



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS**

**GABRIELLA VIEIRA DE CARVALHO**

**ANÁLISE DO POTENCIAL ENERGÉTICO DOS RESÍDUOS DA CASCA DO COCO  
VERDE GERADOS NO MUNICÍPIO DE PARAIPABA/ CE-PROPOSTA DE UMA  
PLANTA TÉRMICA**

**FORTALEZA**

**2023**

**GABRIELLA VIEIRA DE CARVALHO**

**ANÁLISE DO POTENCIAL ENERGÉTICO DOS RESÍDUOS DA CASCA DO COCO  
VERDE GERADOS NO MUNICÍPIO DE PARAIPABA/ CE PROPOSTA DE UMA  
PLANTA TÉRMICA**

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 Engenheira de Energias Renováveis.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Mônica  
Castelo Guimarães Albuquerque.

FORTALEZA

2023

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)

---

C323a Carvalho, Gabriella Vieira de.

Análise do potencial energético dos resíduos da casca do coco verde gerados no município de Paraipaba/ CE proposta de uma planta térmica / Gabriella Vieira de Carvalho. – 2023.

80 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia de Energias Renováveis, Fortaleza, 2023.

Orientação: Profa. Dra. Mônica Castelo Guimarães Albuquerque.

1. Biomassa. 2. Casca do coco-verde. 3. Energias renováveis. 4. Planta térmica. I. Título.

CDD 621.042

---

**GABRIELLA VIEIRA DE CARVALHO**

**ANÁLISE DO POTENCIAL ENERGÉTICO DOS RESÍDUOS DA CASCA DO COCO  
VERDE GERADOS NO MUNICÍPIO DE PARAIPABA/ CE PROPOSTA DE UMA  
PLANTA TÉRMICA**

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 Engenheira de Energias Renováveis.

Aprovada em: 17/07/ 2023

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Mônica Castelo Guimarães Albuquerque (Orientadora)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup> Ana Fabíola Leite Almeida  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Ma. Jamille Rabêlo de Oliveira  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus, o autor e o principal responsável  
por me fazer chegar até aqui.

## **AGRADECIMENTOS**

À minha mãe, Susana, por toda dedicação e amor durante toda minha vida, por ter acreditado em mim e nos meus sonhos, deixando de viver os seus para que os meus e os da minha irmã fossem possíveis. Obrigada mãe você é o nosso maior exemplo de força e de superação.

Ao meu esposo, João, por ter me compreendido e apoiado, não me deixando desistir. Transmitindo conhecimento e me fazendo buscar novas experiências. Suas orações foram meu alicerce para vencer mais uma vez.

A minha irmã, Carol, por ter sido minha companheira de vida e na faculdade. Os sorvetes não teriam o mesmo sabor se você não estivesse comigo.

A Universidade Federal do Ceará que demonstrou estar comprometida com a qualidade e excelência do ensino.

Aos meus professores: Dr<sup>a</sup>. Mônica Castelo Guimarães Albuquerque e Dr. Francisco Nivaldo de Aguiar Freire por todas as orientações e conhecimentos que a mim foram transmitidos.

Ao meu Apollo, por ter colorido meus dias cinzas e me transmitido um amor puro, desde que você chegou nossas vidas passaram a ser um arco-íris e muito mais alegres.

Não fui eu que ordenei a você? Seja forte e corajoso! Não se apavore nem desanime, pois o Senhor, o seu Deus, estará com você por onde você andar. ( Josué 1:9)

## Resumo

Atualmente, percebe-se uma forte pressão da sociedade pela substituição de combustíveis fósseis por outras fontes energéticas com potencial poluidor menor. Diante disso, a utilização de fontes renováveis de energia tem obtido especial crescimento. A aplicação de biomassa vegetal, em especial, pode ser estratégica, tanto do ponto de vista de geração de energia, como do ponto de vista ambiental, haja vista que muitos resíduos possuem alto potencial de aproveitamento em face de seus poderes caloríficos e a utilização de biomassa vegetal promove a captura do gás carbônico gerado nos processos de combustão. Diante disso, o presente trabalho realizou um levantamento técnico acerca da utilização da biomassa da casca do coco verde no município de Paraipaba/CE. Verificou-se que o resíduo trabalhado possui alto potencial para aproveitamento, sobretudo na região do perímetro irrigado Curu-Paraipaba, com Poder Calorífico Inferior calculado em 11,63 MJ/kg. A partir disso, realizou-se um dimensionamento preliminar de uma planta térmica para geração de vapor a partir do resíduo selecionado, chegando-se a necessidade de uma planta de 1 MW para o aproveitamento da disponibilidade de resíduo levantado. Por fim, realizou-se um processo de avaliação da caldeira adotada no dimensionamento, objetivando-se a determinação da eficiência global do processo de geração de vapor, que resultou em aproximadamente 57%.

**Palavras-chave:** Biomassa; Casca do Coco-Verde; Energias Renováveis; Planta Térmica.

## **Abstract**

Currently, there is strong pressure from society to replace fossil fuels with other energy sources with less polluting potential. In view of this, the use of renewable energy sources has achieved special growth. The application of plant biomass, in particular, can be strategic, both from the point of view of energy generation and from the environmental point of view, given that many residues have a high potential for use due to their calorific powers and the use of Plant biomass promotes the capture of carbon dioxide generated in combustion processes. In view of this, the present work carried out a technical survey about the use of green coconut shell biomass in the municipality of Paraipaba/CE. It was found that the treated residue has a high potential for use, especially in the region of the Curu-Paraipaba irrigated perimeter, with a Lower Calorific Power calculated at 11.63 MJ/kg. From this, a preliminary sizing of a thermal plant was carried out to generate steam from the selected residue, arriving at the need for a 1 MW plant to take advantage of the available residue raised. Finally, an evaluation process was carried out for the boiler used in the sizing, aiming to determine the overall efficiency of the steam generation process, which resulted in approximately 57%.

**Keywords:** Biomass; Coco-Verde Husk; Renewable energy; Thermal Plant.

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Cinzas
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
atm	atmosfera
BNB	Banco do Nordeste do Brasil
bu	Base úmida
bs	Base seca
C	Carbono
$C_{p,ar}$	Calor específico do ar
DNOCS	Departamento Nacional de Obras Contra a Seca
$\Sigma$	Somatório
EDX	Energia Dispersiva de Raios-X
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
F	Carbono Fixo
GEE	Gases de Efeito Estufa
ha	Hectare
H	Hidrogênio
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
kg	Quilograma
kJ/kg	quilojoules por quilograma
m <sup>3</sup>	Metro Cúbico
m	massa
$m_{ar}$	Fluxo de ar de combustão
$m_{H_2O}$	Massa de água
$\eta$	Eficiência
n°	Número
N	Nitrogênio
NBR	Norma técnica brasileira
O	Oxigênio

ODS	Objetivos para o Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCS	Poder Calorífico Superior
$Q_{entra}$	Calor de entrada
$Q_{sai}$	Calor de saída
$Q_{útil}$	Calor útil
$Q_{disponível}$	Calor disponível
$Q_1$	Calor perdido nos gases de escape
$Q_2$	Calor perdido devido à combustão química incompleta
$Q_3$	Calor perdido devido à combustão mecânica incompleta
$Q_4$	Calor perdido devido ao arrefecimento externo da caldeira
$Q_5$	Calor perdido com a escória
$Q_c^*$	Calor do combustível
$Q_{ar}^*$	Calor do ar
$Q_{perdas}$	Calor das perdas
RSU	Resíduos sólidos urbanos
R\$	Abreviatura do real
S	Enxofre
SEB	Setor Elétrico Brasileiro
SIN	Sistema Interligado Nacional
$T_{ar}$	Temperatura do ar
$T_{ref}$	Temperatura de referência
$T_{cinzas}$	Teor de cinzas
$T_{cf}$	Teor de carbono fixo
$T_v$	Teor de voláteis

V	Voláteis
V	Volume
W	Umidade
$W_{bu}$	Teor de umidade em base úmida
$W_{bs}$	Teor de umidade em base seca
$\rho$	Densidade

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produção nacional do coco verde com detalhamento por região.	28
Tabela 2 - Rendimento nacional do coco verde com detalhamento por região.	28
Tabela 3 - Produção de coco verde da Região Nordeste.	29
Tabela 4 - Rendimento do coco verde da Região Nordeste.	29
Tabela 5 - Análise elementar obtida por Marcelino (2017).	58
Tabela 6 - Composição elementar obtida por B Cortez (2009).	58
Tabela 7 - Análise elementar obtida por Souza et. al. (2019).	59
Tabela 8 - Síntese dos dados de análise elementar obtidos a partir de revisão bibliográfica e cálculo da composição elementar média.	59
Tabela 9 - Análise imediata obtida por Marcelino (2017).	60
Tabela 10 - Análise imediata obtida por B. Cortez et. al. (2009).	60
Tabela 11 - Análise imediata obtida por Figueiredo (2011).	60
Tabela 12 - Dados de análise imediata obtidos a partir de revisão bibliográfica e média dos valores encontrados.	60
Tabela 13 - Dados necessários para cálculo do PCS.	62
Tabela 14 - Composição elementar da biomassa em base seca.	62
Tabela 15 - Dados técnicos da turbina utilizada no projeto.	66
Tabela 16 - Entalpia dos gases de exaustão.	69

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Coqueiro gigante.	23
Figura 2 - Variedade coqueiro anão verde.	24
Figura 3 - Variedade coqueiro-híbrido.	25
Figura 4 - Corte longitudinal do coco e suas partes.	26
Figura 5 - Perímetro irrigado Curu-Paraipaba.	31
Figura 6 - Arranjo espacial do perímetro irrigado e subdivisão de acordo com as atividades desempenhadas.	32
Figura 7 - Matriz energética brasileira em 2021.	35
Figura 8 - Matriz elétrica brasileira em 2021.	36
Figura 9 - Caldeira aquatubular.	37
Figura 10 - Caldeira flamotubular.	37
Figura 11 - Turbina de contrapressão.	36
Figura 12 - Turbina de condensação.	36
Figura 13 - Ciclo Rankine para geração de energia térmica (vapor).	40
Figura 14 - Diagrama TxS do ciclo Rankine.	41
Figura 15 - Exemplificação de ciclo Brayton aberto.	42
Figura 16 - (1) Diagrama P x V e (2) Diagrama T x S característicos do ciclo Brayton aberto.	42
Figura 17 - Esquemático do ciclo combinado para geração de vapor.	43
Figura 18 - Caldeira HLM Compact do fabricante Fimaco.	66
Figura 19 - Turbina de contrapressão utilizada no projeto.	67

## **LISTA DE GRÁFICOS**

Gráfico 1 - Produção de coco dos 5 principais países produtores no ano de 2021. 27

Gráfico 2 - Ranking dos maiores produtores municipais de coco do Brasil em 2020  
(mil frutos). 30

## Sumário

1.	INTRODUÇÃO	19
2.	OBJETIVOS	22
2.1.	Objetivo Geral	22
2.2.	Objetivos Específicos	22
3.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
3.1.	Origem do coqueiro	23
3.2.	Componentes do coqueiro	25
3.3.	Produção de coco verde no Brasil	27
3.3.1.	<i>Perímetro irrigado Curu-Paraipaba</i>	30
3.4.	Geração de energia térmica através de biomassa	33
3.4.1.	<i>Biomassa</i>	33
3.4.2.	<i>Panorama da biomassa no Brasil</i>	34
3.4.3.	<i>Componentes de uma planta de geração a vapor</i>	36
3.4.4.	<i>Tecnologias para conversão da biomassa</i>	38
3.4.5.	<i>Ciclos energéticos</i>	40
3.4.6.	<i>Gaseificação</i>	44
3.4.7.	<i>Pirólise</i>	44
3.4.8.	<i>Transesterificação</i>	45
3.4.9.	<i>Digestão anaeróbia</i>	45
3.4.10.	<i>Fermentação</i>	45
3.5.	Caracterização da biomassa	45
3.5.1.	<i>Granulometria</i>	46
3.5.2.	<i>Determinação do teor de umidade</i>	46
3.5.3.	<i>Massa específica</i>	47
3.5.4.	<i>Análise elementar</i>	47
3.5.5.	<i>Análise imediata</i>	47
3.5.6.	<i>Poder Calorífico</i>	49
3.6.	Tratamento da biomassa para aproveitamento em plantas térmicas	50
3.7.	Avaliação de Caldeiras	51
3.7.1.	<i>Método direto</i>	51
3.7.2.	<i>Método indireto</i>	52
4.	MATERIAL E MÉTODOS	56

4.1.	Análise elementar da casca do coco verde	57
4.2.	Análise imediata da casca do coco verde	59
4.3.	Determinação do quantitativo de resíduo a ser utilizado	61
4.4.	Cálculo do Poder Calorífico Superior (PCS)	61
4.5.	Cálculo do Poder Calorífico Inferior (PCI)	62
4.6.	Dimensionamento da planta térmica	62
5.	RESULTADOS	64
5.1.	Dimensionamento preliminar da planta térmica	64
5.2.	Avaliação da caldeira	68
6.	CONCLUSÃO	71
7.	REFERÊNCIAS	

## 1. INTRODUÇÃO

Desde a antiguidade, as condições climáticas provocam efeitos na vida da humanidade. Os processos de industrialização e de urbanização que aconteceram no século XVIII e XIX causaram consequências na saúde da população derivadas da situação ambiental encontrada na época. Esse período foi marcado pela busca de práticas sanitárias que tinham como objetivo a redução e a eliminação das doenças promovidas pelo ambiente.

Ao longo dos anos para atender as necessidades humanas criou-se uma equação desbalanceada: retirar, consumir e descartar (PINTO *et al.*, 2022). A última etapa dessa equação é uma das principais questões da era contemporânea. A enorme quantidade de lixo gerado no planeta tem sido um problema tanto em cidades com grande número de habitantes, como também nas pequenas cidades. A busca por soluções para o gerenciamento de resíduos sólidos é o desafio de entidades públicas e privadas, sendo na maioria das vezes responsáveis pela destinação final ambientalmente adequada dos produtos.

Segundo a Lei Federal nº 12.305, de agosto de 2010, resíduo sólido é: resíduos de materiais, substâncias, artigos ou bens provenientes da atividade humana. Esses materiais devem ter destino correto, nos mais diferentes estados da matéria. Deve-se evitar o descarte em redes públicas de esgoto ou corpos d'água, ou que necessite de soluções técnica ou economicamente inviáveis pela melhor tecnologia disponível (BRASIL, 2010).

Ainda de acordo com a Lei Federal nº 12.305, de agosto de 2010, a atividade de gerenciamento de resíduos sólidos é a totalidade das medidas implementadas direta ou indiretamente nas fases de coleta, transporte, transbordo, tratamento e disposição final ambientalmente correta de resíduos sólidos (BRASIL, 2010).

Diante disso, o processo de reúso de resíduos sólidos se mostra como um forte aliado para o gerenciamento destes materiais, pois pode promover a conservação dos recursos naturais, a redução da poluição ambiental bem como uma possível geração de oportunidades de empregos diretos e indiretos. Neste íterim, ressalta-se que essa atividade pode contribuir diretamente para que sejam atingidos alguns Objetivos para o Desenvolvimento Sustentável (ODSs), conforme Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU), quais sejam: (i) trabalho decente e crescimento econômico; (ii) cidades e comunidades sustentáveis; (iii) ação contra a mudança global do clima; e

(iv) energia limpa e sustentável (NAÇÕES UNIDAS BRASIL, 2023).

A cultura do coco verde vem se evidenciando em vários países, devido aos aspectos econômicos, nutricionais e energéticos que o fruto apresenta. Nos últimos anos, o crescimento acelerado da cocoicultura (cultura do coco) no Brasil tem sido destaque na agropecuária, devido principalmente ao aumento no mercado da água-de-coco (BACKES *et al.*, 2015). De acordo como Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) no ano de 2021 em todo território nacional foram colhidos 1.638.573 mil frutos presente em uma área colhida de 186.392 hectares, onde grande parte dessa produção é oriunda do litoral nordestino, sendo o Estado do Ceará o maior produtor deste fruto tropical (IBGE, 2023b). O município de Paraipaba/CE posiciona-se como um dos maiores produtores cearenses, resultado, principalmente, da produtividade da região denominada Perímetro Irrigado Curu-Paraipaba, que, segundo Brasil (2023), produz cerca de 1,4 milhões de frutos mensalmente.

A partir dos resíduos derivados do coqueiro pode ser produzida uma diversidade de produtos e subprodutos, desde o beneficiamento da própria água-de-coco e da polpa do fruto, trituração da casca para a retirada da fibra e do pó, adubos orgânicos, fertilizantes, produtos artesanais e até materiais com elevado poder energético (BONAMONE, *et al.*, 2019).

De acordo com Nunes, *et al.* (2007) a produção anual de resíduos do coqueiro na região nordeste é de aproximadamente: 729 mil toneladas de casca, 595 mil toneladas de folhas e 243 mil toneladas de inflorescência (frutos originados a partir de muitos ovários de flores diferentes que quando fecundados acabam se fundindo, formando uma única estrutura), totalizando 1 milhão e 567 mil toneladas de resíduos. Mesmo que os resíduos gerados passem por processo de aproveitamento e beneficiamento, a maior parte deles não tem destino correto, sendo na maioria das vezes lançados indiscriminadamente a céu aberto, sem passar por qualquer forma de tratamento. Com essa prática uma quantidade considerável de material de alto valor para a indústria e para a agricultura vem sendo perdida.

Em 2021 a produção de coco verde em Paraipaba, cidade localizada a 90 km de Fortaleza/CE e a maior produtora de coco em escala nacional, foi de 103.439 mil frutos, o que corresponde a aproximadamente 26,79% da produção estadual e 6,31% da produção nacional (IBGE, 2023a).

Geralmente, o descarte da casca do coco verde ocorre em vazadouros a céu aberto, conhecidos como lixões, ou são processados até se tornarem adubo. A configuração de descarte através de lixões é inadequada, haja vista o favorecimento da produção de gases de efeito estufa, tais como dióxido de carbono e metano, como também a produção de chorume que é, em razão da formatação do lixão, responsável pela contaminação de solos e lençóis freáticos (EMBRAPA, 2004; FONTES, 2021).

