad (47)$$

Que aplicada a produção de 7.803 toneladas ao ano, aproximadamente haverá um valor de resíduo da CCC de 645,79 kg/h.

4.6 Dimensionamento da planta térmica a vapor

Para a dimensionamento e aplicação da planta de potência, foi usada a metodologia de Nogueira e Rendeiro (2008) com a escolha de utilização de equipamentos com distribuição nacional e marcas com grande nome no mercado. Foram utilizadas as informações de análise elementar e análise imediata das três amostras de biomassa apresentadas neste trabalho em base seca. As seguintes premissas técnicas foram necessárias para cálculo e dimensionamento dos equipamentos:

- Relação de produção de vapor em 1 kg de massa de combustível para 5 kg de vapor da turbina;
- Consumo específico de vapor da turbina em 6,5 kg/kWh;
- Volume do tanque do condensador equivale a 1,5 vezes o valor de vapor na turbina.

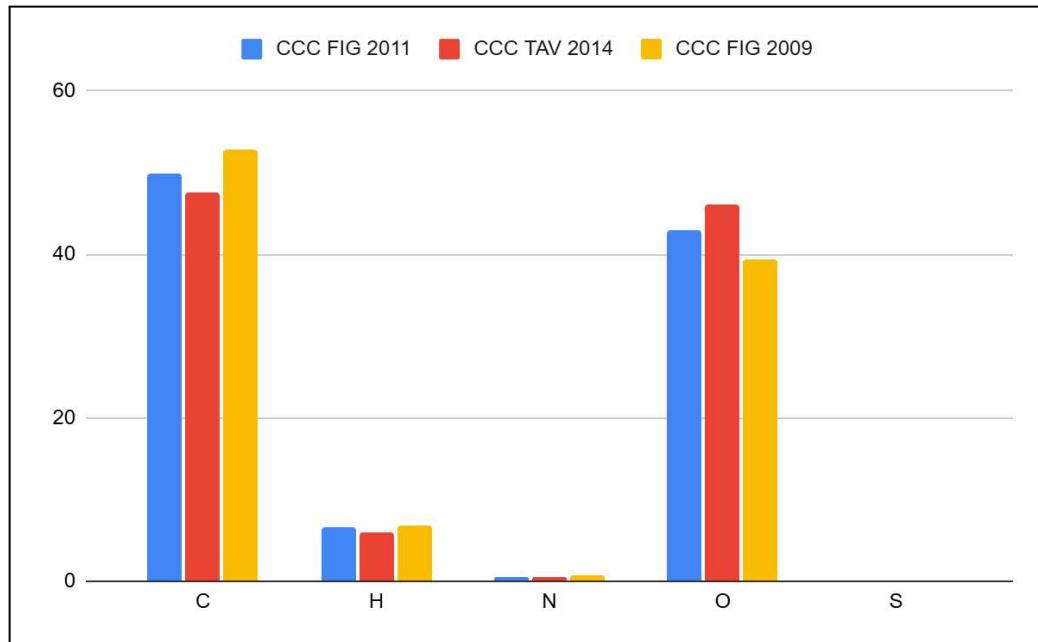
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Caracterização e volume de ar

A partir das informações de análise elementar e análise imediata das amostras de biomassa, foi possível realizar todas as relações e equações descritas no capítulo de revisão bibliográfica, atendendo e reafirmando os conceitos termodinâmicos para geração de energia a vapor. Por se tratar de uma biomassa de baixa granulometria, é necessário que haja a prática de técnicas de beneficiamento para melhor otimização da queima do combustível.

No Gráfico 1 estão descritos os teores de carbono, hidrogênio, nitrogênio, oxigênio e enxofre, para as três amostras de biomassa analisadas.

Gráfico 1 - Composição percentual de componentes oriundo da análise elementar das amostras de biomassa de cada autor.



Fonte: elaborado pelo autor.

Pela natureza da biomassa e método de plantio tem parcela desprezível de enxofre e outros materiais (para a combustão, os teores dos químicos citados são os mais influentes). Apesar de se tratar de um resíduo fruto da mesma espécie, é demonstrado como o solo, forma de beneficiamento, momento de extração do resíduo e localidade podem mudar as características químicas do resíduo que será utilizado como combustível. Logo, para maior segurança e garantia na produção de energia durante o tempo é interessante que a matriz energética seja feita no mesmo local ou nas mesmas condições.

Com as informações das Tabelas 2 e 3, aplicou-se as equações 2, 3 e 4 para obtenção do valor calculado de volume de ar de admissão requerido e também de um valor inicial para excesso de ar, descrito na Tabela 4. Com o intuito de que a combustão ocorra completamente, mesmo que em condições reais não aconteça totalmente.

Tabela 4 - Volume de ar teórico, volume de ar real e excesso de ar - m³/kg.

| | Amostra 3 | Amostra 2 | Amostra 1 |
|----------------|------------------|------------------|------------------|
| Varº (teórico) | 4,76 | 4,28 | 5,21 |
| Excesso de ar | 2,08% | 2,24% | 1,91% |
| Var (real) | 4,86 | 4,37 | 5,31 |

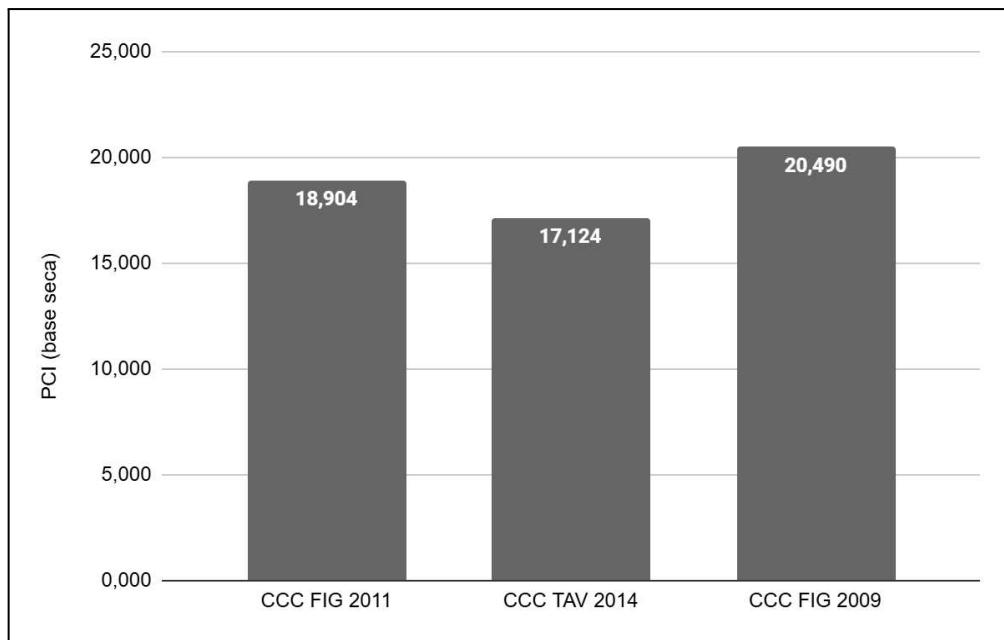
Fonte: elaborado pelo autor.