Uma alternativa inteligente para o descarte desse tipo de resíduo é o seu tratamento e sua aplicação como fonte para geração de energia, em dispositivos geradores de vapor, por exemplo, visto que de 80% a 85% do peso bruto do coco verde é considerado lixo (ROSA, *et al.*, 2001). Assim, pode-se utilizar um resíduo que seria descartado de forma incorreta, para geração de energia limpa e renovável. A energia gerada nesse processo pode ser direcionada às indústrias responsáveis pelo tratamento de coco, o que, além de gerar economia de energia elétrica, pode gerar um maior protagonismo da unidade consumidora em sua gestão energética, dentre outros benefícios.

Diante disso, o presente trabalho irá discorrer sobre o potencial energético do aproveitamento da casca do coco verde, a partir de dados específicos do município de Paraipaba/CE. No capítulo 02 estão elencados os objetivos geral e específicos do presente trabalho. No capítulo 03 está apresentada uma fundamentação teórica, contendo informações contidas na literatura a respeito do tema, dados específicos de produção do resíduo do coco no Brasil e em Paraipaba, além de tecnologias de aproveitamento utilizadas no mercado atual. No capítulo 04 está relatada a metodologia utilizada para a realização deste estudo. No capítulo 05 estão apresentados e discutidos os resultados obtidos e no capítulo 06, as conclusões e considerações finais.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1. Objetivo Geral**

O presente trabalho visou realizar um estudo da estimativa do potencial para geração de energia a partir do aproveitamento dos resíduos da casca do coco verde, evitando-se, com isso, o descarte incorreto deste material.

### **1.2. Objetivos Específicos**

Os seguintes objetivos específicos se aplicam:

- a) Estudo teórico e levantamento de dados sobre geração de resíduos do cultivo de coco verde;
- b) Levantamento de dados do potencial energético do município de Paraipaba/CE no que tange o aproveitamento da casca do coco verde;
- c) Avaliação dos dados obtidos e proposição preliminar de projeto conceitual referente ao aproveitamento energético dos resíduos da plantação de coqueiro;
- d) Avaliação técnica da caldeira utilizada com cálculo da eficiência do processo de geração de vapor.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1. Origem do coqueiro

A hipótese mais aceita é que o coqueiro (*Cocos nucifera L.*) teve origem no Sudeste Asiático, encontrado principalmente nas ilhas entre os oceanos Índico e Pacífico. Dessa região, foi levado para a Índia e em seguida, para a África Oriental . Após a descoberta do Cabo da Boa Esperança, foi introduzido na África Ocidental e posteriormente para as Américas e toda a Região Tropical do globo (PURSEGLOVE, 1975; ANDRADE *et al.*, 2004; FONTES *et al.*, 2006; ALVES *et al.*, 2007).

A origem do coqueiro no Brasil remonta a 1553, momento no qual os portugueses introduziram o coqueiro-gigante em território brasileiro, especialmente na costa nordestina (SIQUEIRA *et al.*, 2002; SILVA, 2014; SILVA *et al.*, 2016). Já a introdução da variedade coqueiro-anão (*var. Nana*) foi feita de forma escalonada: o anão-verde (Figura 1), em 1925 , proveniente da principal ilha da Indonésia, Java, e em 1938 vindo do Norte da Malásia; o anão-amarelo, em 1938, e o anão-vermelho, em 1939, ambos provenientes do Norte da Malásia. O anão-vermelho-de-camarões foi introduzido em 1978, proveniente da Costa do Marfim (DIAS, 1980; RIBEIRO *et al.*, 1999; FONTES *et al.*, 2006).

Figura 1 -Coqueiro anão verde.



Fonte: Elaboração Própria.

O coqueiro-gigante (*var. Typica*) é mais comumente explorado pelos pequenos produtores, em razão, principalmente do seu rápido crescimento e fase vegetativa longa. Tal variedade possui vida econômica de 60 a 70 anos, sendo

possível a produção de até 60 frutos/planta/ano (WADT, 1997; SIQUEIRA *et al.*, 2002; FONTES *et al.*, 2006). O coqueiro-gigante (Figura 2) é empregado no Brasil para uso culinário e na agroindústria, para produção de coco ralado e derivados (CAVALCANTE, 2016). O coqueiro-anão, por sua vez, apresenta lento desenvolvimento vegetativo, porém possui a vantagem de uma alta produção anual de frutos, de 150 a 200 frutos/planta/ano (RIBEIRO *et al.*, 1999; ARAGÃO *et al.*, 2002a; FONTES *et al.*, 2006). Comercialmente, essa variedade é mais utilizada para a produção de água-de-coco, em virtude, sobretudo, do sabor mais agradável de sua água (FERREIRA *et al.* 2007; ALVES *et al.*, 2018).

Figura 2- Coqueiro gigante.



Fonte: Elaboração Própria.

Há ainda uma terceira variedade de coqueiro: o coqueiro híbrido (Figura 3), também conhecido como anão-gigante, resultado do cruzamento, natural ou artificial, entre as variedades gigante e anão (SIQUEIRA *et al.*, 2002; ARAGÃO *et al.*, 2002b). A Figura 3 ilustra o coqueiro híbrido. Essa variedade apresenta ampla utilidade comercial, pode ser empregada tanto para a produção de água de coco, como também para fins industriais.

Figura 3 - Coqueiro-híbrido.



Fonte: Elaboração Própria.

## 2.2. Componentes do coqueiro

A morfologia do coqueiro pode ser dividida em raiz, caule, folha, inflorescência e fruto (FERREIRA, *et al.* 1998; SOUZA *et al.*, 2003).

As raízes primárias têm como função principal a fixação do coqueiro ao solo. Entretanto, podem apresentar próximo de sua extremidade, região da coifa, uma pequena capacidade de absorção de água e nutrientes (WADT,1997; SIQUEIRA, *et al.*, 2002; BENASSI, 2013).

O caule do coqueiro é caracterizado como sendo do tipo estipe (ereto, longo e rígido), cilíndrico, não ramificado, com coloração acinzentada e apresentando regiões externas lisas e ásperas. A altura do caule pode chegar a 20 metros na variedade coqueiro-gigante e a 10 metros, coqueiro-anão (FERRI, 1973; SOUZA *et al.*, 2003; BENASSI, 2013).

A folha é considerada o laboratório fotossintético da planta. Distribuídos por toda sua superfície estão os estômatos, os quais são células epidérmicas modificadas por onde ocorre a transpiração e as trocas gasosas com o ambiente necessárias para o processo fotossintético (CHILD, 1974; PINTO *et al.*, 2009; BENASSI, 2013). A depender das condições ambientais, é possível que o coqueiro emita até 16 folhas

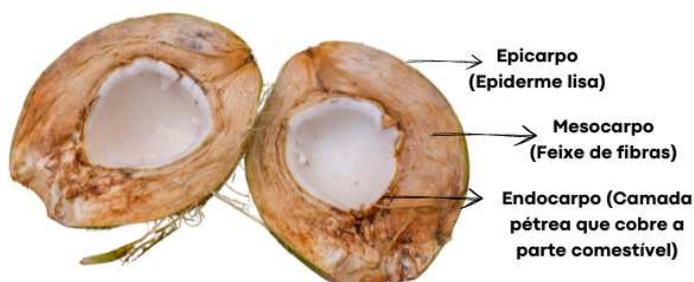
por ano, podendo apresentar uma copa com até 24 folhas abertas. A temperatura do ambiente é o fator determinante para o ritmo de formação e abertura das folhas das variedades de coqueiro.

A inflorescência é a parte da planta que abriga os sistemas responsáveis pela reprodução do vegetal. O coqueiro é uma planta monóica (possuem flores unissexuais femininas e masculinas), reunidas numa mesma inflorescência do tipo paniculada, axilar, ou seja, se forma e aparece entre a base da folha e o estipe, sendo protegida por brácteas (folhas modificadas localizadas na base do pedicelo das flores, ou inflorescências) grandes, chamadas espatas. Essas estruturas ao completarem seu desenvolvimento, abrem-se liberando a inflorescência (SOUZA *et al.*, 2003; BENASSI, 2013; PINTO *et al.*, 2009).

Por fim, o fruto do coqueiro (coco), uma drupa fibrosa (Fruto carnoso que contém uma única semente protegida por um caroço duro), formada por uma epiderme lisa ou epicarpo, que é responsável por cobrir o mesocarpo espesso e fibroso. Na parte interior tem-se uma camada muito dura (pétrea). Este fruto pode apresentar tamanho e formato variável, podendo ser arredondado ou ovóide. Sua coloração também pode variar substancialmente, a depender, sobretudo, das condições ambientais e do material genético do vegetal, podendo ser esverdeada ou amarelada, que com o decorrer do tempo torna-se amarronzada (FERREIRA, *et al.*, 1998; BENASSI *et al.*, 2007).

O mesocarpo é a fonte de fibra e pode apresentar de 3 a 5 cm de espessura. Situado entre o epicarpo e o endocarpo, é constituído por uma fração de fibras com tamanhos variáveis e uma fração denominada pó, sendo agregada às fibras (VASCONCELOS, 1945; FERRI, *et al.* 1981; ; ROSA, *et al.* 2001; BENASSI *et al.*, 2007). Na Figura 4 tem-se o corte longitudinal de um coco e suas respectivas partes.

Figura 4 - Corte longitudinal do coco e suas partes.

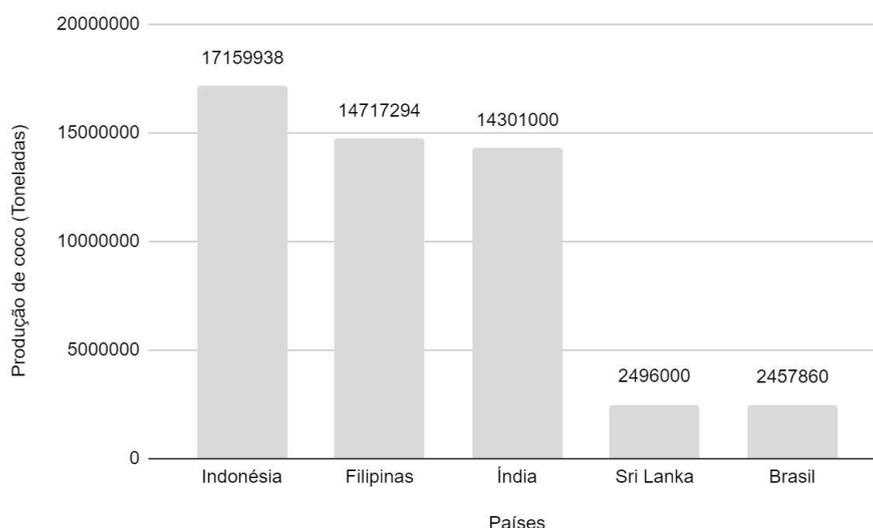


Fonte: Elaboração Própria.

### 2.3. Produção de coco verde no Brasil

Em 2021 a produção nacional de coco da baía foi de 2.457.860 toneladas. O Brasil ocupou a quinta posição de maior produtor mundial (Gráfico 1), com uma participação de apenas 3,9% do total (IBGE, 2022; FAO, 2023).

Gráfico 1 - Produção de coco dos 5 principais países produtores no ano de 2021.



Fonte: FAO (2023).

O cultivo do coqueiro é realizado em quase todo território nacional (CUENCA *et al.*, 2021). De acordo com Brainer (2021), a área dedicada a tal cultura em 2020 era de aproximadamente 187,5 mil hectares, com produção anual de 1,6 bilhão de frutos. A região Nordeste destaca-se como a maior produtora nacional, concentrando 80,9% da área colhida de coco no Brasil e 73,5% da produção de frutos.

Dentre os maiores produtores mundiais, o Brasil tem se destacado por possuir o maior rendimento (13.114 kg/ha), este fator está relacionado à tecnologia empregada na cultura, como: a condução e manejo dos coqueirais, sistemas intensivos de cultivo e variedades melhoradas do tipo anão e híbrido, que são responsáveis pelo aumento da produtividade e a expansão do cultivo para lugares onde não havia tradição (MARTINS; JESUS JÚNIOR, 2014)..

Conforme apresentado por Brainer (2021) o valor da produção nacional de coco em 2020 foi de R\$1,15 bilhão, com a participação de 62,6% do Nordeste, o que representa R\$719,44 milhões do valor da produção nacional do fruto. Já no ano

seguinte o valor da mesma produção nacional foi de aproximadamente R\$1,29 bilhão (IBGE, 2022). Vale ressaltar que, apesar da maior representatividade na produção nacional pertencer a região Nordeste, essa região recebe o menor valor nas vendas do coco do território nacional devido às questões logísticas, sendo vendido por R\$0,60/fruto. Nas áreas litorâneas dessa Região, predominam a variedade de coqueiro-gigante, principalmente destinada à produção de coco seco. Esse cultivo tem baixo rendimento e pequena remuneração ao produtor, gerando um ciclo de baixa adoção de tecnologias e de práticas de manejo cultural, que necessita de intervenção manual para ser processado. Para tanto, é importante a cooperação de cada agente envolvido com a cadeia produtiva do coco, sobretudo, possibilitando aos pequenos produtores, o financiamento para renovação ou fortalecimento de seus pomares, com o apoio da orientação técnica, na utilização de tecnologias e boas práticas culturais; e com salvaguardas ao mercado interno, para que o produtor receba o valor que remunere seus investimentos (BRAINER, 2021). Nas Tabela 01 e 02 constam indicadores de produção de coco verde por região brasileira nos anos de 2019 a 2021. A região Nordeste destaca-se com uma produção média de frutos de aproximadamente 73,6% com relação à produção nacional dos referidos anos.

Tabela 1 - Produção nacional do coco verde com detalhamento por região.

Unidade Geográfica	Área colhida (hectares)			Produção (Milhões de frutos)		
	2019	2020	2021	2019	2020	2021
Brasil	187.297	187.497	194.374	1.566	1.639	1.631
Nordeste	152.744	151.638	157.623	1.148	1.204	1.207
Sudeste	14.343	14.172	14.754	216	220	210
Norte	18.675	20.175	20.303	185	198	194
Centro-Oeste	1.302	1.284	1.459	15	15	18
Sul	233	228	235	2	2	2

Fonte: Adaptado de IBGE (2021).

Tabela 2 - Rendimento nacional do coco verde com detalhamento por região.

Unidade Geográfica	Rendimentos (frutos/ ha)			Valor da produção (Mil reais)		
	2019	2020	2021	2019	2020	2021
Brasil	8.361	8.741	8.391	936.516	1.149.029	1.016.920
Nordeste	7.516	7.940	7.658	652.324	719.435	683.685
Sudeste	15.060	15.524	14.233	162.969	190.076	172.139
Norte	9.906	9.814	9.555	103.827	217.662	140.660
Centro-Oeste	11.521	11.682	12.337	15.257	19.489	18.552
Sul	8.584	8.772	8.511	2.139	2.367	1.884

Fonte: Adaptado de IBGE (2021).

Nas Tabelas 3 e 4 têm-se os dados de produção e rendimento de coco verde da região Nordeste dos anos de 2019 a 2021. Pode-se observar pelos dados, que o Ceará foi o estado que obteve maior área colhida e conseqüentemente o maior número de produção de frutos da região, sua produção de coco verde foi equivalente a 22,31% da produção nacional e 30,32% da produção regional. Em seguida vem o estado da Bahia com 26,52% da produção nordestina, logo após o estado de Sergipe e o estado de Alagoas com 13,77% e 7,9% da produção da região Nordeste.

Tabela 3 - Produção de coco verde da Região Nordeste.

Região Nordeste	Área Colhida (hectares)			Produção (Milhões de frutos)		
	2019	2020	2021	2019	2020	2021
Ceará	38.099	39.735	40.752	303	405	371
Bahia	37.450	36.173	39.312	334	288	322
Sergipe	23.149	22.395	23.624	163	161	166
Pernambuco	8.716	8.610	8.326	145	138	141
Norte do Espírito Santo	8.561	8.458	8.600	134	135	120
Alagoas	21.368	20.867	21.215	92	99	90
Rio Grande do Norte	15.959	15.936	16.070	63	66	67
Paraíba	5.791	5.973	5.938	34	35	35
Norte de Minas Gerais	521	525	751	9	8	13
Piauí	559	573	686	7	7	9
Maranhão	1.653	1.376	1.701	7	5	7

Fonte: Adaptado de IBGE (2021).

Tabela 4 - Rendimento do coco verde da Região Nordeste.

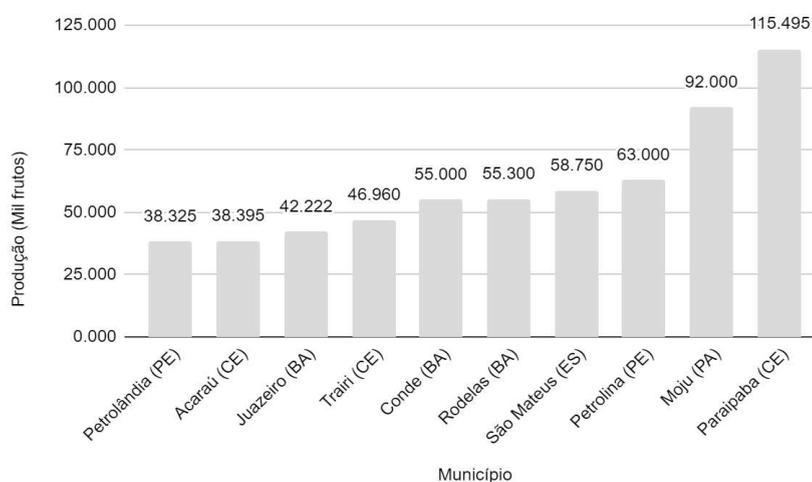
Região Nordeste	Rendimentos (frutos/ ha)			Valor da produção (Mil reais)		
	2019	2020	2021	2019	2020	2021
Ceará	7.953	10.193	9.104	157.742	203.273	176.921
Bahia	8.919	7.962	8.191	175.878	118.793	156.215
Sergipe	7.041	7.189	7.027	112.575	136.843	122.068
Pernambuco	16.636	16.028	16.935	70.283	90.107	76.126
Norte do Espírito Santo	15.652	15.961	13.953	85.260	94.018	80.008
Alagoas	4.306	4.744	4.242	65.494	86.007	72.428
Rio Grande do Norte	3.948	4.142	4.169	35.732	47.597	43.456
Paraíba	5.871	5.860	5.894	24.339	27.057	24.368
Norte de Minas Gerais	17.274	15.238	17.310	6.611	6.227	10.785
Piauí	12.522	12.216	13.120	5.958	6.203	7.647
Maranhão	4.235	3.634	4.115	4.323	3.555	4.457

Fonte: Adaptado de IBGE (2021).

No que tange à produção municipal, a cidade de Paraipaba/CE destaca-se

como a maior produtora de coco do Brasil, apresentando o maior rendimento produtivo por hectare da cultura (24.626 frutos/ha), o que, segundo Brainer (2021), ocorre principalmente em função da variedade plantada e de grande parte da produção ser proveniente do perímetro irrigado Curu-Paraipaba, que se encontra localizado às margens do Rio Curu. No Gráfico 2 está mostrado um detalhamento da produção municipal de coco no Brasil em 2020, sendo possível observar a posição de destaque do município de Paraipaba/CE.

Gráfico 2 - Ranking dos maiores produtores municipais de coco do Brasil em 2020 (mil frutos).

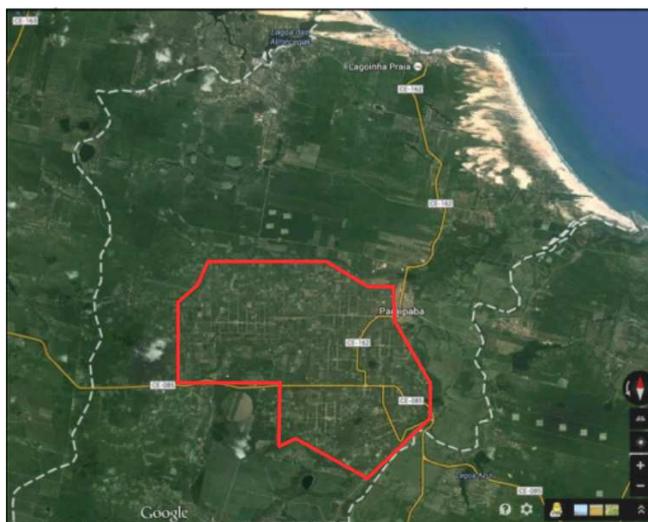


Fonte: IBGE (2021).

### 2.3.1. Perímetro irrigado Curu-Paraipaba

O perímetro irrigado Curu-Paraipaba foi um dos perímetros irrigados construídos pelo Estado no Nordeste, via DNOCS (Departamento Nacional de Obras Contra a Seca). Desde a sua inauguração, em 1975, o Curu-Paraipaba passa por períodos distintos, caracterizados sempre por uma maior ou menor intervenção do DNOCS, e pela especialização dos cultivos nele realizados, responsáveis por levar ao desenrolar de importantes dinâmicas territoriais que agem dinamizando e caracterizando o espaço ocupado pelo perímetro. O Curu-Paraipaba se localiza na porção centro-sul do município de Paraipaba, litoral oeste cearense, e à esquerda do Rio Curu, estando localizado, ainda, nas proximidades da cidade de Paraipaba (VASCONCELOS *et al.*, 2010; CAVALCANTE, 2015). Na Figura 05 está determinada a área abordada destacada em vermelho.

Figura 5 - Perímetro irrigado Curu-Paraipaba.



Fonte: Cavalcante (2015).

Ocupando uma área total irrigável de 3.357 hectares, o Curu-Paraipaba tem um arranjo espacial que lhe é bastante particular, estando dividido em duas etapas: a primeira, entregue no decorrer dos anos 1970 e 1980 e subdividida em seis comunidades (B, C1, C2, D1, D2 e E) que estão destacadas em azul (Figura 6), e a segunda, entregue entre as décadas 1980 e 1990 e subdividida em uma comunidade chamada de GH. Existe ainda uma área à parte, o Centro Gerencial do DNOCS, onde estão localizadas a sede do órgão, a associação que gere o perímetro, uma agroindústria e a área de preservação ambiental (CAVALCANTE, 2015; VASCONCELOS *et al.*, 2015).

Figura 6 - Arranjo espacial do perímetro irrigado e subdivisão de acordo com as atividades desempenhadas.



Fonte: Cavalcante (2015).

No que tange à produção de coco na região do perímetro irrigado Curu-Paraipaba, conforme Brasil (2023), cerca de 1,4 milhão de frutos são produzidos mensalmente, produção essa responsável por gerar cerca de mil empregos diretos para a população local. O destino dos frutos produzidos é o abastecimento do mercado interno nordestino, bem como exportação para outras regiões cujas produções de coco são deficitárias, tais como a região sul e sudeste, sobretudo os estados Rio de Janeiro e São Paulo.

Levando em consideração os dados apresentados na Tabela 01, dividindo-se o valor da produção (mil reais) pela quantidade de frutos produzidos (milhões de frutos), ambos os parâmetros analisados para o ano de 2021, chega-se a uma média de preço por fruto na região Nordeste de R\$ 0,60/fruto. Considerando a produção de 1,4 milhão de frutos mensalmente no perímetro irrigado Curu-Paraipaba, tem-se que o potencial de receita anual com a venda do fruto pode chegar a R\$ 10.080.000/ano, evidenciando-se a relevância socioeconômica da cocoicultura para a população local. A produção de coco é uma das principais atividades que sustenta a economia urbana de Paraipaba. O cultivo de coco na cidade também é responsável por desempenhar um elemento que caracteriza e marca de forma significativa a paisagem do município; construído por um cultivo de coco tão intenso e concentrado.

O perímetro irrigado Curu-Paraipaba é o maior e mais importante exemplo concreto da materialização do processo de reestruturação produtiva do setor do coco no Ceará (ALVES, 2013).

## **2.4. Geração de energia térmica através de biomassa**

### **2.4.1. Biomassa**

Biomassa é toda matéria orgânica de origem vegetal ou animal, com período de renovação inferior a 100 anos, usada com a finalidade de produzir energia, como carvão, lenha, bagaço de cana-de-açúcar, entre outros. A biomassa apresenta alta importância para a humanidade desde os seus primórdios: sabe-se que as primeiras utilizações da biomassa para fins energéticos correspondem ao uso da madeira para produção de fogo, utilizado no cozimento de alimentos e na proteção contra predadores (Sousa *et al.*, 2002; ANEEL, 2008b; ROUT,2013 ).

Conforme Karekesi *et al.* (2004) e Goldemberg (2009) a biomassa pode ser classificada de acordo com a tecnologia empregada no seu aproveitamento energético, como:

- a) Biomassa tradicional: resultante do aproveitamento através de métodos tradicionais de combustão direta de madeira, lenha, carvão vegetal, dentre outros resíduos.
- b) Biomassa aperfeiçoada: resultante do aproveitamento através de métodos mais aperfeiçoados de combustão direta, tais como fornos e fogões.
- c) Biomassa moderna: resultante do aproveitamento através de métodos modernos de conversão energética, comumente empregados na conversão da energia solar presente na biomassa em energia elétrica e na produção de biocombustíveis, por exemplo.

Conforme as características estruturais dos resíduos, sobretudo no que tange ao armazenamento da energia solar, as fontes de biomassa podem ser classificadas como (Werther *et al.*, 2000):

- a) Vegetais lenhosos: são capazes de produzir madeira como tecido de suporte. A madeira para aproveitamento energético pode ser obtida através de florestas nativas ou de florestas plantadas;
- b) Vegetais não lenhosos: tais vegetais são obtidos através de culturas anuais e sua classificação ocorre mediante a tipologia de armazenamento da energia solar. São divididos em sacarídeos, celulósicos, amiláceos e aquáticos. É válido ressaltar que, em comparação com os vegetais lenhosos, os não lenhosos apresentam um maior teor de umidade, fator que deve ser observado para o correto aproveitamento energético de tais fontes de biomassa; e
- c) Resíduos orgânicos: são os subprodutos obtidos através de atividades agropecuárias, industriais, urbanas etc., os quais podem ser empregados, dentre outros fins, na fabricação de combustíveis.

#### **2.4.2. Panorama da biomassa no Brasil**

Conforme apresentado em EPE (2018), o território brasileiro é beneficiado pelas suas características edafoclimáticas (características do meio ambiente), permitindo que diversas fontes de biomassa possam ser ofertadas. Diante disso, é possível concluir que o aproveitamento energético da biomassa pode ser um importante vetor na transição energética brasileira.

Ainda conforme o relatório apresentado em EPE (2018), os resíduos de biomassa mais utilizados no aproveitamento energético em território brasileiro são:

- a) Resíduos da cana-de-açúcar (bagaço, palhas e pontas, vinhaça e torta de filtro);
- b) Resíduos da indústria madeireira (cavaco);
- c) Palhas das culturas de soja e de milho;
- d) Cascas de arroz e de café;
- e) Resíduos de coco, de feijão, de amendoim, de mandioca e de cacau;
- f) Resíduos agroindustriais e pecuária de confinamento;
- g) Lodo de estação de tratamento de esgoto;
- h) Resíduos sólidos urbanos (RSU); e
- i) Resíduos das vinícolas.

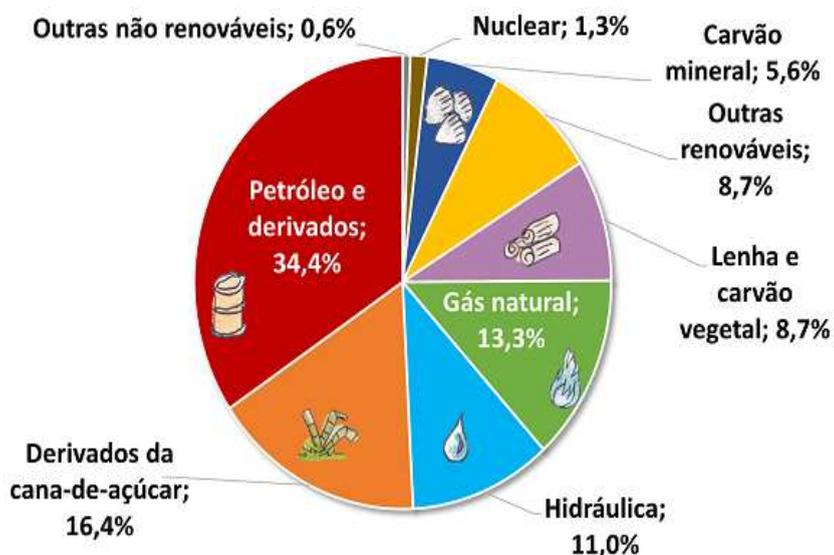
Uma necessidade levantada por EPE (2018) é a utilização de fontes energéticas que operem mediante a baixa emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE), haja vista a necessidade do atendimento de metas de emissão de dióxido de carbono, metano, dentre outros GEEs, estabelecidas em acordos internacionais. O principal atributo das fontes, nesse caso, está relacionado à eficiência de geração. Quanto mais eficientes forem as tecnologias de produção, maior será o deslocamento dos combustíveis fósseis, reduzindo assim as emissões totais de GEE (EPE, 2018).

Diante do exposto, conclui-se que o aproveitamento eletroenergético das mais variadas fontes de biomassa pode ser estratégico para o SEB (Setor Elétrico Brasileiro), haja vista que, por serem recursos controláveis, isto é, necessitam do controle direto do operador para produzir energia sempre que o recurso estiver disponível, sendo assim possível que sua utilização seja feita de forma complementar com a energia hidrelétrica ou outra fonte de energia renovável, contribuindo para o aumento da confiabilidade e segurança operativa do Sistema Interligado Nacional (SIN). Outrossim, EPE (2018) destaca que a contribuição do aproveitamento da biomassa como fonte energética é elevada no combate à emissão de GEEs, haja vista a existência de possibilidades altamente eficientes de conversão da biomassa em energia, tais como o ciclo combinado e o ciclo rankine.

Em termos de composição das matrizes energética e elétrica do Brasil,

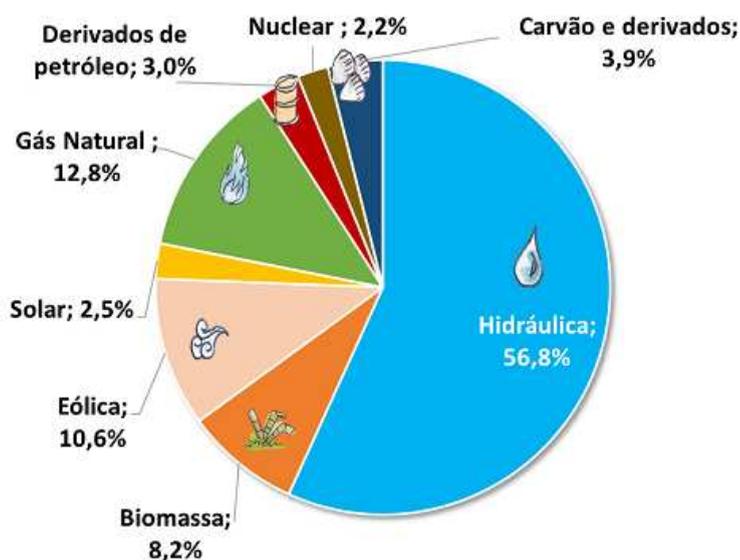
(Figuras 7 e 8), EPE (2002) destaca a representatividade de 25,1% da biomassa na matriz energética e de 8,2% na matriz elétrica, evidenciando a relevante importância da biomassa para o setor eletroenergético brasileiro.

Figura 7 - Matriz energética brasileira em 2021.



Fonte: EPE (2022).

Figura 8 - Matriz elétrica brasileira em 2021.



Fonte: EPE(2022).

#### 2.4.3. Componentes de uma planta de geração a vapor

Os principais equipamentos que compõem o sistema de geração, distribuição e consumo de vapor de uma planta térmica de geração de vapor são apresentados a

seguir:

#### **2.4.3.1. Caldeiras**

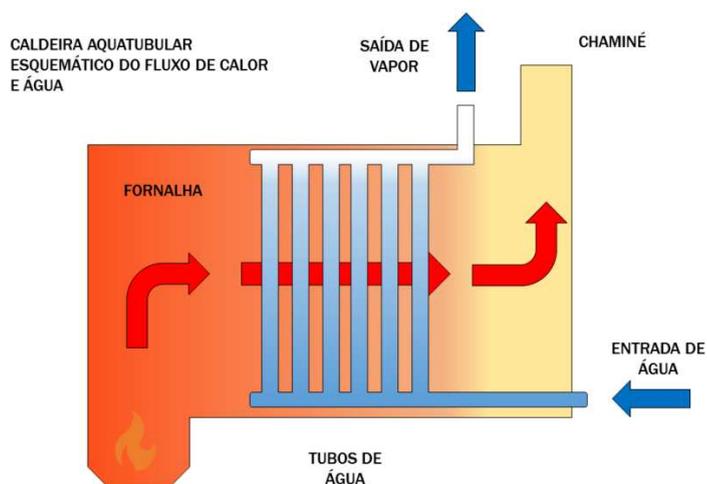
De acordo com a ABNT- NR-13 (1978), caldeiras a vapor são dispositivos com a finalidade de produzir e acumular vapor através de uma troca térmica entre o combustível e a água sob pressão superior à pressão atmosférica, por meio de qualquer fonte de energia. O vapor resultante é usado para o acionamento de máquinas térmicas, para a geração de energia mecânica e elétrica, como também para aquecimento em processos industriais.

As caldeiras podem ser classificadas de acordo com o tipo de montagem, circulação de água, conteúdo nos tubos, princípio de funcionamento, tipo de fornalha, entre outros. A classificação mais utilizada é por meio do conteúdo nos tubos, que se classificam como aquatubulares e flamotubulares (ALTAFINI, 2002).

Segundo ALTAFINI (2002), as caldeiras aquatubulares se caracterizam pela circulação externa dos gases de combustão, onde os tubos conduzem a massa de água e vapor, podendo ser chamadas de caldeira de parede d'água ou caldeira de tubos d'água . Esse tipo de caldeira é mais versátil porque possuem vasos pressurizados internos relativamente pequenos. Isso permite economicamente e tecnicamente o uso de espessuras maiores e, portanto, a capacidade de operar em pressões mais altas.

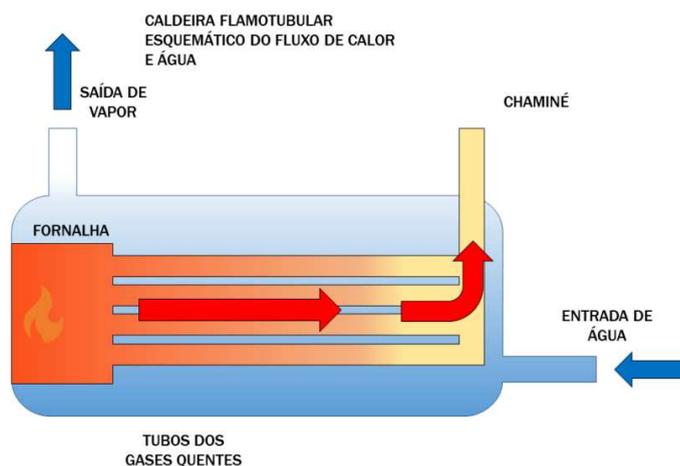
As caldeiras classificadas como caldeiras flamotubulares caracterizam-se pela circulação interna dos gases de combustão, isto é, os tubos conduzem os gases para todo o interior da caldeira. Elas são projetadas para operar sob pressão limitada pois os componentes internos relativamente grandes submetidos à pressão tornam impraticável o uso de chapas mais espessas (ALTAFINI, 2002). Na figura 9 e figura 10 tem-se um exemplo de caldeira aquatubular e flamotubular, respectivamente.