5.2 Poder calorífico

Para análise do poder calorífico, foi feito o cálculo para determinar o PCI^t usando a equação 14 de Mendeliev, a partir dos dados de análise imediata e elementar das amostras de biomassa 1, 2 e 3. Com os resultados explanados no Gráfico 2, foi possível compará-los a fim de entender qual será a amostra mais eficiente na combustão na caldeira e qual será o mais rentável para a produção de energia.

O resultado obtido utilizando a amostra de biomassa de Tavares (2014) foi o mais simples se comparado aos demais, explicado pelo baixo teor de carbono e alto teor de oxigênio oriundo da natureza da biomassa. Também, sem muitos processos de pré-tratamento, obteve o menor poder calorífico entre os demais autores, já que em análise imediata foi identificado alto teor de cinzas e baixa umidade do combustível. Resultando em alta concentração de cinzas nos produtos da combustão. Por sua vez, Figueiredo (2011), com uma biomassa já beneficiada do processo de torrefação da indústria da cajucultura, triturada e padronizada em baixa granulometria, obteve melhores resultados de poder calorífico se comparado às demais amostras, sendo superior em aproximadamente 2 MJ/kg no PCI, como indicado no Gráfico 2.

Gráfico 2 - Poder calorífico inferior na base seca, medidas em MJ/kg.



Fonte: elaborado pelo autor.

5.3 Dimensionamento de uma planta de potência a vapor

Para o dimensionamento da planta de potência a vapor foi considerada uma operação de massa de vapor superaquecido com admissão de 3120 kg/h, obtido pela consideração do valor da razão combustível e vapor, admitido no capítulo anterior, para uma disponibilidade de resíduo de aproximadamente 645,79 kg/h. Para o município de Bela Cruz, a necessidade de energia elétrica foi aproximada baseado no valor de consumo anual de 23,239 GWh, sendo que no ano tem 365 dias e em cada dia tem 24 horas. Assim, resultando numa potência média de 2,652 MW considerando que haja uma demanda reprimida de 1,5% e carga parasitária oriundo dos equipamentos da planta a vapor de 1%.

Para atender esta carga, foi feita a determinação dos equipamentos a serem adicionados à planta a vapor com a metodologia de dimensionamento da planta térmica de Rendeiro (2008) e, posteriormente, calculado o valor ideal para admissão da biomassa de casca de castanha de caju para o servir de combustível para o sistema, utilizando da metodologia de avaliação de caldeiras proposto por Cortez e Lora (2008).

5.3.1 Determinação dos equipamentos geradores

Inicialmente, foi escolhido o gerador 251AI27 do tipo alternador síncrono tripolar de potência da linha AG-10 da fabricante WEG para a geração de energia elétrica a partir da transformação de energia mecânica em elétrica. Com operação em baixa pressão e de rotação de 3600 RPM, com geração de energia em 4 polos até 690V e potência nominal de até 2.455 kVA, este gerador é ideal para a geração de energia atrelada à distribuição de baixa tensão da rede elétrica. Na Figura 7 está uma imagem ilustrativa do gerador e a perspectiva de sua dimensão, na Tabela 5 é possível verificar os dados operacionais do equipamento.

Figura 7 – Foto ilustrativa do gerador de linha AG10 WEG.



Fonte: Catálogo de alternadores síncronos linha AG10 - WEG (2024).

Tabela 5 – Dados operacionais do gerador de potência AG10 da WEG.

| | |
|-------------------------------|----------------------------|
| Potência máxima nominal | 260 kVA até 2.455 kVA |
| Tensão de operação | 690 V |
| Polaridade de entrega | 4 polos |
| Rotação do eixo (configurada) | 3600 RPM |
| Construção | Ferro fundido e inoxidável |

Fonte: Catálogo de alternadores síncronos linha G i-plus - WEG (2024).

Para mover o gerador foi utilizada uma turbina do tipo contrapressão da marca WEG da linha TS que tem admissão de ar com 400°C e 20 bar de pressão, com fuselagem compatível e adequada para rotação de 3600 RPM, para se adequar a baixa pressão de entrada e potência relativamente pequena, em detrimento da necessidade energética do gerador. Sem a necessidade de um redutor para interconexão entre os equipamentos. Outro fator importante

para a escolha do material foi a utilização da mesma marca que o gerador, já que, com distribuição brasileira, a WEG assegura a garantia e qualidade dos equipamentos. Na Figura 8 é possível ter uma noção de aplicação da turbina, seguido com os dados operacionais descritos na Tabela 6.

Figura 8 – Foto ilustrativa da turbina de contrapressão WEG Linha TS/TG



Fonte: Catálogo de turbinas a vapor - linha TS/TG (2024).

Tabela 6 – Dados operacionais da turbina de contrapressão - linha TS/TG

| | |
|-------------------------------|-------------------|
| Temperatura de admissão de ar | 400° C |
| Pressão de admissão de ar | 20 bar |
| Pressão de saída de ar | 15 bar |
| Rotação do eixo (configurada) | 3600 RPM |
| Capacidade máxima de vapor | 3 ton/h - 20ton/h |

Fonte: Catálogo de turbinas a vapor - linha TS/TG (2024).