Figura 9 - Caldeira aquatubular.



Fonte: (TOGAWA,2020).

Figura 10 -Caldeira flamotubular.



Fonte: (TOGAWA,2020).

#### 2.4.3.2. Turbina

A turbina é um mecanismo que utiliza elevada energia cinética do vapor para movimentar suas paletas, esse movimento faz com que o eixo da turbina gire e gere potência no eixo. Em uma usina de vapor, gás natural ou hidrelétrica, o dispositivo responsável por acionar o gerador é a turbina. Em que a medida que o fluido flui através da turbina, as pás presas ao eixo realizam trabalho. Como resultado, o eixo gira e a turbina produz trabalho (Çengel, 2006).

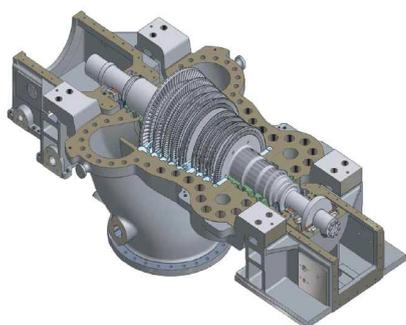
De acordo com Santos (2012), as turbinas podem ser classificadas quanto aos estágios nas palhetas de simples estágio ou multiestágio, como também pela descarga de vapor, condensação ou contrapressão. Turbinas de simples estágio são aquelas que possuem um único estágio de palhetas composto por um anel de

palhetas fixas e um anel de palhetas móveis, enquanto turbinas de múltiplos estágios possuem duas ou mais fileiras de palhetas. As palhetas fixas são encaixadas na carcaça principal ou no anel de suporte que nela está conectado. Enquanto as palhetas móveis são capazes de suportar a expansão ou impacto proveniente do vapor.

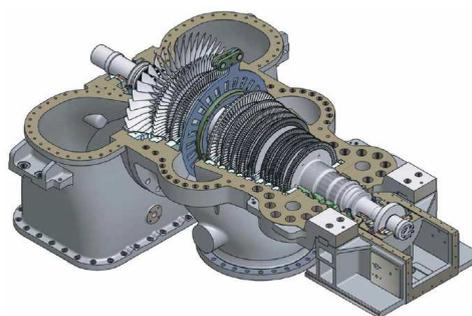
Nos ciclos a vapor com turbinas de contrapressão (Figura 11), a biomassa é queimada em caldeiras e, em seguida, o vapor produzido é direcionado para acionar turbinas de geração. Já nos ciclos com turbinas de condensação e extração (Figura 12), o vapor que sai das turbinas é direcionado a um condensador. O vapor quente a ser enviado ao processo produtivo (cogeração) é removido a um ponto intermediário da expansão, dentro da própria turbina (TOLMASQUIM, 2004).

Figura 11-Turbina de contrapressão.

Figura 12-Turbina de condensação.



Fonte: (PORTURBIVAP, 2020a)



Fonte: (PORTURBIVAP, 2020b)

#### 2.4.3.3. Bomba

Uma bomba tem como finalidade a transmissão de energia para o fluido, alterando o estado do fluido, ocasionando o aumento da pressão e/ou a velocidade para o bom funcionamento do sistema. A bomba é um dispositivo que envolve consumo de trabalho, sendo o trabalho fornecido a esse dispositivo de uma fonte externa por meio de um eixo rotativo (Çengel, 2006).

#### 2.4.3.3. Sistema de arrefecimento

Segundo Çengel (2006), um sistema de arrefecimento consiste em um projeto de geração de vapor que geralmente possui dois equipamentos principais: um condensador e uma torre de resfriamento. O condensador é um dispositivo de um ciclo de refrigeração que tem como finalidade transferir calor de um sistema para ar ou água ou uma combinação dos dois, chamado de condensador evaporativo. Já a

torre de resfriamento é um dispositivo responsável pela remoção do calor do fluido de trabalho.

#### **2.4.4. Tecnologias para conversão da biomassa**

Conforme Goldemberg (2009) as tecnologias para conversão energética da biomassa podem ser divididas em três categorias, sendo elas: processos físicos (Combustão direta), processos termoquímicos (Gaseificação, Transesterificação, e Pirólise) e processos bioquímicos (Digestão anaeróbia e Fermentação).

##### **2.4.4.1. Combustão direta**

Materiais como a madeira e variedades de resíduos orgânicos (agrícolas, industriais e urbanos) podem ser submetidos à combustão com a finalidade de gerar energia térmica. O processo de combustão consiste na transformação da energia química existente nessas fontes de biomassa em calor. Para fins energéticos, a combustão direta da biomassa é feita em caldeiras. Os combustíveis que podem ser usados no processo geralmente apresentam alta umidade e baixa densidade energética, dificultando seu armazenamento e transporte (GENOVESE *et al.*, 2006; MORAN; SHAPIRO, 2006).

De acordo com Demirbas (2004) a combustão direta é a técnica mais antiga de aproveitamento de qualquer tipo de biomassa. A eficiência do processo depende de vários fatores, tais como: o tipo de combustível, a umidade, o poder calorífico e a densidade energética do mesmo.

##### **2.4.4.1.1. Reação de combustão**

Nas reações de combustão ocorre rápida oxidação dos componentes presentes no combustível, ocasionando assim a liberação de energia conforme os produtos são formados. As reações podem ser classificadas de acordo com a reversibilidade da reação, podendo ser reversíveis ou irreversíveis. Na combustão ocorre uma reação de oxidação irreversível (MORAN; SHAPIRO, 2006).

A combustão é completa quando todo carbono existente no combustível reage completamente com o oxigênio e forma o dióxido de carbono. Por sua vez, a queima do hidrogênio gera água e caso haja enxofre no combustível, este é consumido gerando dióxido de enxofre. Todos os demais elementos presentes na composição do combustível sofrem processo oxidativo. Já na combustão incompleta ocorre a

oxidação incompleta e observa-se a formação de monóxido de carbono. (MORAN; SHAPIRO, 2006).

#### **2.4.4.1.2. Relação ar-combustível**

A relação ar-combustível é a proporção entre o ar e o combustível presentes em combustão, podendo ser obtido pela divisão da quantidade de ar pela quantidade de combustível (ÇENGEL, 2006).

O ar é essencial para todas as reações de combustão, sendo composto por 21% oxigênio, 78 % nitrogênio e 1% de outros constituintes, como o dióxido de carbono, água e argônio. A fim de simplificar a reação de combustão, todos os componentes presentes no ar que não são o oxigênio são associados ao nitrogênio, além de considerar o nitrogênio inerte por não participar da reação química. Dessa forma, a composição do ar passa a ser 21% de oxigênio e 79% de nitrogênio (MORAN; SHAPIRO, 2006).

Com isso, a razão molar de nitrogênio em relação ao oxigênio presente no ar é igual a 3,76; significando que para cada mol de oxigênio tem-se 3,76 mols de nitrogênio.

#### **2.4.4.1.3. Ar teórico**

A quantidade mínima de ar que fornece oxigênio suficiente para a combustão completa de um combustível é denominada de ar teórico, logo os produtos esperados são: dióxido de carbono, água, dióxido de enxofre e nitrogênio. Nos produtos da reação química não contém oxigênio, pois não há excesso em relação à quantidade estequiométrica.. No processo de combustão ideal, onde todo combustível é queimado com ar teórico é denominado de combustão teórica ou combustão estequiométrica (ÇENGEL, 2006).

#### **2.4.4.1.4. Ar em excesso**

Em processos reais, para garantir a combustão completa, é necessário que seja fornecido um excesso de ar para manter os níveis de oxigênio suficientes até o final da chama, a fim de superar as deficiências de mistura do queimador. O excesso de ar é o fator determinante para a eficiência da combustão, pois controla o volume, a temperatura e a entalpia dos produtos da combustão.

Um excesso de ar muito elevado é indesejável, pois pode diminuir a temperatura da chama e aumentará a perda de calor devido à entalpia ( $Q_2$ ) dos gases

de exaustão, reduzindo a eficiência térmica, além de encurtar o comprimento da chama. Por outro lado, um pequeno excesso de ar pode levar à combustão incompleta e à formação de monóxido de carbono, produzindo fuligem e fumaça, além de causar acúmulo de combustível não queimado, com risco de explosão.

O valor de excesso de ar ideal é aquele que equilibra esses dois efeitos e é baixo o suficiente para minimizar a perda de calor ( $Q_2$ ) sem combustão incompleta. Portanto, o valor ótimo depende da eficiência de combustão aceitável e do limite de poluição imposto em relação ao emissão de  $NO_x$  e dióxido de carbono (CERON,2010).

#### **2.4.4.1.5. Ar úmido**

Ar úmido é a definição da mistura de ar seco e vapor d'água, este vapor tem origem da evaporação dos oceanos e de outros corpos d'água, principalmente pela ação do calor proveniente do sol. As principais propriedades que são responsáveis por caracterizar o estado do ar úmido são: temperatura, capacidade térmica, pressão, volume específico, umidade absoluta e relativa, teor de umidade, peso molecular, constante do gás, e entalpia (ÇENGEL, 2006).

#### **2.4.5. Ciclos energéticos**

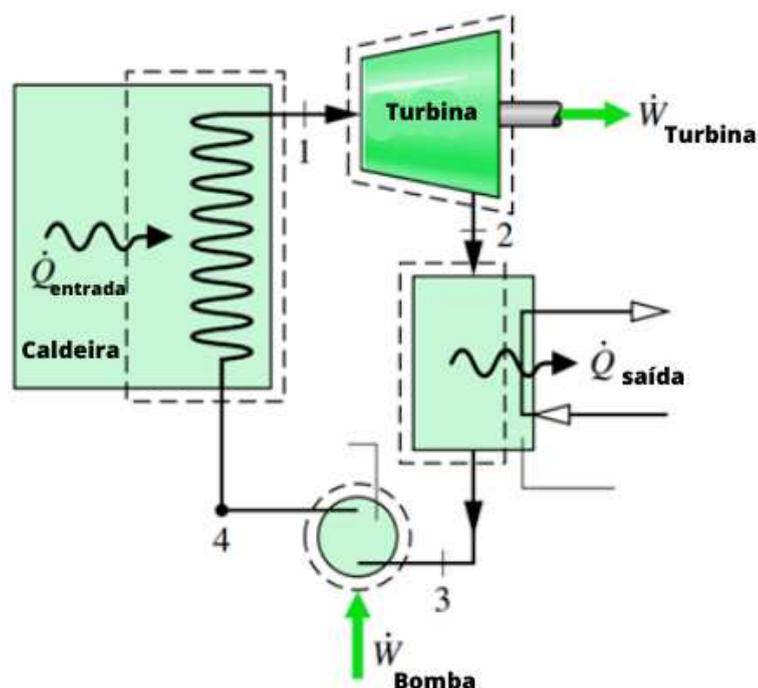
A seguir, apresentam-se os ciclos energéticos que podem ser utilizados no aproveitamento energético de biomassa, sobretudo no que tange à produção de vapor.

##### **2.4.5.1. Ciclo Rankine para geração de vapor**

O ciclo Rankine utiliza água líquida como fluido de trabalho do processo, atuando com mudança de fase. Os componentes básicos desse ciclo são caldeira, bomba, turbina à vapor e condensador. É possível que seja acoplado ao sistema um queimador, o que tende a aumentar a eficiência do processo. Conforme ilustra a Figura 13, o fluido de trabalho entra na caldeira de geração de vapor no estado líquido, no qual ocorre o processo de combustão. O calor gerado pela caldeira é transmitido ao fluido de trabalho, fazendo com que o mesmo se transforme em vapor. O vapor é então utilizado para a movimentação da turbina, havendo a conversão de energia térmica em energia cinética. A turbina, por sua vez, pode ser acoplada a um gerador elétrico, ocorrendo, por fim, a conversão de energia cinética em elétrica. Uma vantagem desse ciclo é a capacidade de uso de diversos combustíveis sólidos e

líquidos, sem a necessidade de beneficiamento em relação aos demais ciclos. O bagaço de cana-de-açúcar, as palhas, os resíduos, as cascas, os resíduos sólidos urbanos, briquetes e pellets são exemplos de biomassas em estado sólido que oferecem características favoráveis de combustão ao ciclo Rankine (MORAN; SHAPIRO, 2006; EPE, 2018).

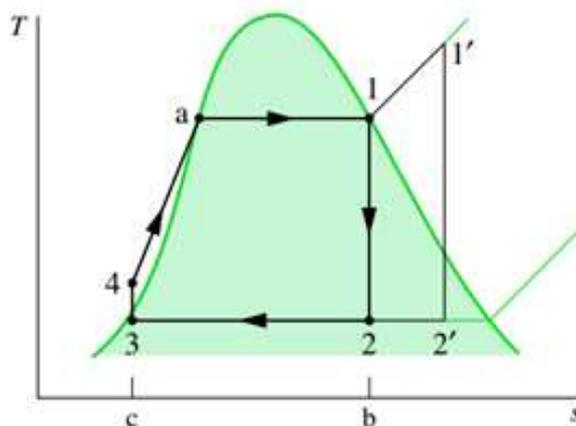
Figura 13 - Ciclo Rankine para geração de energia térmica (vapor).



Fonte: (MORAN; SHAPIRO, 2006).

Na Figura 14 tem-se o gráfico Temperatura versus Entropia, a partir do esquemático trazido pela Figura 10. No estado (1), o líquido é saturado e, ao entrar na bomba, tem sua pressão aumentada. Na caldeira, estado (2) para (3), ocorre a vaporização do fluido de trabalho, através do processo de combustão do combustível utilizado, podendo ser uma fonte de biomassa, até que o mesmo alcance a temperatura (3) de vapor superaquecido. Nesse processo, há a geração de energia térmica. Na turbina, estado (3) para (4), ocorre uma transformação isoentrópica, de modo que o vapor superaquecido tem sua pressão reduzida a partir da ação da turbina. A energia térmica do fluido de trabalho é então convertida em trabalho no eixo da turbina (MORAN; SHAPIRO, 2006; SANTOS, 2020).

Figura 14 - Diagrama TxS do ciclo Rankine



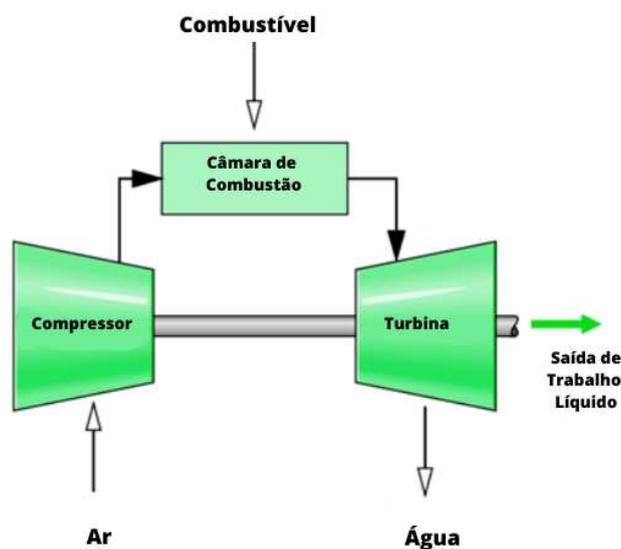
Fonte: (MORAN; SHAPIRO, 2006).

#### 2.4.5.2. Ciclo Brayton para geração de vapor

As plantas de potência que trabalham com ciclos à gás, utilizam como padrão o ciclo Brayton e ar como substância de trabalho. Em um ciclo Brayton aberto o compressor de ar admite, comprime e envia o para uma câmara de combustão, em seguida esse ar atravessa uma turbina e, então, é expelido para a atmosfera. Em tese, o ciclo de Brayton tende a ser um dos ciclos com menor eficiência com relação aos ciclos apresentados, porém apresenta características significativas, com agilidade nas partidas a frio e quente, como também possibilidade de operação em carga parcial sustentando o nível de eficiência. O biogás e combustíveis obtidos de processos de gaseificação e biocombustíveis líquidos são exemplos de recursos de biomassa apropriados a esta rota tecnológica. (MORAN; SHAPIRO, 2006; EPE, 2018; SANTOS, 2020).

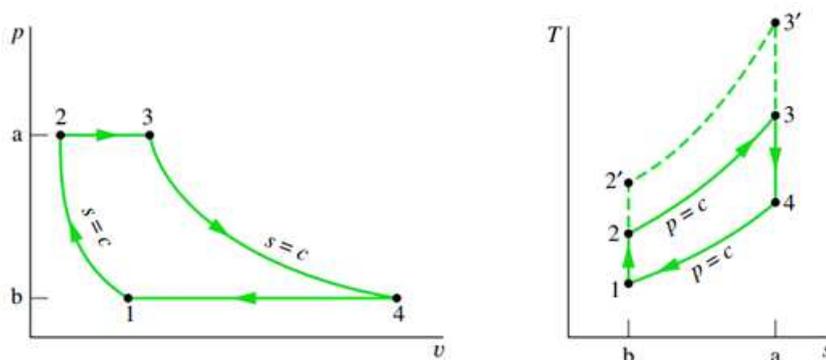
Na Figura 15 apresenta-se uma planta simples de turbina a gás a partir do ciclo Brayton, enquanto na Figura 16 constata-se os diagramas Pressão versus Volume e Temperatura versus Entropia característicos de um ciclo Brayton aberto.

Figura 15 - Exemplificação de ciclo Brayton aberto.



Fonte : (MORAN; SHAPIRO, 2006).

Figura 16 - (1) Diagrama  $P \times V$  e (2) Diagrama  $T \times S$  característicos do ciclo Brayton aberto.



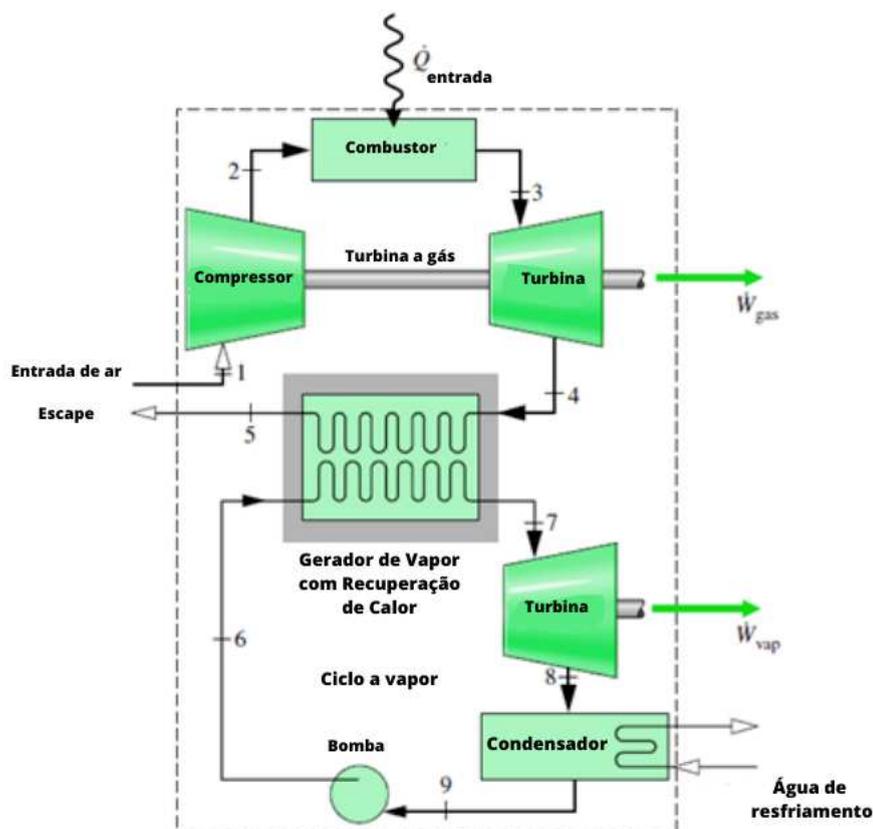
Fonte: (MORAN; SHAPIRO, 2006)

### 2.4.5.3. Ciclo combinado para geração de vapor

O ciclo combinado consiste de uma associação em série do ciclo Rankine com o Brayton, de modo que os gases de exaustão da turbina a gás podem ser utilizados para o aquecimento do vapor produzido nas caldeiras empregadas no ciclo Rankine. Conforme EPE (2018), o ciclo combinado tende a ser o mais eficiente entre os ciclos apresentados, por conta do aproveitamento energético dos gases de exaustão do ciclo Brayton. Ainda de acordo com EPE (2018), biomassas líquidas são melhores aproveitáveis no ciclo combinado, tal qual no ciclo Brayton (MORAN; SHAPIRO, 2006;

PUMPS BOMBAS, 2023). Na Figura 17 tem-se a representação do tal ciclo.

Figura 17 - Esquemático do ciclo combinado para geração de vapor.



Fonte: (MORAN; SHAPIRO, 2006).

#### 2.4.6. Gaseificação

É a tecnologia que pode ser aplicada em resíduos orgânicos, urbanos e industriais, e em madeiras. A gaseificação consiste na conversão de fontes de biomassa sólidas e gasosas através de reações termoquímicas, envolvendo vapor quente e ar ou oxigênio em quantidades inferiores ao mínimo para que haja a combustão (ANDRADE, 2007; MARTÍNEZ *et al.*, 2011).

A composição do gás resultante é uma mistura de monóxido de carbono, hidrogênio, metano, dióxido de carbono e nitrogênio, de forma que essas proporções variam de acordo com as condições do processo, especialmente em relação ao ar ou ao oxigênio que está sendo usado na oxidação. O combustível gerado a partir da combustão dessa biomassa é mais versátil e limpo do que as versões de combustível sólidos. Além disso, é possível produzir gás sintético a partir da gaseificação, o qual pode ser aplicado na síntese de qualquer hidrocarboneto (ANEEL, 2008).

#### 2.4.7. Pirólise

A pirólise, também conhecida como carbonização, é o processo mais antigo de conversão de uma fonte de biomassa (tipicamente a lenha) em outro combustível (carvão vegetal), que pode apresentar densidade energética até duas vezes maior que o material de origem.

Resíduos orgânicos de origem agrícola podem ser submetidos à pirólise, neste caso, é preciso que os resíduos sejam previamente compactados. O método consiste no aquecimento do material em um ambiente no qual exista a “quase ausência” de ar. A pirólise também produz gás combustível, alcatrão e pirolenhoso, materiais comumente utilizados no setor industrial. O resultado do processo varia muito da condição do material original, quantidade e umidade. Para a produção de uma tonelada de carvão vegetal, pode-se precisar de quatro a dez toneladas de lenha (LORA *et al.*, 2012; VIEIRA *et al.*, 2014).

#### **2.4.8. Transesterificação**

É um processo químico que transforma a biomassa de óleos vegetais em um produto intermediário, a partir da reação entre dois álcoois (metanol e etanol) e uma base (hidróxido de sódio ou potássio). Os produtos da transesterificação desse tipo de biomassa são a glicerina e o biodiesel, combustível que apresenta condições semelhantes ao diesel e pode ser aplicado em motores de combustão interna, de uso veicular ou estacionário (RAMOS *et al.*, 2011).

#### **2.4.9. Digestão anaeróbia**

Da mesma forma que a pirólise, a digestão anaeróbia deve ocorrer em um ambiente com a “quase ausência de oxigênio”. A biomassa original sofre decomposição pela ação de bactérias, da mesma forma que ocorre naturalmente com quase todos os compostos orgânicos (PITK *et al.*, 2013).

Resíduos orgânicos, como o esterco de animais e os resíduos industriais, podem ser tratados através da digestão anaeróbia em biodigestores. A ação das bactérias provoca o aquecimento necessário para que ocorra a decomposição, entretanto, em regiões ou épocas de frio, pode-se fazer necessária a aplicação de calor adicional. O produto da digestão anaeróbia é o biogás, que é composto essencialmente por metano e dióxido de carbono (SOARES *et al.*, 2018).

#### **2.4.10. Fermentação**

É um processo biológico executado pela ação de micro-organismos (normalmente leveduras) que convertem os açúcares presentes

em fontes de biomassa, como a cana-de-açúcar, o milho, a beterraba e outras espécies vegetais, em álcool. O resultado da fermentação da biomassa é a produção de etanol e metanol (CABRAL *et al.*, 2016).

## **2.5. Caracterização da biomassa**

A caracterização da biomassa consiste do processo de determinação de alguns parâmetros, permitindo, com isso, a constatação da melhor metodologia de aproveitamento energético das fontes de biomassa. Os parâmetros a serem determinados são os seguintes:

- a) Granulometria;
- b) Umidade;
- c) Massa específica;
- d) Análise elementar – CHNOS;
- e) Análise imediata – umidade, voláteis, cinzas e carbono fixo;
- f) Poder Calorífico Superior (PCS);
- g) Poder Calorífico Inferior (PCI).

### **2.5.1. Granulometria**

A granulometria consiste da determinação das frações em peso de cada componente da biomassa, sendo de fundamental importância para o dimensionamento de componentes de plantas de aproveitamento energético.

Tal análise é realizada a partir do emprego de um conjunto de peneiras, as quais podem estar presentes em um dispositivo denominado de peneirador mecânico (ABRÃO FILHO *et al.*, 2011).

### **2.5.2. Determinação do teor de umidade**

Consiste do cálculo da massa de água contida na amostra de biomassa, podendo ser determinada em base úmida e/ou em base seca. As equações (1) e (2) retratam a forma de cálculo do teor de umidade em cada base, sendo possível a constatação de que na base úmida o cálculo leva em consideração, no denominador, a massa de água verificada experimentalmente, enquanto para o cálculo na base seca, a massa de água verificada empiricamente não é utilizada no denominador da equação (CORTEZ *et al.*, 2009).

$$W_{bu}(\%bu) = \frac{m_{H_2O}}{m_{H_2O} + m_{biomassa\ seca}} \quad (1)$$

$$W_{bs}(\%bs) = \frac{m_{H_2O}}{m_{biomassa\ seca}} \quad (2)$$

Nas quais,

a)  $W_{bu}$  = teor de umidade em base úmida;

b)  $W_{bs}$  = teor de umidade em base seca;

c)  $m_{H_2O}$  = massa de água presente na amostra de biomassa, verificada experimentalmente;

d)  $m_{biomassa\ seca}$  = equivalente à diferença entre a massa da biomassa original e a massa de água verificada experimentalmente.

A determinação do teor de umidade é importante para a constatação da necessidade, ou não, de pré tratamento da fonte de biomassa anteriormente ao processo que será utilizado para o aproveitamento energético da mesma, haja vista que para alguns processos de aproveitamento, tais como a combustão direta, um alto teor de umidade pode tornar o processo ineficiente (RENDEIRO, 2008).

### 2.5.3. Massa específica

A massa específica de uma biomassa é a relação matemática entre a massa contínua da amostra pelo volume que tal amostra ocupa no espaço. A massa específica de uma amostra pode ser determinada através da metodologia trazida pela ABNT NBR 6922 (Equação 3), em que se quantifica uma determinada massa de biomassa a granel correspondente a um volume padronizado de 0,216 m<sup>3</sup> de amostra.

$$\rho = \frac{M_{biomassa}}{V} \left[ \frac{kg}{m^3} \right] \quad (3)$$

### 2.5.4. Análise elementar

A análise elementar de uma amostra combustível visa determinar a composição química do mesmo em percentual de massa ou de volume, ou seja, teor de carbono (C), hidrogênio (H), enxofre (S), oxigênio (O), nitrogênio (N), cinzas (A) e umidade (W).

É a característica técnica mais importante do combustível, constituindo a base

para a análise dos processos de combustão (cálculo do volume de ar necessário para a combustão, da quantidade de gases gerada e da sua entalpia). Determina também o poder calorífico do combustível, além de permitir avaliar o impacto ambiental da queima de um determinado energético (FRANCISCO, 2012).

A análise elementar de uma amostra de biomassa pode ser realizada através de metodologias empíricas em laboratório, com a utilização de equipamento de Energia Dispersiva de Raios-X (EDX), conforme demonstrado em Marcelino (2017). Neste tipo de equipamento, a amostra de biomassa é submetida a um feixe de raios x, fazendo com que os átomos presentes na amostra emitam raios x fluorescentes de diferentes comprimentos de onda, os quais são característicos para cada componente presente na amostra, sendo possível essa quantificação.

#### 2.5.5. Análise imediata

A análise imediata de uma amostra combustível visa determinar a composição química imediata do mesmo em percentual de massa ou de volume, ou seja, teor de carbono fixo (F), voláteis (V), cinzas (A) e umidade (W).

O conhecimento da composição química imediata é importante durante o cálculo do projeto da fornalha e das quantidades de ar primário e secundário necessários em função da percentagem de voláteis. Também o teor de voláteis tem um papel importante durante a ignição e as etapas iniciais da combustão de combustíveis sólidos (CORTEZ *et al.*, 2009; FRANCISCO, 2012).

Para a determinação do teor de umidade, utiliza-se a equação (3). Ressalta-se que, pela metodologia definida na ABNT NBR 8112, a análise do teor de umidade deve ser feita precedida de secagem.

$$W_{bu}(\%bu) = \frac{(m_1 - m_2)}{m_1} * 100 \quad (4)$$

Na qual,

- a)  $W_{bu}$  = teor de umidade obtido;
- b)  $m_1$  = massa inicial da amostra, medida em gramas; e
- c)  $m_2$  = massa final da amostra após o processo de secagem.

Ainda conforme metodologia empírica normalizada pela ABNT NBR 8112, o teor de voláteis deve ser quantificado através do aquecimento de uma amostra de

biomassa, previamente seca, até a temperatura de 850°C em uma mufla por 7 minutos. Analiticamente, o teor de voláteis pode ser calculado através da equação (5).

$$T_v(\%bs) = \frac{(m_2 - m_3)}{m_2} * 100 \quad (5)$$

Na qual,

- a)  $T_v$  = teor de voláteis, obtido em porcentagem em base seca;
- b)  $m_2$  = massa final da amostra, em gramas, após o processo de secagem e antes do experimento para determinação do teor de voláteis; e
- c)  $m_3$  = massa residual da amostra, em gramas, após o aquecimento a 850°C por 7 minutos em mufla.

Após a determinação do teor de voláteis, determina-se o teor de cinzas, ainda em conformidade com a metodologia estabelecida pela ABNT NBR 8112. Uma grama da amostra, que já passou por dois processos seguidos de aquecimento, é levada a um cadinho dentro de um forno, tendo sua temperatura elevada a 710°C por 60 minutos. Ao final, no interior do cadinho, restarão apenas as cinzas resultantes da amostra. A equação (5) esquematiza o cálculo que deve ser feito após o experimento.

$$T_{cinzas}(\%bs) = \frac{(m_3 - m_4)}{m_3} * 100 \quad (6)$$

Na qual,

- a)  $T_{cinzas}$  = teor de cinzas, obtido em porcentagem em base seca;
- b)  $m_3$  = massa da amostra, em gramas, anterior ao aquecimento a 710°C por uma hora;
- c)  $m_4$  = massa da amostra presente no cadinho, em gramas, após o aquecimento a 710°C por uma hora.

Ressalta-se que a determinação do teor de cinzas de uma amostra de biomassa é relevante para a prevenção de inconvenientes provocados por operações inadequadas, bem como na orientação da escolha dos materiais refratários adequados para a câmara de combustão.

Por fim, determina-se o teor de carbono fixo, obtido analiticamente a partir da aplicação da equação (6).

$$T_{cf}(\%bs) = (100 - T_v - T_{cinzas}) \quad (7)$$

### 2.5.6. Poder Calorífico

O poder calorífico é uma medida energética que representa a variação da quantidade de calor liberado (entalpia) durante a combustão completa de um mol de combustível (seja biomassa, ou não) a temperatura de 25° e pressão de 1 atm. No processo de avaliação de combustíveis, o poder calorífico pode ser subdividido em Poder Calorífico Superior (PCS) e Poder Calorífico Inferior (PCI) (SÁNCHEZ, 2010).

De acordo com Potter e Scott (2007), caso os produtos de combustão contenham água líquida, a entalpia de combustão é denominada de PCS. ANP (2008) reforça, ainda, que o PCS representa o calor produzido na queima de 1 kg de combustível, de modo que os gases produzidos no processo de combustão passam por resfriamento até que os vapores de água produzidos sejam condensados à fase líquida, de modo que todos os produtos retornam à temperatura inicial dos reagentes. Ainda segundo Potter e Scott (2007), o PCI é determinado quando os produtos da combustão possuírem água na fase gasosa. Portanto, a diferença primária entre os valores de entalpia é a quantidade de calor necessária para evaporar as moléculas de água contidas nos produtos de combustão.

Barbosa *et. al* (2008) formula que para combustíveis sólidos e líquidos, o PCS, dado em quilojoules por quilograma de combustível (kJ/kg), pode ser analiticamente determinado, com uma excelente aproximação, através da equação (8), que relaciona o PCS com os teores de carbono (C), hidrogênio (H), enxofre (S) e oxigênio (O), previamente determinados através do processo de análise elementar.

$$PCS = 33900 \times C + 141800 \times \left( H - \frac{O}{8} \right) + 9200 \times S \quad (8)$$

Ainda de acordo com Barbosa *et. al* (2008), o PCI, dado em quilojoules por quilograma de combustível (kJ/kg), possui uma relação com o PCS, podendo ser determinado analiticamente, com boa aproximação, através da equação 9. Um entendimento possível de se ter é que o PCI corresponde ao PCS quando subtraído o calor latente de vaporização da água. Na equação (9), “W” representa o teor de umidade, determinado no processo de análise imediata.

$$PCI = PCS - 2440 \times (9H + W) \quad (9)$$

Empiricamente, o poder calorífico de um combustível pode ser obtido através da utilização de um equipamento calorímetro, instrumentos esses que permitem a

determinação da quantidade de energia liberada em uma reação de combustão.

## **2.6. Tratamento da biomassa para aproveitamento em plantas térmicas**

Para a utilização eficaz da biomassa, muitas vezes ocorre a necessidade de submissão desta a uma determinada metodologia de pré-tratamento termomecânico. As metodologias mais utilizadas são as seguintes (RENDEIRO, 2008) :

- a) Secagem: o processo de secagem objetiva a redução do teor de umidade da amostra de biomassa, através da transferência de calor para a amostra. O processo pode ser subdividido em três partes:
  - a. Período 0: período necessário para o processo entrar em regime permanente;
  - b. Período 1: período que ocorre após a secagem alcançar o regime permanente e ocorre sob velocidade de secagem constante; e
  - c. Período 2: período caracterizado pela velocidade de secagem decrescente.
- b) Torrefação: o objetivo deste processo de pré tratamento é promover uma concentração de energia na amostra de biomassa em um produto formado em um curto espaço de tempo, a partir da aplicação de baixas taxas de aquecimento e de temperaturas moderadas, o que faz com que haja uma retenção dos voláteis de maior poder calorífico no produto final da torrefação. Como resultado, obtém-se um material intermediário entre a amostra de biomassa e o carvão;
- c) Briquetagem: o processo de briquetagem consiste na formação de blocos de biomassa, denominados de briquetes, a partir da sua compactação. Os briquetes possuem uma maior densidade energética do que a amostra em si, além de que o transporte e o armazenamento dos briquetes é mais facilitado, em razão do processo de compactação realizado.
- d) Peletização: o processo de peletização resulta na formação dos péletes, os quais possuem similaridade com os briquetes, em termos de densidade energética, processo de fabricação e formato, havendo diferenças apenas nas dimensões do produto final, haja vista que os péletes apresentam tamanho reduzido;

- e) Trituração: o processo de trituração é necessário quando do desejo da obtenção de amostras de biomassa com dimensões menores que as de um pélete, em torno de 20 mm.