Para fornecer vapor à turbina foi planejada uma caldeira flamotubular que é adequada para resíduos industriais e agrícolas. A caldeira é da marca BIOMAX da empresa FIMACO, de modelo HLM-200 COMPACT e tem características operacionais adequadas para uma vazão de 3 toneladas por hora de vapor superaquecido, com pressão de 20 bar e na temperatura de 400°C. Com possibilidade de admissão de biomassa com até 60% de umidade e granulometria de 1 mm até 60 mm, sendo interessante para resíduos de grãos finos e também para biomassa com tratamentos de beneficiamento como a peletização e briquetagem, explorado por uma das biomassas apresentadas.

A partir do catálogo do fabricante, pode-se encontrar as informações operacionais indicadas na Tabela 7 e uma imagem esquemática da caldeira na Figura 9.

Figura 9 – Foto ilustrativa da caldeira HLM-200 COMPACT da marca BIOMAX.



Fonte: Soluções em caldeiras Caldeira Flamotubular HLM - FIMACO (2019).

Tabela 7 – Dados operacionais da caldeira HLM-200 COMPACT.

| | |
|----------------------------------|-------------------|
| Temperatura de exaustão de vapor | 400° C |
| Pressão de trabalho | Até 21 bar |
| Umidade aceita para biomassa | < 60% |
| Admissão de biomassa | Até 2 ton/h |
| Produção de vapor | 3 ton/h - 6 ton/h |

Fonte: Soluções em caldeiras Caldeira Flamotubular HLM - FIMACO (2019).

Para o cálculo do volume do tanque de condensado foi feita a multiplicação da vazão mássica de vapor da caldeira de 3 ton/h pela razão de 3/2 ou 1,5. Com isso, o volume foi estimado para que o tanque de condensado opere até 4,5 ton/h. Sendo o maior PCI^t das biomassas em 20,490 MJ/kg, convertendo esse valor para quilocalorias por hora tem-se que o PCI^t é de aproximadamente 4.897,23 kcal/kg. Portanto, adotando a metodologia de Rendeiro (2008), é feito o cálculo da capacidade de remoção do calor do condensador pela multiplicação do PCI da biomassa em kcal/kg pela capacidade do tanque em kg/h. Assim, tendo um valor de 22.037.535,0 kcal/h.

Como na saída da turbina há água no estado de líquido saturado na saída em baixa pressão e temperatura, não há necessidade de um condensador na configuração na planta

térmica. Dada a escolha da turbina de contrapressão, que além de torque tem outras saídas de gases disponíveis para uso.

Portanto, tem-se uma disposição preliminar para a planta de potência a vapor com os seguintes equipamentos:

Caldeira flamotubular:

- Produção nominal de 3.500 kg/h de vapor - admitido para operação da turbina escolhida;
- Temperatura de vapor de saída de 400°C com melhor eficiência da turbina selecionada;
- Pressão de saída de 20 bar buscando o melhor controle e vida útil do sistema e tubulações.

Turbina de contrapressão:

- Pressão de vapor para admissão de 20 bar a 40 bar;
- Pressão de vapor para exaustão de 15 bar e baixa temperatura;
- Temperatura de admissão de entre 350°C e 450°C;
- Frequência de rotação de eixo de 3600 RPM.

Gerador de potência

- Potência nominal de 2.455 kVA;
- Tensão de operação 690V;
- Frequência de rotação de eixo de 3600 RPM;
- Rendimento máximo de 97%.

Devido à turbina e o gerador terem frequência de rotação do eixo iguais, não há necessidade de adicionar um redutor ao sistema. Pela baixa potência, os equipamentos podem operar em conjunto sem haver choques ou perdas pelas interconexões.

5.3.2 Avaliação da caldeira

Segundo Cortez e Lora (2008), a avaliação de caldeiras pela metodologia de cálculo com perdas de calor em caldeiras explanado no capítulo 3 e tópico 3.6, pode ser determinada pela eficiência em método inverso com a sequência de cálculo:

1. Recálculo da composição elementar do combustível, atendendo aos valores reais de umidade e de teor de cinzas utilizado nos testes.

2. Cálculo de poder calorífico PCI^t e do calor disponível Q_d, a partir das equações 14 e 37.
3. Cálculo da entalpia dos gases de exaustão ou escape, explanados no tópico anterior.
4. Determinação da entalpia do ar frio, explicitado na equação 31.
5. Determinação das perdas com os gases de escape Q₁, a partir da equação 39.
6. Determinação do volume de gases secos V_{gs}, a partir da equação 25.
7. Determinação das perdas por combustão química incompleta Q₂, a partir da equação 41.
8. Determinação das perdas por combustão mecânica incompleta, a partir da equação 42.
9. Assumir um valor de vazão de combustível m_c inicial.
10. Determinação das perdas ao meio ambiente Q₄, a partir da equação 43.
11. Determinação das perdas por escória Q₅, a partir da equação 44.
12. Cálculo da eficiência pelo balanço inverso, a partir da equação 45.
13. Cálculo do calor útil Q_{útil} a partir da equação 38.
14. Determinação do valor calculado para vazão de combustível pelo método inverso, calculado pela equação 46.
15. Determinação do erro entre o valor assumido e o valor calculado.
16. Repetição do processo para atingir um erro aceitável, nesse projeto estipulado em até 10%.

Utilizando da metodologia de Cortez e Lora (2008), a partir da eficiência de método inverso descrito no capítulo 1 sobre avaliação de caldeiras, foi possível estimar a necessidade mássica de biomassa. Considerando o calor útil para uma vazão mássica de vapor superaquecido de 3,5 toneladas por hora a temperatura de 400°C e 20 bar, com a diferença de entalpias apresentado na equação 38 há a necessidade de 2,748 MW de potência de vapor.

Conhecendo a necessidade de potência elétrica média de 2,718 MW, e com as eficiências de cada equipamento da planta de potência, a partir dos dados dos fornecedores com eficiência de 92% para a transformação da turbina, 97% para o gerador e aproximadamente 62% para a caldeira (calculada). Também com as informações de condição de vapor superaquecido necessárias para se obter a potência esperada da turbina e gerador, pode-se utilizar a avaliação de caldeiras para determinar inversamente qual a necessidade

mássica de biomassa para a caldeira a partir da equação 46, como explicam Cortez e Lora (2008) na metodologia explicada anteriormente.

E, posteriormente, foi realizada a determinação dos valores de calor líquido do combustível e do aquecimento do ar de admissão, a partir das equações 35 e 36. Com resultados de 22,4 kJ/kg para o aquecimento do combustível, 7,06 kJ/kg para aquecimento do ar de admissão e 700,40 kJ/kg para o calor disponível no vapor à temperatura ambiente. Pela semelhança da espécie e com as mesmas condições operacionais de vapor e arrefecimento, a diferença do valor de calor disponível (Q_d) esteve diretamente relacionado ao poder calorífico inferior (PCI) das biomassas, descritos os valores na Tabela 8.

Tabela 8 - Poder calorífico inferior na base trabalho e calor disponível para as amostras de biomassa - calculados.

| Parâmetro | Amostra 3 | Amostra 2 | Amostra 1 |
|--------------------------|------------------|------------------|------------------|
| PCI ^l (kJ/kg) | 18903,59 | 17123,91 | 20490,19 |
| Q disp (kJ/kg) | 19633,45 | 17853,77 | 21220,05 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Em seguida, foi feita a determinação dos volumes e entalpias dos gases de exaustão, a partir das equações apresentadas no capítulo anterior, com os resultados descritos na Tabela 9.

Tabela 9 - Volumes e entalpias dos gases de exaustão - com excesso de ar.

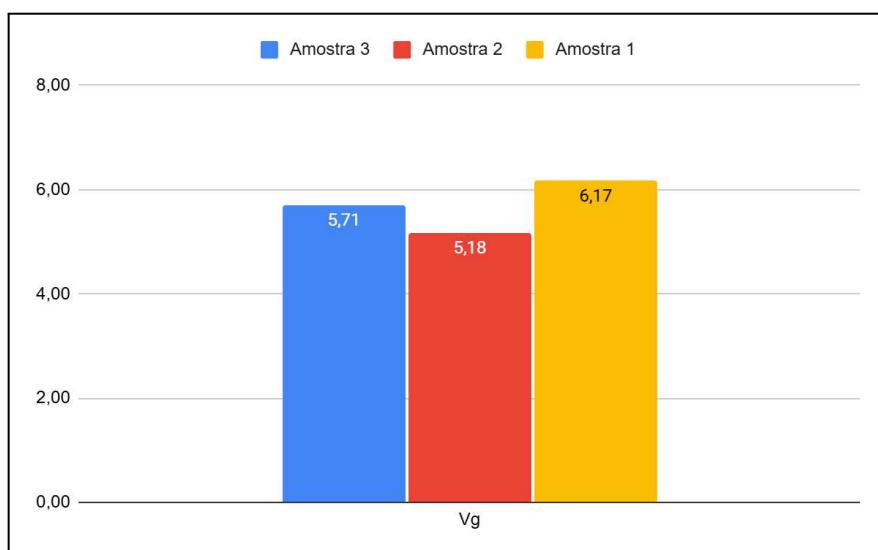
| Parâmetro | Amostra 3 | Amostra 2 | Amostra 1 |
|---|------------------|------------------|------------------|
| O ₂ _{ge} % | 8,70 | 8,70 % | 8,70 % |
| V RO ₂ (m ³ /kg) | 0,93 | 0,89 | 0,99 |
| V N ₂ (m ³ /kg) | 3,77 | 3,38 | 4,12 |
| V H ₂ O (m ³ /kg) | 0,91 | 0,81 | 0,96 |
| Vg ^o (m ³ /kg) | 5,61 | 5,08 | 6,07 |
| Vgs (m ³ /kg) | 4,80 | 4,36 | 5,21 |
| Vh ₂ O (m ³ /kg) | 0,91 | 0,81 | 0,96 |
| Vg (m ³ /kg) | 5,71 | 5,18 | 6,17 |
| μ (g/m ³) | 54,81 | 382,61 | 42,94 |
| hg ^o (kJ/kg) | 1590,90 | 1455,35 | 1717,80 |
| ha ^o (kJ/kg) | 1268,56 | 1138,60 | 1386,15 |
| lambda _{ge} | 1,71 | 1,71 | 1,71 |
| hg (kJ/kg) | 2488,18 | 2260,71 | 2698,25 |
| bunte | 0,06 | 0,01 | 0,09 |

| | | | |
|-------------------|-------|-------|-------|
| RO ₂ % | 11,61 | 12,18 | 11,34 |
| COge % | 2,694 | 0,940 | 3,482 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

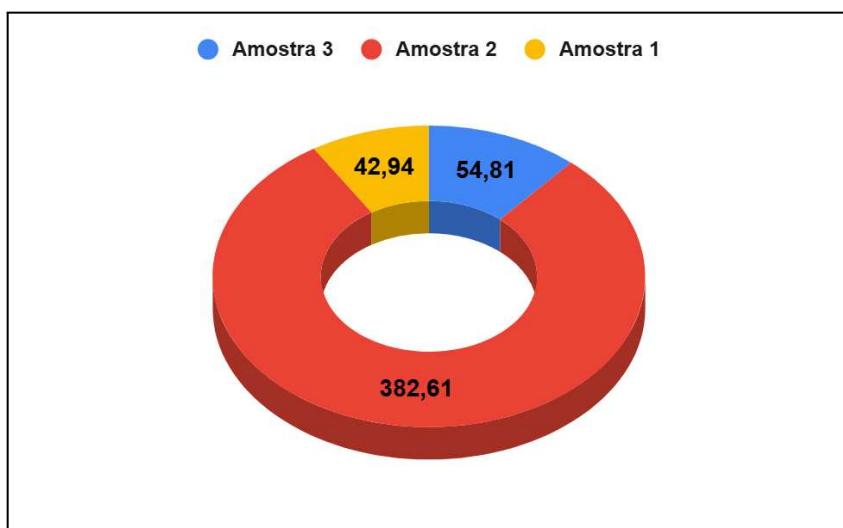
Nos Gráficos 3 e 4 é possível verificar a comparação do valor de concentração de cinzas e do teor de gás de monóxido de carbono (CO) nos gases de exaustão. Sendo comentadas ao fim da avaliação, a critério de relacionar perdas de calor no gás de escape e por escórias.