## 2.7. Avaliação de Caldeiras

O balanço energético de uma caldeira consiste em avaliar a relação entre as propriedades de entrada e de saída do sistema, a fim de obter o rendimento da máquina térmica. Esse rendimento objetiva o bom funcionamento do sistema térmico. Contudo a caldeira necessita de vários dispositivos, onde cada mecanismo consome determinada parcela de energia que entra no sistema. Para esse fim dois métodos são utilizados, sendo eles: Método Direto e Método Indireto (RENDEIRO, 2014).

### 2.7.1. Método direto

Do balanço de energia presente em uma caldeira, tem-se:

$$Q_{entra} = Q_{sai} \quad (10)$$

Logo a eficiência do sistema passa a ser definida por:

$$\eta = \frac{Q_{útil}}{Q_{disponível}} \quad (11)$$

Onde,  $Q_{útil}$ : calor útil;

$Q_{disponível}$ : calor disponível.

### 2.7.2. Método indireto

O método indireto é mais seguro que o método direto, pois além de quantificar as perdas, não têm a medição do fluxo de massa; com o conhecimento das perdas de energia e suas determinadas causas é possível encontrar técnicas que minimizem e tornem o funcionamento de uma caldeira mais satisfatório (RENDEIRO, 2014).

#### 2.7.2.1. Balanço de energia

Nesse método o balanço de energia é descrito em termos do fluxo de massa de combustível, logo:

$$Q_{entra} = Q_{sai}$$

$$Q_{comb} + Q_{ar}^* = Q_{útil} + Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_{Comb} + Q_{ar}^* \quad (12)$$

Onde:  $Q_{\text{útil}}$  : Calor efetivo gasto para a geração de vapor (kW);

$Q_1$  : Calor perdido nos gases de escape (kW);

$Q_2$  : Calor perdido devido à combustão química incompleta (kW);

$Q_3$  : Calor perdido devido à combustão mecânica incompleta (kW);

$Q_4$  : Calor perdido devido ao arrefecimento externo da caldeira (kW);

$Q_5$  : Calor perdido com a escória (kW);

$Q_{\text{comb}}^*$  : Calor do combustível previamente aquecido (entrada) ou para aquecer o combustível (kW);

$Q_{\text{ar}}^*$  : Calor do ar previamente aquecido (entrada) ou para pré-aquecer o ar (kW).

#### 2.7.2.2. Eficiência de uma caldeira ( $\eta$ )

Quando o combustível e/ ou o ar são aquecidos pelo calor proveniente da caldeira, os mesmos devem ser desconsiderados, visto que o calor ganho é igual ao calor gasto para aquecer o sistema. Com isso a eficiência do sistema é dado por:

$$\eta = 100 - \frac{\sum Q_{\text{perdas}}}{Q_{\text{disp}}} \times 100 \quad (13)$$

#### 2.7.2.3. Calor do ar ( $Q_{\text{ar}}^*$ )

O calor físico fornecido ao ar e ao combustível é obtido de acordo com a seguinte equação:

$$Q_{\text{ar}}^* = m_{\text{ar}} \times C_{p,\text{ar}} \times (T_{\text{ar}} - T_{\text{ref}}) \quad [\text{kW}] \quad (14)$$

Sendo:

$m_{\text{ar}}$  = Fluxo de ar de combustão, [kg/s]

#### 2.7.2.4. Calor do combustível ( $Q_c$ )

O calor do combustível ( $Q_c$ ) é calculado por:

$$Q_c = m_v \times C_p \times (T_{\text{ar}} - T_{\text{ref}}) \quad [\text{kW}] \quad (15)$$

#### 2.7.2.5. Calor útil ( $Q_{\text{útil}}$ )

O calor responsável por vaporizar e super aquecer a água ao ponto almejado é determinado como calor útil, sendo:

$$Q_{\text{útil}} = m_v \times [(h_{\text{vap}} - h_{\text{aa}}) + \left(\frac{m_p}{m_v}\right) \times (h_p - h_{\text{aa}})] \quad (16)$$

### 2.7.2.6. Calor perdido nos gases de escape ( $Q_1$ )

O calor responsável por diminuir o rendimento da caldeira é:

$$Q_1 = (m_{\text{ar}} + m_c) \times c_{p,\text{ar}} \times (T_g - T_\infty) = m_c \times \left(\frac{A}{C} + 1\right) \times (T_g - T_\infty) \quad (17)$$

Onde  $\frac{A}{C}$  é a relação ar/combustível para sólidos e líquidos (percentuais de 0 a 100 massa) e pode ser obtido por:

$$\left(\frac{A}{C}\right) = 0,1149C^t + 0,3448H^t + 0,0431(S^t - O^t) \left[ \frac{\text{kg}_{\text{ar}}}{\text{kg}_{\text{comb}}} \right] \quad (18)$$

### 2.7.2.7. Calor perdido devido à combustão química incompleta ( $Q_2$ )

O calor perdido devido a combustão química incompleta ( $Q_2$ ), de modo teórico esse tipo de perda não ocorre, pois para acontecer a combustão completa deve ser fornecido ar em excesso. Outro fator importante é a consideração dos teores de  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$  e  $\text{CH}_4$ , expressos em  $\% \frac{v}{v}$  de gases secos nos gases de escape. Por se tratar de uma combustão incompleta, parte do calor que seria liberado pelo PCI é perdido. Logo  $Q_2$  será determinado por:

$$Q_2 = \frac{m_{\text{ar}} + m_c}{\rho_g} V_g \times (126 \text{CO} + 108 \text{H}_2 + 358 \text{CH}_4) \quad (19)$$

Onde:

$$\rho_g = \frac{PM}{RT} \quad (20)$$

Falta de ar para a combustão, péssima mistura do ar com o combustível e período insatisfatório de permanência do combustível na câmara de combustão, onde as partículas combustíveis saem da câmara sem completar a combustão são fatores que provocam esse tipo de perda.

### 2.7.2.8. Calor perdido devido à combustão mecânica incompleta ( $q_3$ )

$q_3$  é o calor perdido quando a combustão mecânica é incompleta, na maioria dos casos ocorre quando é feito a queima de combustíveis sólidos. A escória é responsável por envolver o restante do combustível em uma partícula, fazendo assim o isolamento do combustível do ar. Além de poder ocorrer quando o combustível cai

na grelha ou é arrastado para a parte externa da caldeira pela chaminé ( $q_3$ ) pode ser obtido por:

$$q_1 = \frac{h_{gee} - \alpha_g^* h_{af}^o}{Q_d^t} \times (100 - q_3), \% \quad (21)$$

#### 2.7.2.9. Calor perdido devido ao arrefecimento externo da caldeira ( $Q_4$ )

$Q_4$  é o calor perdido devido ao arrefecimento externo da caldeira, o motivo dessa perda acontecer é devido o corpo externo da caldeira possuir uma temperatura superior da temperatura ambiente; podendo ser amenizado em partes pela parede d'água. Para a obtenção dessa perdido é usado a seguinte equação:

$$Q_4 = A_v (h_{conv} + h_{rad}) \times (T_p - T_\infty) \quad (22)$$

Os coeficientes de radiação e convecção são obtidos pelas correlações apropriadas da transferência de calor. Onde caldeiras com paredes integralmente irradiadas (parede d'água e refratário), possuem uma variação de perda entre 0 a 2%. Já as caldeiras sem paredes podem chegar a perder até 6%.

#### 2.7.2.10. Calor perdido com a escória ( $Q_5$ )

O calor perdido devido à escória ( $Q_5$ ) só ocorre em caldeiras com grelhas que queimam carvão; essa escória é eliminada da grelha por meio de temperaturas elevadas e pode ser calculada por:

$$Q_5 = m_c (1 - \alpha_{arr}) \times \left( \frac{A_t}{100} \right) \times c_{p,esp} [(T_{esc} - T_\infty) + Q_{fusão}] \quad (23)$$

Para carvões queimados na grelha, a parte da cinza arrastada tem uma variação de:

$$0,07 < \alpha_{arr} < 0,2$$

E o calor de fusão da escória é em torno de  $250 \frac{kJ}{kg}$ .

#### 2.7.2.11. Entalpia dos gases de exaustão

Para obter a entalpia dos gases de exaustão é usado as seguintes expressões:

$$h_g = h_g^o + h_{ar}^o (\alpha - 1) \quad (24)$$

$$h_g^o = V_{RO_2}^o(c.t)_{RO_2} + V_{N_2}^o(c.t)_{N_2} + V_{HO_2}^o(c.t)_{HO_2} + (c.t)_{cinzas} \left( \frac{A_t}{100} \right)_{a_{arr}} \quad (25)$$

$$h_{ar}^o = V_{ar}^o(c.t)_{ar} \quad (26)$$

Onde:

$$V_{RO_2}^o = 0,01866(C^t + 0,375S^t) \quad (27)$$

$$V_{ar}^o = 0,0888(C^t + 0,375S^t) + 0,265H^t - 0,0333O^t \quad (28)$$

$$V_{N_2}^o = 0,79V_a^o + 0,008N^t \quad (29)$$

$$V_{H_2O}^o = 0,111H^t + 0,01214W^t + 0,016V_{ar}^o \quad (30)$$

Já a determinação do coeficiente de excesso de ar na saída da caldeira:

$$\beta = 2,35 \frac{H^t - 0,1260^t + 0,038N^t}{C^t + 0,375S^t} \quad (31)$$

$$R_{o_2} = \frac{(21 - O_2)}{1 + \beta} \quad (32)$$

$$\alpha = \frac{21}{21 - O_2} \quad (33)$$

O cálculo da entalpia de ar frio:

$$h_{af}^o = V_{ar}^o C_{af} t_{af} \quad (34)$$

Cálculo do volume de gases secos:

$$V_{gs} = V_{RO_2} + V_{N_2} + (\alpha - 1)V_{ar}^o \quad (35)$$

$$V_{H_2O} = V_{H_2O}^o + 0,0161 \cdot (\alpha - 1)V_{ar}^o \quad (36)$$

Cálculo da eficiência pela equação do balanço inverso:

$$\eta_b = 100 - (Q_1 + Q_2 + \dots + Q_5) \quad (37)$$

Determinação do valor calculado da vazão de combustível:

$$C_c = \frac{Q_u}{0,01 Q_d^t \eta_b} \quad (38)$$

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia utilizada para composição do estudo consistiu em uma pesquisa bibliográfica de caráter exploratório e descritivo, com busca de artigos relacionados ao tema bem como material com dados específicos, agências e órgãos especializados.

O primeiro passo para o dimensionamento da planta para geração de energia através da biomassa da casca do coco verde foi a determinação da localização do material a ser usado como fonte de combustível.

Uns dos fatores levados em consideração foram a localização da planta e o transporte da biomassa, visto que o resíduo de biomassa estudado apresenta uma massa específica aparente pequena e a logística de transporte por longas distâncias seria economicamente inviável.

A etapa seguinte foi obter a quantificação e a caracterização do resíduo coco verde para fins energéticos. Os dados foram obtidos a partir de análise na literatura especializada. Foram determinadas a composição química, o PCI, PCS, a umidade da casca do coco verde, análise elementar e análise imediata. Optou-se em utilizar um valor médio dos resultados apresentados nos estudos publicados. Vale ressaltar que os dados de composição elementar obtidos na literatura encontram-se em base úmida. Para a determinação dos parâmetros térmicos de interesse, deve-se trabalhar com a análise elementar em base seca. Para tanto, deve-se descontar a umidade da biomassa, a qual é determinada através da técnica de análise imediata que será descrita posteriormente.

Com base nos dados colhidos e analisados, foi possível a aplicação das equações (8) e (9), permitindo, assim, a determinação do PCS e do PCI do resíduo da casca de coco verde, respectivamente. A partir do cálculo de tais parâmetros, realizou-se uma nova pesquisa na literatura especializada a fim de se encontrar dados de PCS e de PCI para outras fontes de biomassa comumente empregadas na indústria para geração de energia térmica, como a cana-de-açúcar. O objetivo desta segunda pesquisa foi a coleta de dados que permitissem uma comparação entre o potencial de geração de energia térmica do resíduo da casca do coco verde e demais biomassas comumente empregadas em processos industriais.

A pesquisa em banco de dados de órgãos como: ANEEL, EPE, IBGE, entre outros) permitiu a coleta de dados de produção e de consumo do coco verde no

município de Paraipaba/CE, sobretudo na região do perímetro irrigado Curu-Paraipaba, que, conforme os dados apresentados no capítulo 03, é região de destaque na cocoicultura nacional. Com os dados citados colhidos e tratados, e já tendo sido calculado os parâmetros térmicos de interesse através da aplicação das equações (8) e (9), foi possível a estimativa de um potencial teórico do município de Paraipaba/CE na geração de energia térmica.

Depois da coleta dos parâmetros da biomassa do coco verde e da produção de coco verde do município de Paraipaba/CE, foi feita a seleção dos equipamentos (caldeira, turbina, bomba e sistema de arrefecimento) que poderão constituir a planta de aproveitamento energético do resíduo de casca do coco verde. Tais equipamentos foram escolhidos por meio de catálogos de empresas do ramo, levando em consideração os parâmetros que foram obtidos na etapa anterior. O dimensionamento preliminar da planta térmica foi realizado através da metodologia proposta por Rendeiro (2008).

Em seguida foi calculado o potencial de geração de energia da planta e como resultado obteve-se a capacidade da potência que o projeto poderá disponibilizar. E por fim foi realizado o balanço energético da caldeira.

### **3.1. Análise elementar da casca do coco verde**

Marcelino (2017) determinou a análise elementar do resíduo da casca de coco verde através de um experimento em duplicata com a aplicação do equipamento CHNS/O, um analisador elementar Perkin Elmer 2400 series II. No experimento, o método de Pregl-Dummas foi aplicado, no qual as amostras de resíduo são submetidas ao processo de combustão em uma atmosfera constituída por oxigênio, de modo que os gases resultantes são quantificados por meio de um detector de condutividade térmica (detector TCD).

Marcelino (2017) admitiu, ainda, um teor de enxofre nulo ( $S = 0$ ) e o teor de oxigênio foi obtido por diferença, ou seja, os percentuais de carbono, hidrogênio e nitrogênio foram somados e em seguida subtraiu-se de 100% (MARCELINO, 2017).

Na Tabela 5 têm-se os resultados obtidos por Marcelino (2017). Através dos dados expostos, pode-se verificar que a biomassa apresentou maior concentração de carbono e de oxigênio, o que, de acordo com McKendry (2002), faz com que o teor energético de um dado combustível seja alto, quando compara-se com os

combustíveis que apresentam maior concentração de hidrogênio e demais componentes.

Tabela 5 - Análise elementar obtida por Marcelino (2017).

Biomassa	C %	H%	N%	O%	S%
Casca de coco	44,03	4,85	0,51	50,61	0

Fonte: (MARCELINO, 2017).

Outro aspecto relevante, levantado por Marcelino (2017) é que a biomassa analisada possui baixas concentrações de nitrogênio (0,51%) e de enxofre (0%), concentrações irrelevantes quando comparadas aos demais elementos. Isso implica em um baixo potencial poluidor na queima do resíduo da casca de coco verde, a partir da ausência ou pouca emissão de óxidos de enxofre e/ou de nitrogênio.

B.Cortez *et al.* (2009) descreve os testes que foram realizados em resíduos de casca de coco verde. Foram realizados testes de carbonização da casca em triplicata, utilizando-se carvão vegetal de eucalipto como combustível. Dessa forma, foi possível obter a composição química elementar e a análise imediata do resíduo. Na Tabela 6 está relacionado os dados obtidos com o procedimento experimental. O teor de oxigênio pode ser determinado através da diferença entre os demais elementos. Assim, chega-se a um teor de oxigênio de aproximadamente 48,43%. Assim como nos resultados obtidos por Marcelino (2017), percebem-se baixas concentrações de enxofre e de nitrogênio.

Tabela 6- Composição elementar obtida por B Cortez (2009).

Amostra	Composição Elementar [% m/m]			
	C	H	N	S
Fibra de coco	42,11	5,35	0,95	0,13
Casca de coco	45,48	5,65	0,44	382,91 ppm

Fonte: (B.CORTEZ *et al.*, 2009).

Souza *et al.* (2019) realiza uma análise comparativa entre as biomassas da casca do coco verde e a casca da castanha de caju. A determinação da composição elementar das biomassas foi feita através da utilização de um equipamento analisador elementar da marca Thermo Scientific, modelo Flash EA 1112, que além de determinar as concentrações em massa de carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio e enxofre, permite, também, a determinação do teor de cinzas da amostra. Na Tabela 7

estão expostos os resultados obtidos através do experimento. O teor de oxigênio pode ser determinado, também, através da diferença entre 100% e o somatório dos demais percentuais. Dessa forma, calcula-se um teor de oxigênio de 46,48%.

Observa-se que os teores de nitrogênio e de enxofre, assim como nas demais referências analisadas, são baixos, permitindo concluir que a biomassa da casca de coco verde apresenta um baixo potencial poluidor em sua queima.

Tabela 7 - Análise elementar obtida por Souza et. al. (2019).

Análise elementar						
Amostra	N(%)	C(%)	H(%)	O(%)	S(%)	TC(%)
Casca do coco verde	0,03	45,43	6,02	46,48	0	2,04

Fonte: (SOUZA et al., 2019).

Na Tabela 8 constam os dados de análise elementar obtidos nas referências estudadas, bem como calcula uma média aritmética da concentração de cada elemento, parâmetro esse que será utilizado nos demais cálculos para determinação do potencial de geração de energia térmica do resíduo da biomassa do coco verde.

Tabela 8 - Síntese dos dados de análise elementar obtidos a partir de revisão bibliográfica e cálculo da composição elementar média.

Referência	N(%)	C(%)	H(%)	O(%)	S(%)	TC(%)
SOUZA <i>et al.</i> , 2019	0,03	45,43	6,02	46,48	-	2,04
B.CORTEZ <i>et al.</i> , 2009	0,44	45,48	5,65	48,43	-	-
MARCELINO, 2017	0,51	44,03	4,85	50,61	-	-
Média	0,33	44,98	5,51	48,51	-	0,68

Fonte: Elaboração Própria.