Gráfico 3 - Volume dos gases nos produtos da combustão em m³/kg.



Fonte: elaborado pelo autor.

Gráfico 4 - Concentração de cinzas nos produtos de combustão em porcentagem do valor de concentração em g/m³.



Fonte: elaborado pelo autor.

A partir das equações 39, 41, 42, 43 e 44, de determinação de perdas caloríficas e da equação 45 da eficiência pelo balanço inverso, foi possível ter uma perspectiva mais profunda sobre como a natureza da biomassa pode variar para além do poder calorífico, uma vez que as interferências operacionais da caldeira atingem diretamente no rendimento e na vida útil do equipamento. Na Tabela 10 é possível analisar os resultados e compará-los a fim de se obter o de melhor eficiência.

Tabela 10 - Dados calculados de eficiência pelo balanço inverso e perdas caloríficas para as 3 amostras de biomassa distintas.

| Parâmetro | Amostra 3 | Amostra 2 | Amostra 1 |
|----------------|-----------|-----------|-----------|
| n (indireta) % | 72,36 | 66,82 | 69,91 |
| q1 % | 11,86 | 11,77 | 11,96 |
| q2 % | 9,87 | 3,43 | 12,75 |
| q3 % | 4,63 | 16,69 | 4,09 |
| q4 % | 1,29 | 1,29 | 1,29 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Adere-se inicialmente para cálculo uma vazão mássica de 1 tonelada por hora de biomassa para cada amostra. Por fim, foi utilizada a equação 46 para encontrar a quantidade de biomassa necessária para se atingir a potência de vapor demandada, com as condições reais de operação para cada amostra de autor. Variando entre 667 kg/h e 829 kg/h, os valores obtidos estão descritos na Tabela 11.

Tabela 11 - Resultados de calor útil e vazão mássica de combustível calculada.

| Parâmetro | Amostra 3 | Amostra 2 | Amostra 1 |
|----------------|-----------|-----------|-----------|
| n (indireta) % | 72,36 | 66,82 | 69,91 |
| Q útil (kW) | 2748,08 | 2748,08 | 2748,08 |
| Massa (kg/s) | 0,193 | 0,230 | 0,185 |
| Massa (ton/h) | 0,696 | 0,829 | 0,667 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Por se tratar de fontes de diferentes localidades e plantio, também com processos de beneficiamento distintos, têm diferentes composições de análise elementar e imediata, logo, é possível analisar e indicar qual o de maior eficiência, e propor escolhas a serem adotadas para melhoria das demais fontes, com base nos valores de perdas caloríficas.

Analizando as Tabelas 8, 9, 10 e 11, é possível observar que, sendo a mais eficiente, a Amostra 3 referente à Figueiredo (2011) apresentou calor disponível de 19,455

MJ/kg e 71,9% de eficiência para o processo de combustão, com ênfase na baixa perda de calor pelos gases de escape relacionado a relação de ar combustível obtida pelos teores químicos da natureza da biomassa. Apesar de uma grande percentagem de perda calorífica por combustão incompleta (q_2) de aproximadamente 10% do calor disponível, explicado pela alta quantidade de CO existente nos gases de escape com presença estimada em 2,69%.

Apesar de ter menor emissão de monóxido de carbono (CO) nos gases de exaustão, a biomassa de casca da castanha de caju (CCC) de Tavares (2014) teve a menor eficiência de todos, atrelado diretamente a alta perda calorífica por combustão mecânica incompleta (q_3), refletida pelo alto valor de emissão de cinzas oriundo da sua caracterização, sendo atrelado à sua natureza, visualizado no Gráfico 4. Sendo assim, a solução mais limpa mas menos eficiente, sendo necessária a adição de equipamentos de remoção de cinzas ou de etapas no processo de operação da caldeira, tornando assim mais custoso a longo prazo. Soluções para diminuição de impacto da escória e redução ou captura de monóxido de carbono, podem ser adotadas para se aproveitar dessa biomassa que tem a menor necessidade mássica.

Como explica os ensaios obtidos por Vidal (2024), o beneficiamento de pré-tratamento do combustível é essencial para seu melhoramento e boa performance na combustão, buscando a menor emissão de gases CO₂ e cinzas. Neste caso, aplicou-se a briquetagem como uma solução viável para a compactação e aumento da densidade energética do CCC que tem a característica de ter uma baixa granulometria. Aprimorando o processo e vida útil dos equipamentos usados para realização da combustão. Gadelha (2015) atribuiu os processos de extração do LCC, como a Trituração e moagem, viáveis, já que diminuem o valor de umidade e, por consequência, melhora o desempenho da biomassa da CCC como combustível energético. E, com dados experimentais, comprova que apesar de possuir menor poder calorífico, a casca da castanha sem o LCC proporciona potenciais mais interessantes para a utilização, devido a influência na baixa emissão de gases na saída da combustão e menor teor de umidade.

Portanto, é possível afirmar que Figueiredo (2009) obteve os melhores resultados dentre as CCC, com valor de calor disponível de 21,22 MJ/kg compensando a eficiência mediana com um alto poder calorífico, necessitando de uma vazão mássica de 667 kg/h para obtenção da massa de vapor requerida. Apesar de seu estudo estar direcionado para a gaseificação e pirólise do resíduo, também aplica-se a combustão da amostra de biomassa para obtenção de energia.

6 CONCLUSÃO

Para a necessidade de potencial elétrico estabelecido para a região de Bela Cruz, a planta a vapor dimensionada utilizando a biomassa abordada por Figueiredo (2009), é eficaz e supre grande parte da necessidade energética do município, com cerca de 58% do valor de energia em média. Pela potência de 2,3 MW da planta, se enquadra em norma como geração distribuída, conforme a Lei Federal n. 14.300/2022, regulamentada pela Resolução normativa n. 1.059/2023 da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). O fornecimento da biomassa foi obtido a partir da estimativa aproximada da quantidade anual produzida. Logo, a sazonalidade e rotatividade da produção do resíduo pela cultura do fruto é de caráter importante para a garantia da geração de energia de forma sustentável. O uso do resíduo como combustível pode incentivar o aumento de investimentos no setor cajueiro no estado e na região, bem como, aplicar nas indústrias geradoras do resíduo centrais de cogeração para suprimento energético das fábricas. Principalmente se tratando de uso de energia verde, renovável e de baixa emissão de gases estufa.

Sobre a avaliação de caldeira, é correto afirmar que a eficiência por método inverso é aplicável para se determinar a vazão mínima de combustível a ser explorada, se adequando a necessidade energética e podendo ter planos de plantio/produção cíclica para sustentabilidade e viabilidade da geração de energia pela combustão da biomassa. Acerca do dimensionamento da planta de potência a vapor, a metodologia de Rendeiro (2008) foi suficiente e efetiva, demonstrando uma situação real, indicando onde há perdas caloríficas no processo considerando a avaliação e retornando indicadores para tomada de decisão.

A aplicação de CCC como combustível energético é justificada pelo alto poder calorífico de aproximadamente 20,5 MJ/kg e baixa umidade do resíduo, já que deriva de processos de beneficiamento da cultura do caju como secagem e Trituração. Além disso, é abundante e historicamente presente no cotidiano nordestino, mais especificamente no Ceará, com abordagens econômicas e culturais para cidades interioranas e litorâneas, onde a energia por vias renováveis ainda é escassa e pouco acessível, com o resíduo pouco aproveitado. Fortalecendo o mercado com a produção de energia, tende a favorecer empregos diretos e indiretos para a população onde a planta será implantada, uma vez que aumenta a demanda do resíduo e também de mão de obra especializada.

Para possíveis trabalhos futuros sobre o assunto, pode-se citar a abordagem de outras fontes de resíduos agrícolas da região Nordeste como a casca do coco verde, casca de arroz, casca de café e bagaço da cana. Além disso, a exploração do óleo da castanha ou LCC

para obtenção de energia via combustão e o melhoramento dos processos de beneficiamento da biomassa agrícola como briquetagem e outras opções de adensamento.

Por fim, é possível afirmar que os objetivos deste trabalho foram atingidos com a aplicação e dimensionamento de uma planta de potência a vapor utilizando como combustível a biomassa da casca da castanha de caju, aplicando-se 3 amostras distintas com características elementares e de beneficiamento alternativas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRÃO FILHO, A. et al. Caracterização Granulométrica de Minérios de Apatita da Região de Catalão -GO.** In: 63º Reunião Anual da SBPC, 63., 2011, Goiânia. Disponível em: <https://www.sbpcnet.org.br/livro/63ra/arquivos/jovem/28caracgran.pdf>. Acesso em: 5 jan. 2025.
- ALENCAR, Nataniele dos Santos et al. Produção da Castanha de Caju nas microrregiões do Ceará no período de 1993 a 2016.** Revista Eletrônica Competências Digitais para Agricultura Familiar, Tupã, São Paulo, Brasil, v. 4, n. 1, p. 103–116, 2018. Disponível em: <https://owl.tupa.unesp.br/recodaf/index.php/recodaf/article/view/72>. Acesso em: 1 dez. 2024.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS -ABNT. NBR 8112 - Carvão vegetal: análise imediata.** Rio de Janeiro, 1986.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11096: Caldeiras estacionárias aquotubulares e flamotubulares a vapor - Terminologia.** Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6923: Carvão vegetal - Amostragem e preparação da amostra.** Rio de Janeiro, 2015.
- BIEDERMANN, F. Ash-Related Problems during Biomass Combustion and Possibilities for a Sustainable Ash Utilization.** Austrian Bioenergy Centre GmbH, Bios Bioenergiesysteme GmbH. 2005. Disponível em: <http://www.bios-bioenergy.at/uploads/media/Paper-Biedermann-AshRelated-2005-10-11.pdf>. Acesso em: 5 jan. 2025.
- BIOMAX Indústria de máquinas LTDA. “O que é Briquetagem?”.** Disponível em: <https://www.biomaxind.com.br/briquetagem>. Acesso em: 13 dez. 2024
- BIZZO, W. A. Geração, utilização e distribuição de vapor.** UNICAMP. Campinas, p. 163. 2003. Disponível em: <https://www.studocu.com/pt-br/document/instituto-federal-de-educacao-ciencia-e-tecnologia-de-santa-catarina/maquinas-termicas/bizzo-geracao-distribuicao-e-utilizacao-de-vapor/7022395>. Acesso em: 26 jan. 2025.
- BORGHI, Michel da Mata. Efeito da Granulometria na Avaliação dos Briquetes.** 2012. 47 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenheiro Industrial Madeireiro, Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2012. Disponível em: https://florestaemadeira.ufes.br/sites/florestaemadeira.ufes.br/files/field/anexo/tcc_michel_da_mata_borghi.pdf. Acesso em: 14 dez. 2024.
- BRIDGWATER, A. V.; PEACOCKE, G. V. C. Fast pyrolysis processes for biomass.** Renewable & Sustainable Energy Reviews, 4(1), p. 1-73, 2004. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ef034067u>. Acesso em: 14 dez. 2024.

BRIDGWATER, T. **Biomass for energy**. Journal of the Science of Food and Agriculture, 86: 1755-1768. 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/jsfa.2605>. Acesso em: 14 dez. 2024.

CARVALHO, P. E. R. **Flora do Brasil**. Rio de Janeiro: Editora XYZ, 2003.

ÇENGEL, Yunus A.; BOLES, Michael A. **Termodinâmica. 5 ed.** São Paulo, SP: McGraw-Hill, 2006. 740 p

CHENG, Y. *et al.* **Ammonia fiber expansion (AFEX) pretreatment of lignocellulosic biomass**: A review of the process and its applications. Biomass and Bioenergy, v. 117, p. 158-174, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.06.016>. Acesso em: 14 dez. 2024.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Análise Mensal Setembro 2024: Castanha de caju**. 2024. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/analises-do-mercado-agropecuario-e-extrativista/analises-do-mercado/historico-mensal-de-castanha-de-caju>. Acesso em: 11 dez. 2024.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S. **Biomassa: para energia**. Campinas: Ed. UNICAMP, 2009. 734 p. Disponível em: <https://editoraunicamp.com.br/catalogo/?id=1848>. Acesso em: 5 jan. 2025.