### 3.2. Análise imediata da casca do coco verde

Marcelino (2017) determinou a análise imediata da casca de coco verde através de testes em triplicata utilizando uma balança analítica *Adventures* da marca Ohamus, uma mufla EDG 3P-S da marca EDG e uma estufa da marca Quimis (MARCELINO, 2017). Os resultados obtidos estão expostos na Tabela 9.

Tabela 9 - Análise imediata obtida por Marcelino (2017).

Análise Imediata (%)	Casca de Coco
Umidade	9,87 ± 0,14
Cinzas	13,24 ± 0,34
Voláteis	68,49 ± 0,39
Carbono Fixo	8,78 ± 0,67

Fonte: (MARCELINO, 2017).

B.Cortez *et al.* (2009), através dos testes de carbonização da casca realizados em triplicata, obteve os resultados de análise imediata presentes na Tabela 10.

Tabela 10 - Análise imediata obtida por B. Cortez et. al. (2009).

Amostra	Umidade (%)	Carbono Fixo (%)	Voláteis (%)	Cinzas (%)
Casca do coco verde	12,00	17,69	71,60	10,71

Fonte: Elaboração Própria com base em (B. CORTEZ et al., 2009).

Figueiredo (2011), obteve os resultados explicitados na Tabela 11, a partir da aplicação de uma metodologia semelhante à utilizada por Marcelino (2017).

Tabela 11 - Análise imediata obtida por Figueiredo (2011).

Amostra	Umidade (%)	Carbono Fixo (%)	Voláteis (%)	Cinzas (%)
Casca do coco verde	9,19	11,22	77,83	1,76

Fonte: (FIGUEIREDO, 2011).

Na Tabela 12 sintetiza-se os dados de análise imediata obtidos nas referências estudadas, bem como calcula uma média aritmética dos percentuais de umidade, cinzas, voláteis e carbono fixo, parâmetros que serão utilizados nos demais cálculos para determinação do potencial de geração de energia térmica do resíduo da biomassa do coco verde.

Tabela 12 - Dados de análise imediata obtidos a partir de revisão bibliográfica e média dos valores encontrados.

Análise Imediata				
Referência	Umidade (%)	Cinzas (%)	Voláteis (%)	Carbono Fixo (%)
FIGUEIREDO, 2011	9,19	1,76	77,83	11,22
B.CORTEZ <i>et al.</i> , 2009	12,00	10,71	71,60	17,69
MARCELINO, 2017	9,87	13,24	68,49	8,78
Média	10,35	8,57	72,64	12,56

Fonte: Elaboração Própria.

### **3.3. Determinação do quantitativo de resíduo a ser utilizado**

De acordo com os dados apresentados na Tabela 1, o município de Paraipaba/CE foi responsável pela produção de 35 milhões de frutos de coco verde em 2021, a partir de uma área colhida de 5.938 hectares. Segundo Brasil (2023), a produção anual do perímetro irrigado Curu-Paraipaba é de aproximadamente 16,48 milhões de frutos de coco verde por ano (1,4 milhão de produção mensal). Conclui-se, portanto, que aproximadamente 47% da produção anual de coco verde do município de Paraipaba está concentrada no perímetro irrigado Curu-Paraipaba.

Dessa forma, para fins deste estudo, foram utilizados os dados de produção anual do perímetro irrigado, a partir dos quais será possível estimar o potencial teórico de energia térmica desta localidade.

No entanto, considerou-se que o aproveitamento de 100% da produtividade local poderia fazer com que o projeto da planta térmica alcançasse altas proporções; além das questões de envio da matéria-prima para outras cidades e estados, o que poderia trazer resultados negativos ao estudo. Diante disso, utilizou-se como premissa para o dimensionamento da planta térmica o aproveitamento de apenas 35% da produtividade de coco verde do perímetro irrigado, chegando-se ao parâmetro de 490.000 frutos por mês. Supondo que a planta térmica opere 10 horas por dia, chega-se a uma disponibilidade de combustível de 1.633,34 kg por hora.

### **3.4. Cálculo do Poder Calorífico Superior (PCS)**

Para o cálculo do PCS, utilizou-se a equação (8). A composição elementar utilizada na aplicação da equação é a mesma apresentada pela Tabela 8, que traz a média das composições elementares das referências bibliográficas estudadas.

Vale ressaltar que anterior a aplicação da equação (8), é necessário desconsiderar a umidade da composição de cada elemento, pois a determinação do Poder Calorífico Superior deve ser feita em base seca, ou base de trabalho. O valor de umidade a ser considerado é a média dos dados apresentados pelas referências bibliográficas apresentadas, conforme consta na Tabela 12.

Na Tabela 13 apresenta-se os dados necessários para o cálculo do PCS.

Tabela 13 - Dados necessários para cálculo do PCS.

Parâmetro	Composição (%)
C	44,98
H	5,51
N	0,33
O	48,51
S	-
Umidade	10,35

Fonte: Elaboração Própria.

Na Tabela 14, por sua vez, constam os dados já em base seca. Para tanto, basta multiplicar a composição de cada elemento por um menos o parâmetro de umidade utilizado (10,35%).

Tabela 14 - Composição elementar da biomassa em base seca.

Parâmetro	Composição em base seca (%)
C	40,32
H	4,94
N	0,30
O	43,49
S	-

Fonte: Elaboração Própria.

Por fim, com a aplicação dos dados em base seca na equação (8), chega-se a um valor de PCS de 12,694 MJ/Kg. Marcelino (2017), para a determinação do PCS, utilizou uma bomba calorimétrica, obtendo empiricamente o valor de 15,11 MJ/kg. Outros autores referenciados por Marcelino (2017), em seus estudos, apontam valores de PCS que variam de 13,00 MJ/kg a 22,70 MJ/kg. Assim, conclui-se que o parâmetro calculado através da análise elementar em base seca (12,694 MJ/kg) está em conformidade com valores já registrados na literatura científica especializada.

### 3.5. Cálculo do Poder Calorífico Inferior (PCI)

Para o cálculo do Poder Calorífico Inferior, utilizou-se os mesmos dados de composição elementar em base seca, conforme descrito na Tabela 14. A partir da aplicação da equação (9), obteve-se o valor de 11,627 MJ/Kg para o PCI do resíduo da casca de coco verde.

### 3.6. Dimensionamento da planta térmica

Para o dimensionamento preliminar da planta térmica, foram utilizados os parâmetros de análise elementar e análise imediata da biomassa em base seca, bem como a disponibilidade do resíduo da casca do coco verde adotada (1.633,34 kg/h de resíduo úmido). Ademais, as seguintes premissas técnicas para dimensionamento

preliminar foram adotadas:

- Consumo específico de vapor na turbina: 6,5 kg/kWh;
- Produção de vapor por quilograma de biomassa seca: 4 kg de vapor/kg de biomassa seca;
- Volume do tanque de condensador: 1,5 vezes consumo de vapor da turbina.

## 4. RESULTADOS

A partir da metodologia explicitada anteriormente, dos dados de análise elementar e análise imediata da biomassa selecionada para análise e dos dados de produção de coco verde na região do perímetro irrigado Curu-Paraipaba, realizou-se o dimensionamento preliminar da planta de potência e, por fim, a avaliação da caldeira selecionada para estudo.

### 4.1. Dimensionamento preliminar da planta térmica

Conforme Rendeiro (2008), a seguinte sequência é aplicável para dimensionamento preliminar de uma planta térmica a partir da utilização de uma biomassa sólida:

- Quantificação da demanda a ser atendida pela planta térmica, a partir da análise da curva de carga da(s) unidades(s) de consumo;
- Qualificação e quantificação da biomassa disponível para o aproveitamento energético, com cálculo do PCS e do PCI;
- Escolha do tipo de máquina a vapor a ser utilizada, seja uma turbina de contrapressão ou uma máquina alternativa a vapor. Nesse ponto, já é importante a definição do gerador de energia elétrica que será utilizado na conversão de energia mecânica para elétrica;
- Verificação em catálogo de fabricante do consumo específico da turbina, ou máquina alternativa a vapor, bem como suas características estruturais;
- Cálculo da quantidade de vapor necessária para o atendimento da demanda energética, a partir do dado de consumo específico;
- Com a quantificação e qualificação do vapor a ser gerado, definição da caldeira que será utilizada, bem como da fornalha correta para a combustão da biomassa em aplicação;
- Identificação da quantidade de biomassa a ser utilizada para a geração de vapor requerida;
- Cálculo do volume do tanque de condensado;
- Determinação da capacidade de remoção de calor do condensador, através dos dados de temperatura e de pressão na saída da turbina, ou máquina alternativa de geração de vapor;
- Levantamento das cargas parasitas da planta térmica.

A partir da metodologia exposta, procedeu-se com o dimensionamento preliminar da planta térmica. Conforme definido, a disponibilidade de resíduo é de aproximadamente 1.633,34 kg/h de casca de coco verde. A umidade média obtida com base na análise imediata realizada pelas referências utilizadas foi de 10,35%. Multiplicando-se a quantidade de biomassa disponível por um menos o percentual médio de umidade, chega-se à disponibilidade de biomassa seca de 1420,19 kg/h. O PCI médio calculado foi de 11,627 MJ/kg.

Assumindo-se que para cada quilograma de biomassa seca, haverá a geração de 4 quilogramas de vapor, e multiplicando-se a vazão de combustível em base seca por 4, estima-se que a vazão mássica de vapor gerado na caldeira será de aproximadamente 5.857,16 kg/h.

Por meio de consultas em catálogos de fabricantes nacionais e internacionais de caldeiras, verificou-se que a caldeira HLM Compact, do fabricante Fimaco, atende às expectativas desejadas no projeto. A produção de vapor é de 3 a 6 toneladas por hora, compressão de saída de até 21 bar, sendo possível a queima de combustíveis com até 60% de umidade. A caldeira utilizada na análise está ilustrada na Figura 18. A caldeira escolhida para a composição da análise admite geometria do combustível de até 60 mm. Portanto, a metodologia de pré-tratamento da biomassa utilizada para a combustão pode ser a serragem ou a peletização do combustível.

Figura 18 - Caldeira HLM Compact do fabricante Fimaco.



Fonte: FIMACO, (2019).

Partindo-se da premissa de que o consumo específico de vapor na turbina de

contrapressão é de 6,5 kg/kWh e dividindo-se a vazão mássica de vapor calculada por 6,5, calcula-se que a potência preliminar da planta térmica será de aproximadamente 901,10 kW.

Por meio de consultas em catálogos de empresas fabricantes de turbinas, verificou-se que o modelo ST 1000 da marca Solidda Energia com potência nominal de 1000 kW atende às expectativas do projeto. A pressão de entrada do vapor gerado na caldeira será de 21 bar, que se encontra dentro dos parâmetros técnicos da turbina. É válida a ressalva de que o modelo selecionado apresenta dados de saída que apontam para a dispensa da utilização de equipamentos condensadores, haja vista que a pressão de saída é de 0,15 bar e temperatura de saída, 54°C. Na Tabela 15 é apresentado as especificações técnicas da turbina selecionada. Na Figura 19 o equipamento escolhido está ilustrado.

Tabela 15 - Dados técnicos da turbina utilizada no projeto.

ST 1000	
Vapor	Superaquecido
Potência gerada	1000 kW
Pressão de vapor	16 a 45 bar
Temperatura	250 a 450°C
Consumo Médio de Vapor	6 ton/h
Consumo de Combustível	Até 2 ton/h
Pressão de Vapor de Exaustão	0,15 bar
Temperatura de Exaustão	54°C

Fonte: Adaptado de Solidda Energia (2017).

Figura 19- Turbina de contrapressão utilizada no projeto.



Fonte: Solidda Energia (2017).

Ainda que o modelo de turbina selecionado dispense a utilização de equipamento condensador no projeto, realizou-se o dimensionamento da capacidade de condensador necessária, no caso de utilização de outros modelos de turbina.

Para o cálculo do volume do tanque de condensado, multiplica-se a vazão mássica de vapor gerada na caldeira (5.857,16 kg/h) por 1,5, chegando-se à necessidade de um tanque de condensado que opere com até 8.785,74 kg/h.

O PCI da biomassa em base seca calculado é de 11.627,43 kJ/kg. Convertendo-se tal parâmetro para a unidade de quilocalorias por hora, encontra-se que o PCI da biomassa em base seca é de 2.779,02 kcal/kg. A capacidade de remoção de calor do condensador, portanto, é encontrada a partir da multiplicação do PCI da biomassa em base seca, em kcal/kg, pela capacidade do tanque de condensado. Verifica-se, portanto, a necessidade de um condensador com capacidade de remoção de calor de até 24.415.747,17 kcal/h.

Portanto, chegou-se a seguinte configuração preliminar para a planta térmica:

**Caldeira:**

- Produção nominal: 5.817,16 kg/h de vapor – valor calculado;
- Pressão de saída: até 21 bar – valor obtido no catálogo do fabricante;
- Temperatura do vapor de saída: 330° C – valor obtido no catálogo do fabricante;

**Turbina**

- Tipo: contrapressão;
- Pressão de vapor - admissão: 16 a 45 bar – valor obtido no catálogo do fabricante;
- Pressão de vapor- exaustão: 0,15 bar - valor obtido no catálogo do fabricante;
- Temperatura de vapor - admissão: 250 a 450°C - valor obtido no catálogo do fabricante;
- Temperatura de vapor-exaustão: 54° C - valor obtido no catálogo do fabricante;
- Rotação: 6500 rpm - valor obtido no catálogo do fabricante;

**Redutor:**

- Potência de entrada: 6500 rpm – conforme rotação do eixo mecânico da turbina;

- Potência de saída: 3600 rpm;

#### **Gerador**

- Potência: 1000 kW;
- Tensão: 13,8 kV;
- Frequência: 3600 rpm;
- Rendimento: 96%;

Vale ressaltar que optou-se pela não utilização de um condensador na configuração da planta térmica proposta, haja vista que na saída da turbina, será possível encontrar água no estado líquido saturado, já sendo possibilitada a utilização da mesma na caldeira sem a necessidade de remoção de calor.

#### **4.2. Avaliação da caldeira**

Conforme descrito no capítulo 03 (Referencial Teórico), o processo de avaliação de caldeiras objetiva o cálculo de todas as perdas de calor da caldeira, a fim de avaliar a eficiência global do processo. Os cálculos necessários para avaliação da caldeira para combustão de resíduos da casca de coco verde foram realizados, conforme demonstrado a seguir.

O cálculo do calor disponível na base seca é realizado através da seguinte equação:

$$Q_d = PCI + Q_c + Q_{ar} \quad (39)$$

Na qual,

- $Q_d$  = Calor disponível na base seca (KJ/kg);
- PCI = Poder Calorífico Inferior (kJ/kg);
- $Q_c$  = Calor disponível no combustível a temperatura ambiente;
- $Q_{ar}$  = Calor disponível no ar a temperatura ambiente; e
- $Q_v$  = Calor disponível no vapor à temperatura ambiente.

O PCI foi determinado através da aplicação da equação (9), resultando no valor de 11.627,43 kJ/kg.

Para o cálculo do calor disponível no combustível a temperatura ambiente, utiliza-se a equação (15). O calor específico do combustível utilizado para cálculo foi a média dos valores registrados por Araújo, Felix Filho e Barbosa (2015), obtendo-se

um valor de calor específico de 1,516 kJ/kg.°C. Portanto, o calor disponível no combustível em base seca a temperatura ambiente resultou em 55.494,82 kJ/kg, a partir da vazão mássica do combustível em base seca.

Para o cálculo do calor disponível no ar a temperatura ambiente, empregou-se a equação (14). O calor específico do ar adotado foi 1,004 kJ/kg, para a temperatura de 25°C, conforme apresentado por Moran *et al.*, (2006). Partindo-se da premissa de que a temperatura de referência é a própria temperatura ambiente (25°C), chega-se à conclusão de que o calor disponível no ar a temperatura ambiente é nulo.

A partir do exposto, o calor disponível na base seca foi calculado em 67.122,26 kJ/kg.

O próximo passo no processo é o cálculo das entalpias dos gases de exaustão. Para tanto, as equações (24) a (33) foram empregadas. Na Tabela 16 está apresentando todos os dados para entalpia dos gases de exaustão. Chegou-se a um resultado de entalpia dos gases de exaustão de 2.945,529 kJ/kg.

Tabela 16 - Entalpia dos gases de exaustão.

Variável	Valor	Unidade
$V_{RO^2}^{\circ}$	0,752371	$m^3/kg$
$V_{ar}^{\circ}$	3,441299	$m^3/kg$
$V_{N_2}^{\circ}$	2,721026	$m^3/kg$
$V_{H_2O}^{\circ}$	0,603745	$m^3/kg$
$h_{ar}^{\circ}$	1530,421	kJ/kg
$\beta$	-0,03079	-
$R_{O_2}$	8,180102	-
$\lambda$	1,638079	-
$h_g^{\circ}$	1969	kJ/kg
$h_g$	2945,529	kJ/kg

Fonte: Elaboração Própria.

Para o cálculo da entalpia do ar frio, empregou-se a equação(34). A temperatura do ar frio adotada foi de 298 K. Chegou-se a um resultado de 113,563 kJ/kg.

Para o cálculo das perdas com o calor sensível dos gases (calor perdido nos gases de escape -  $Q_1$  e  $q_1$ ), a equação (17) foi aplicada. A equação (18) foi utilizada para cálculo da relação ar-combustível. A relação ar-combustível encontrada foi de

4,461.  $Q_1$  resultou em 1.672,47 kJ/kg de combustível, 14,3371% do calor total disponível em base seca.

Considerou-se na análise, para fins de simplificação, que as perdas por combustão química incompleta ( $Q_2$  e  $q_2$ ) são nulas, a partir de uma premissa de combustão química completa do combustível.

Para o cálculo das perdas por combustão mecânica incompleta ( $Q_3$  e  $q_3$ ), a equação (21), a qual utiliza o parâmetro de perdas com o calor sensível dos gases de exaustão ( $q_1$ ), previamente calculado. A partir da manipulação algébrica da equação (21), encontrou-se o valor de 39,392% para as perdas por combustão mecânica incompleta.