DEMIRBAS, A. **Calculation of higher heating values of biomass fuels**. Fuel Vol. 76, No. 5, pp. 431-434, 1997. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(97\)85520-2](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(97)85520-2). Acesso em: 8 jan. 2025.

DUTRA, Maria Vitória de Moraes. **Centro Nacional de Referência Cultural: o desconhecido acervo consagrado**. Dissertação (Mestrado em Preservação do Patrimônio Cultural) - Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional. Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: [http://portal.iphan.gov.br/uploads/ckfinder/arquivos/Dissertacao_Maria_Vitoria-Versao_Final%20\(1\).pdf](http://portal.iphan.gov.br/uploads/ckfinder/arquivos/Dissertacao_Maria_Vitoria-Versao_Final%20(1).pdf). Acesso em: 17 nov. 2024.

EICHLER, P. *et al.* **Produção do biometanol via gaseificação de biomassa lignocelulósica**. Quim. Nova, Vol. 38, No. 6, 828-835, 2015. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/xjXZS9LJSCPn6Z9P5q3NP8P/#>. Acesso em: 6 jan. 2025.

EPE. **Balanço energético nacional 2024**: ano base 2023: relatório síntese. Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2024>. Acesso em: 11 dez. 2024.

EUROPEAN COMMISSION, **Energy for the Future: Renewable Energy Sources – White Paper for a Community Strategy and Action Plan**. Communication from the Commission, COM (97) 599. EC, Brussels (1997). Disponível em: https://europa.eu/documents/comm/white_papers/pdf/com97_599_en.pdf. Acesso em: 13 dez. 2024.

FERREIRA, S. O. P. M. *et al.* **Caracterização energética de biomassas agrícolas e florestais no estado de Pernambuco**. Ciência Florestal, Santa Maria, v. 34, n. 3, e73324, p.

1-23, jul./set. 2024 . Disponível em: <https://doi.org/10.5902/1980509873324>. Acesso em: 8 jan. 2025.

FIGUEIRÉDO JUNIOR, H. S. Desafios para a cajucultura no Brasil: o comportamento da oferta e da demanda da castanha de caju. Revista Econômica Do Nordeste, 37(4), 550–571. Disponível em: <https://doi.org/10.61673/ren.2006.670>. Acesso em: 17 nov. 2024.

FIGUEIREDO, Flavio Augusto Bueno. Pirólise e gaseificação de casca de castanha de caju: avaliação da produção de gás, líquidos e sólidos. 2009. 96 p. Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, SP. Disponível em: <https://hdl.handle.net/20.500.12733/1609275>. Acesso em: 7 dez. 2024.

FIGUEIREDO, Renata Andrade. Caracterização dos produtos da pirólise da casca de castanha de caju: influência da taxa de aquecimento e da temperatura. 2011. 107 p. Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, SP. Disponível em: <https://hdl.handle.net/20.500.12733/1615074>. Acesso em: 7 dez. 2024.

GADELHA, Antonia M. Torres et al. Análise comparativa da casca da castanha de caju com e sem LCC para produção sustentável de combustível sólido. In: CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA, 2015, Fortaleza. Anais [...]. Fortaleza, 2015. Acesso em: 7 dez. 2024.

GANESAN, Sowndharya; VEDAGIRI, Praveena. Production of sustainable biomass briquettes from de-oiled cashewnut Shell. Materials Today: Proceedings. Volume 68, Part 6, 2022. P.2484- 2492. ISSN 2214-7853. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.09.179>. Acesso em: 14 dez. 2024.

GOLDEMBERG, José. Energias Renováveis na América Latina. Revista Energia da América Latina e do Caribe. Ano 1, Outubro 2009. Disponível em: <https://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/hm000106.pdf>. Acesso em: 12 dez. 2024.

HERMANN, Célio. Energia no Brasil: para quê? para quem? Crise e alternativas para um país sustentável. São Paulo: Editora Livraria da Física. FASE, 2001. Disponível em: https://www.google.com.br/books/edition/Energia_no_Brasil_Para_que_Para_quem/7GrHSLGj5ToC?hl=pt-BR&gbpv=1&dq=energia+no+brasil&printsec=frontcover. Acesso em: 17 nov. 2024.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). Censo demográfico de 2023. Brasil, 2024. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/ce.html>. Acesso em: 4 jan. 2025.

IBITOYE, S. E. et al.. An overview of biomass solid fuels: Biomass sources, processing methods, and morphological and microstructural properties. Journal of Bioresources and Bioproducts, v. 8, ed. 4, p. 333-360, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobab.2023.09.005>. Acesso em: 17 nov. 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Standby Power Standards – Policies. Paris: IEA, 2014. Disponível em: <https://www.iea.org>. Acesso em: 7 fev. 2025.

IPECE, Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. **Sistema de Informações Geossocioeconômicas do Ceará**. 2024. Disponível em: <http://ipecedata.ipece.ce.gov.br/ipece-data-web/>. Acesso em: 11 fev. 2025.

JÚNIOR, C. L. et al.. **Potencial de Aproveitamento Energético de Fontes de Biomassa no Nordeste do Brasil** (Potential Energy Use of Biomass Sources in Northeast Brazil). Revista Brasileira De Geografia Física, 7(2), páginas 207 a 221. Disponível em: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v7.2.p207-221>. Acesso em: 1 dez. 2024.

KOPPEJAN, J., VAN LOO, S. **The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing** (1st ed.). Routledge, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.4324/9781849773041>. Acesso em: 4 jan. 2025.

LEITE, L. A. S. **A agroindústria do caju no Brasil: políticas públicas e transformações econômicas**. Fortaleza: EMBRAPA, 1994. Acesso em: 1 dez. 2024. Disponível em: <https://www.abphe.org.br/uploads/Banco%20de%20Teses/a-agroindustria-do-caju-no-brasil-politicas-publicas-e-transformacoes-economicas.pdf>. Acesso em: 1 dez. 2024

LINDE, J. et al. **Pretreatment technologies for lignocellulosic biomass and their potential for biofuel production**: A review. Bioresource Technology, v. 245, p. 1167-1178, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.08.007>. Acesso em: 14 dez. 2024.

MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N. **Fundamentals of engineering thermodynamics**. 7th ed. Chichester: Wiley, 2006.

MUZEL, S. D. et al. **Wood calorific power from Eucalyptus grandis and Hevea brasiliensis species**. Revista Brasileira de Engenharia de Biossistemas, v. 8, n. 2, p. 166-176, 2014. Disponível em: <https://seer.tupa.unesp.br/index.php/BIOENG/article/view/191/0>. Acesso em: 4 jan. 2025.

NOGUEIRA, M. F. M.; RENDEIRO, G; BARRETO, E. J. F. (Coord). **Combustão e Gaseificação da Biomassa Sólida: Soluções Energéticas para a Amazônia**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008. p. 52-63. Disponível em: <https://inct-ereea.ufpa.br/LivroBiomassaFinal.pdf>. Acesso em: 18 dez. 2024.

PIEDRAHITA, C. A. F. **A Agenda Energética Da OLADE** - 2023. Revista Energia da América Latina e do Caribe. Ano 1, Outubro 2009. Disponível em: <https://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/hm000106.pdf>. Acesso em: 12 dez. 2024.

PROTÁSIO, T. P. et al. **Relação entre o poder calorífico superior e os componentes elementares e minerais da biomassa vegetal**. Pesquisa Florestal Brasileira, Colombo, v. 31, n. 66, p. 113-122, abr. 2011. Disponível em: <https://pfb.cnpf.embrapa.br/pfb/index.php/pfb/article/view/200>. Acesso em: 4 jan. 2025.

ROSADO, D. M. **Otimização do excesso de ar e razão ar-combustível na combustão de gás natural para fornos industriais**. II Workshop de Otimização do Instituto de Biociências de Botucatu IBB/UNESPA, v.2. Botucatu, São Paulo, 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/339850218_Otimizacao_do_excesso_de_ar_e razao_ar-combustivel_na_combustao_de_gas_natural_para_fornos_industriais. Acesso em: 9 jan. 2025.

SALEME, J. E. F. **Estudo básico para briquetagem do carvão vegetal.** Ouro Preto, Escola de Minas e Metalurgia, s.d. 19p.

SANTOS, Luis Ricardo Oliveira *et al.*, **Utilização da casca da castanha de caju como biocombustível.** Anais II CONIDIS. Campina Grande: Realize Editora, 2017. Disponível em: <https://editorarealize.com.br/artigo/visualizar/33928>. Acesso em: 1 dez. 2024.

SEYE, Omar. **Análise de ciclo de vida aplicada ao processo produtivo de cerâmica estrutural tendo como insumo energético capim elefante (*Pennisetum Purpureum Schaum*).** 2003. 148p. Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, SP. Disponível em: <https://hdl.handle.net/20.500.12733/1604396>. Acesso em: 11 dez. 2024.

SILVA, A. L. P.. **Estudo comparativo do poder calorífico dos briquetes de biomassa: Bagaço de cana, mesocarpo de coco e sabugo de milho, com adição de aglutinantes residuais.** TCC - Curso Superior de Tecnologia em Produção Sucroalcooleira do Centro de Tecnologia e Desenvolvimento Regional da Universidade Federal da Paraíba. Repositório UFPB, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/123456789/27185/1/ALPS22062023.pdf>. Acesso em: 8 jan. 2025.

SILVA, S. I. S. **Biomassa para geração de energia: eucalipto, cana-energia e bagaço de cana-de-açúcar.** TCC - Curso Superior de Tecnologia em Produção Sucroalcooleira do Centro de Tecnologia e Desenvolvimento Regional da Universidade Federal da Paraíba. Repositório UFPB, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/123456789/15918/1/SISS27092019.pdf>. Acesso em: 8 jan. 2025.

SPEIGHT, James G. **Handbook of coal analysis.** 2. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2015. Disponível em: <https://download.e-bookshelf.de/download/0000/5846/86/L-G-0000584686-0002361484.pdf>. Acesso em: 5 jan. 2025.

TAHEREZADEH, M. J.; KARIMI, K. **Enzyme-based hydrolysis of lignocellulosic materials for bioethanol production.** Biofuels, Bioproducts and Biorefining, v. 1, n. 4, p. 285-292, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/bbb.63>. Acesso em: 14 dez. 2024.

TAVARES, Beatriz G. *et al.* **Estudo do potencial da casca de castanha de caju para obtenção de hidrogênio.** In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE BIOENERGIA, 5., 10-13 de agosto, 2010, Curitiba, PR. Anais... Disponível em: <http://repositorio.ipen.br/handle/123456789/17855>. Acesso em: 7 dez. 2024.

UDDIN, M. N. *et al.*, **Sustainable Biomass as an Alternative Energy Source: Bangladesh Perspective,** Energy Procedia, Volume 160, 2019, p. 648-654, ISSN 1876-6102. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.02.217>. Acesso em: 17 nov. 2024.

VAMVUKA, D. **Biomass, bioenergy and the environment.** Thessaloniki: Tziolas Publications, 2009. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/er.1804>. Acesso em: 5 jan. 2025.

VIDAL, Mariana de Souza *et al.* **POTENCIAL ENERGÉTICO DE BRIQUETES PRODUZIDOS DA CASCA DA CASTANHA DE CAJU E DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR.** In: Anais do Congresso Brasileiro Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia. Anais...Diamantina(MG) Online, 2024. Disponível em: <https://www.even3.com.br/anais/cobicet2024/893737-POTENCIAL-ENERGETICO-DE-BRIQUETES-PRODUZIDOS-DA-CASCA-DA-CASTANHA-DE-CAJU-E-DO-BAGACO-DA-CANA-DE-ACUCAR>. Acesso em: 17 nov. 2024.

ZAMBOLIM, L.; SILVA, J. R.; SANTOS, A. P. **Manejo e controle de doenças no cultivo do caju. Fitopatologia Brasileira**, v. 42, n. 5, p. 463-472, 2017.

ZHANG, Y. *et al.* **Effects of different pretreatments on the enzymatic saccharification of corn stover.** Bioresource Technology, v. 198, p. 373-380, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.09.065>. Acesso em: 14 dez. 2024.

ZHAO, X. *et al.* **A comprehensive review on pre-treatment of lignocellulosic biomass.** Bioresource Technology, v. 199, p. 92-103, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.10.087>. Acesso em: 14 dez. 2024.