As perdas para o meio ambiente, ou perdas devido ao arrefecimento externo da caldeira, ( $Q_4$  e  $q_4$ ) poderiam ter sido calculadas pela equação (22), mas para fins de simplificação do estudo, considerou-se como premissa que a caldeira adotada é integralmente irradiada, possuindo isolamento de suas paredes através de água e material refratário. Assim, adotou-se  $q_4$  como 1% .

O cálculo das perdas por escória ( $Q_5$  e  $q_5$ ) é realizado através do emprego da equação (23). Entretanto, conforme exposto, tal componente de perdas é aplicável apenas a caldeiras que queimam carvão. Dessa forma, considerou-se que as perdas por escória são nulas na aplicação em estudo. Na Tabela 17 estão expostos os valores de todas as perdas de calor consideradas no processo.

Tabela 17 - Perdas de calor calculadas no processo de avaliação da caldeira.

Perdas de Calor	Definição	Percentual	Perda Total (kJ/kg)
$Q_1$	Calor sensível dos gases de exaustão	2,491677057	1672,469831
$Q_2$	Combustão química incompleta	0	0
$Q_3$	Combustão mecânica incompleta	39,39237781	26441,05234
$Q_4$	Perdas para o meio ambiente	1	671,2225515
$Q_5$	Perdas por escória	0	0

Fonte: Elaboração Própria.

A equação (37) foi utilizada para o cálculo da eficiência do processo, a partir dos parâmetros de perdas previamente determinados. A eficiência geral do processo

resultou em 57,11%. Multiplicando-se o valor de eficiência calculado pelo calor total disponível (67.122,26 kJ/kg), encontra-se que o calor útil para geração de vapor pretendida é de aproximadamente 38.337,51 kJ/kg.

A partir da premissa inicial de vazão de combustível igual a 1,4 toneladas por hora (equivalente à vazão mássica de combustível em base seca), verificou-se um erro de aproximadamente 94,96% em relação à vazão mássica ideal para otimização da caldeira, calculada em 29,05 toneladas por hora. Dessa forma, realizaram-se novas simulações para determinação da vazão de combustível que resultasse em um erro máximo de 10% em relação à vazão calculada (29,05 ton/h). Chegou-se à conclusão da necessidade de uma vazão de combustível mínima de 26,15 toneladas por hora para que o erro máximo seja de 10%. A partir dessa vazão teórica de combustível, espera-se que o processo de geração de vapor seja otimizado.

## 5. CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos e explicitados, conclui-se que para implantação de uma planta térmica de vapor a partir do resíduo da casca do coco verde de 1 MW de potência, é necessário uma vazão de combustível de 1.633,34 kg/h, que pode ser obtida através do aproveitamento de 35% da disponibilidade mensal de coco da região do perímetro irrigado Curu-Paraipaba (1,4 milhão de frutos). Vale ressaltar que a escolha da potência de 1 MW se deu através dos seguintes motivos: (i) o limite regulatório para implantação de centrais de geração enquadradas como geração distribuída é de 3 MW, conforme Lei Federal n. 14.300/2022, regulamentada pela Resolução normativa n. 1.059/2023 da Agência Nacional de Energia Elétrica; e (ii) entende-se que a plotagem dos resultados para 1 MW pode ser estratégica, haja vista que permite que o desenvolvimento de plantas maiores possa ser feito de forma modular.

No que tange ao resíduo trabalhado, conclui-se que a casca do coco verde apresenta alto potencial para o aproveitamento energético. O seu poder calorífico inferior (11.627 MJ/kg) justifica a realização de estudos mais aprofundados acerca do seu potencial de geração de energia térmica. Vale a ressalva de que a análise elementar da biomassa, permitiu a conclusão de que o seu aproveitamento, através da combustão direta, pode não ser tão prejudicial para o meio ambiente haja vista as baixas concentrações de nitrogênio e de enxofre na composição química do resíduo. Tais compostos são os principais vetores de fenômenos como a chuva ácida.

No que tange à área utilizada para o levantamento técnico, conclui-se que o município de Paraipaba/CE, por ser um dos maiores produtores de coco verde em escala nacional, merece atenção especial na gestão do resíduo gerado, podendo este ser utilizado como fonte para geração de energia térmica. Tal atividade pode ser um vetor de geração de emprego direto e indireto para a população local, o que traz benefícios sociais importantes.

A respeito do dimensionamento preliminar da planta térmica, a metodologia utilizada é a proposta por Rendeiro (2008), que utiliza premissas técnicas como consumo específico de vapor na turbina de contrapressão e vazão mássica de vapor gerada a partir da vazão mássica de combustível. Os cálculos apontaram para a necessidade de uma caldeira com geração de vapor de aproximadamente 5,8 ton/h, a partir de uma vazão mássica de combustível seco de 1,464 ton/h. O vapor gerado

será admitido em uma turbina de contrapressão a uma pressão de 21 bar, sendo a exaustão da turbina a 0,15 bar e 54°C. A turbina escolhida para a análise, em razão de suas particularidades no que tange aos dados de saída (pressão e temperatura), permite que o condensador seja dispensado, haja vista que na saída da turbina será encontrada água em estado líquido saturado. No entanto, foi calculado o volume do tanque do condensador, bem como sua capacidade mínima de remoção de calor, para o caso de ser utilizada em projeto uma turbina com especificações distintas da que foi adotada no dimensionamento preliminar.

No que tange ao processo de avaliação de caldeiras, verificou-se que a eficiência global do processo de geração de vapor foi de 57,11%. Inicialmente, a partir da utilização da vazão mássica de combustível em base seca (1,4 ton/h), o erro obtido foi superior a 90%. A partir disso, realizaram-se simulações de vazão de combustível que culminou em um erro inferior a 10%. Chegou-se à necessidade de uma vazão mínima de 26,15 ton/h, para um erro máximo de 10%.

Por fim, conclui-se que os objetivos geral e específicos do trabalho foram plenamente atendidos. Como considerações e perspectivas para trabalhos futuros, espera-se desenvolver projetos completos para o aproveitamento do resíduo estudado.

## REFERÊNCIAS

ABRÃO FILHO, A.; Silva, A. C.; Silva, E. M. S. **Caracterização Granulométrica de Minérios de Apatita da Região de Catalão -GO**. In: 63º Reunião Anual da SBPC, 63., 2011, Goiânia.

ANP-AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). <http://www.anp.gov.br/glossario/index.asp?strAlpha=P>.

ALTAFINI, C. R. Curso de engenharia mecânica – disciplina de máquinas térmicas – apostila sobre caldeiras – Universidade de Caxias do Sul, 2002. Disponível em: . Acesso em: 12 maio 2023.

ALVES, C. O. **Perfil técnico e econômico da produção de coco no distrito de irrigação Curu-Paraipaba, Estado do Ceará**. Dissertação (Economia Rural). Universidade Federal do Ceará: Fortaleza, 2013.

ALVES, A. da S.; Aragão, W. M.; Loiola, C. M.; Pedroso, G. T. **Características morfológicas-vegetativas de cultivares de coqueiro**. Revista Brasileira de Fruticultura, [S.L.], v. 29, n. 3, p. 518-523, 2007. FapUNIFESP (SciELO).

ALVES, K. de N. A.; ALMEIDA, G. M. de; L., W. T. dos S.; SOUZA, A. M. B. de; SOUZA, A. A. S. de; VIDAL, D. J. F.; SILVA, D. A. C. da; PEREIRA, W. C. **Estudo da Evolução do Cultivo de Coco em Municípios do Estado do Pará e nos Principais Estados Brasileiros Produtores**. Revista Agroecossistemas, [S.L.], v. 10, n. 2, p. 209, 19 nov. 2018. Universidade Federal do Pará.

ANDRADE, A. M.; PASSOS, P. R. A.; MARQUES, L. G. C.; OLIVEIRA, L. B.; VIDAURRE, G. B.; ROCHA, J. D. S. **Pirólise de resíduos do coco-da-baía (Cocos nucifera Linn) e análise do carvão vegetal**. Revista Árvore, Viçosa-MG, v. 28, n. 5, p. 707-714, 2004.

ANDRADE, R. **Gaseificação de biomassa: uma análise teórica e experimental**. PhD Thesis, Universidade Federal de Itajubá, Brazil; 2007

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. BIOMASSA. 2008a. Disponível em: < [http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/05-Biomassa\(2\).pdf](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/05-Biomassa(2).pdf) > Acesso em: 29 junho 2023.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. Atlas de energia elétrica do Brasil / 3. ed. – Brasília : Aneel, 2008b. 236 p. : il. ISBN: 978-85-87491-10-7

ARAGÃO, W. M.; RIBEIRO, F. E.; TUPINAMBÁ, E. A.; SIQUEIRA, E. R. **Variedades e híbridos do coqueiro** In: ARAGÃO, W. M. (Ed.). Coco: pós colheita. Brasília: Vera Cruz, 2002a. v.1, p.26- 34.

ARAGÃO, W. M.; CRUZ, E. M. de O.; HELVÊCIO, J. S. **Caracterização morfológica do fruto e química da água de coco em cultivares de coqueiro anão**. Embrapa. Aracaju. 2002b.

ARAÚJO, Paulo M. M.; FELIX FILHO, Luis F.; BARBOSA, Jessyca J.. **ESTUDO DAS PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DA FIBRA DE COCO MINIMAMENTE PROCESSADA VISANDO APLICAÇÃO COMO ISOLANTE TÉRMICO**. Revista Interdisciplinar de Pesquisa e Inovação, Sergipe, v. 01, n. 01, p. 01-08, 14 set. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS- **ABNT. NBR 13: Norma Regulamentadora de Segurança e Saúde no Trabalho em Caldeiras, Vasos de Pressão, Tubulações e Tanques Metálicos de Armazenamento**. 1978.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT. NBR 6922- Carvão vegetal - Ensaio físico - Determinação da massa específica - Densidade a granel**. 1981.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS -**ABNT. NBR 8112 - Carvão vegetal: análise imediata** . 1986.

BACKES, D. A. P.; Silva, F. A.; Sousa, D. F.; Amorim, J. L. P.; Lopes, E. O. **Inovação sustentável do coco verde na agroindústria**. In: ENCONTRO INTERNACIONAL SOBRE GESTÃO EMPRESARIAL E MEIO AMBIENTE, 17., 2015, São Paulo. Anais [...]. São Paulo: Engema, 2015. p. 1-13. Disponível em: <http://engemausp.submissao.com.br/17/anais/arquivos/270.pdf>.

BARBOSA, R.L., SILVA, F.M., SALVADOR, N. & VOLPATO, C. E. S. **Desempenho comparativo de um motor de ciclo diesel utilizando diesel e misturas de biodiesel**. Ciênc. agrotec., 32, 5, p. 1588-1593, 2008.

BENASSI, A. C.; RUGGIERO, C.; MARTINS, A. B. G.; SILVA, J. A. A. da. **Caracterização biométrica de frutos de coqueiro, Cocos nucifera L. variedade anã-verde, em diferentes estádios de desenvolvimento**. Revista Brasileira de Fruticultura, [S.L.], v. 29, n. 2, p. 302-307, ago. 2007. FapUNIFESP (SciELO).

BENASSI, A. C. **O cultivo do coqueiro-anão-verde : tecnologias de produção / Antonio Carlos Benassi; César José Fanton; Enilton Nascimento de Santana**. - Vitória, ES : Incaper, 2013. 120 p. il. (Incaper. Documentos, 227).

BONAMONE, M. DE B.; Gonçalves, M. F. S.; Lima, C. V. H.; Barbosa, F. B. M. H. **Logística Reversa do Resíduo de Coco Verde- Uma abordagem sobre possibilidades de Reaproveitamento**. Revista LOGS: Logística e Operações Globais Sustentáveis, vol. 1, n.o 1, 2019.

BRAINER, M. S. de C. P. **Coco: Produção e Mercado**. Caderno Setorial Etene, Fortaleza, v. 206, n. 6, p. 1-13, dez. 2021.

BRASIL. Departamento Nacional de Obras Contra As Secas. Ministério da Integração e Desenvolvimento (org.). **Perímetro Irrigado de São Gonçalo, na Paraíba, produz mais de 1 milhão de cocos por mês**. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/dnocs/pt-br/assuntos/noticias/perimetro-irrigado-de-sao-goncalo-na-paraiba-produz-mais-de-1-milhao-de-cocos-por-mes>. Acesso em: 21 maio 2023.

BRASIL. Lei n. 12.305 de 2012- **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos**;

altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília DF, 03 ago. 2010. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03\\_ato2007-2010/lei/l12305.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03_ato2007-2010/lei/l12305.htm). Acesso em: 21 maio 2023.

BRASIL. Portaria Nº 3.214, de 08 de junho de 1978. **Instituição das Normas Regulamentadoras**, Brasília,DF, 06 Jul 1978.

CABRAL, M. M. S.; Abud, K. de S. A.; Silva, C. E. de F.; Almeida, R. M. R. G. **Bioethanol production from coconut husk fiber**. *Ciência Rural*, [S.L.], v. 46, n. 10, p. 1872-1877, out. 2016. FapUNIFESP (SciELO).

CAVALCANTE, L. V. **Perímetro Irrigado Curu- Paraipaba (CE): Histórico Produtivo e Dinâmicas Territorias**. *Revista da Casa da Geografia de Sobral (RCGS)*, [S. l.], v. 17, n. 3, p. 79–95, 2015. Disponível em: [//rcgs.uvanet.br/index.php/RCGS/article/view/246](http://rcgs.uvanet.br/index.php/RCGS/article/view/246). Acesso em: 12 abr. 2023.

CAVALCANTE, L. V. **Os Circuitos Espaciais da Produção de Coco no Litoral Oeste do Ceará**. *Caminhos de Geografia*, Uberlândia, v. 17, n. 57, p. 41–58, 2016. DOI: 10.14393/RCG175703. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/view/30673>. Acesso em: 27 maio. 2023.

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

CERON, Luciano Peske. **Controle do excesso de ar em processos de combustão**. *Revista Meio Filtrante*, v. 44, p. 40-46, 2010.

CHILD, R. **Coconuts**. London: Longman, 1974

CORTEZ, L. A. B.; Perez, J. M. M.; Rocha, J. D.; Jordan, R. A.; Mesa, H. R. M. **Processamento de Casca e Fibra de Coco Verde por Carbonização para Agregação de Valor**. *Bioeng*, Campinas, v. 3, n. 1, p. 21-30, jun. 2009.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. (Org.). **Biomassa: para energia**. Campinas: Ed. UNICAMP, 2009. 734 p.

CUENCA, M. A. G.; Martins, C. A.; Jesus Junior L. A. de. **Coco: Estatística da produção**. Embrapa, 8 dez. 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/coco/pre-producao/importancia-socioeconomica/estatistica-da-producao>. Acesso em: 17 maio 2023.

DEMIRBAS, A. Combustion characteristics of different biomass fuels. **Progress In Energy And Combustion Science**, [S.L.], v. 30, n. 2, p. 219-230, 2004. Elsevier BV.

DIAS, B.C. **Subsídio ao grupo de trabalho para elaboração de diretrizes da política nacional de coco (Cocos nucifera L.)**. Maceió: CEPLAC, 1980. 15p.

EMBRAPA. **Tecnologia para o aproveitamento da casca de coco verde é mostrada na Amazontech**. 2004. Disponível em: <http://www.embrapa.gov.br/imprensa/noticias/2004/agosto/bn.2004-11-25.2909531514/>, Acesso em: 17 junho 2023.

EPE. **Papel da Biomassa na Expansão da Geração de Energia Elétrica**. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética - Epe, 2018. 26 p. Documento de Apoio ao PNE 2050.

EPE – Empresa de Pesquisas Energéticas; **Balço Energético Nacional 2019, ano base 2018**; Rio de Janeiro: EPE, 2019, 292p.

EPE. **Matriz Energética e Elétrica**. 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 21 maio 2023.

FAO. Countries by commodity. Rome, Italy: **Food & Agriculture Organization of the United Nations (FAO)**, 2023. Disponível: [https://www.fao.org/faostat/en/#rankings/countries\\_by\\_commodity](https://www.fao.org/faostat/en/#rankings/countries_by_commodity). Acesso em: 17/06/2023

FERREIRA NETO, M.; HOLANDA, J. S.; FOLEGATTI, M. V.; GHEYI, H. R.; PEREIRA, W. E.; CAVALCANTE, L. F. **Qualidade do fruto do coqueiro anão verde em função de nitrogênio e potássio na fertirrigação**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 11, n. 5, set./out., 2007.

FERREIRA, J.M.S.; WARWICK, D.R.N.; SIQUEIRA.; L.A. **A cultura do coqueiro no Brasil**. 2. ed. Brasília: EMBRAPA-SPI, 1998. 292 p

FERRI, M.G. **Botânica: Morfologia externa das Plantas (organografia)**. São Paulo: Melhoramento, 1973.

FERRI, M. G.; MENEZES, N. L. de; MONTEIRO, W. R. **Glossário ilustrado de botânica**. Departamento de Botânica da USP. São Paulo: Nobel. 1981.

FIGUEIREDO, A. L. **Pirólise termoquímica de pós da fibra de coco seco em um reator de cilindro rotativo para produção de bio-óleo**. 2011. 113 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência e Engenharia do Petróleo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.

FIMACO. **Energia e biomassa** - Fimaco. Disponível em: <https://fimaco.com.br/produtos/energia-biomassa/>2019. Acesso em: 10 jul. 2023.

FRANCISCO, R. P. **Estudo Termoquímico da Queima de Combustíveis em Caldeiras Usando Balços de Energia**. 2012. 148 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Energia, Universidade Federal de São João del Rei, São João del Rei, 2012. Disponível em: [https://www.ufsj.edu.br/portal2-repositorio/file/mestradoenergia/Dissertacoes/2009/Rodrigo\\_Perreira\\_Francisco.pdf](https://www.ufsj.edu.br/portal2-repositorio/file/mestradoenergia/Dissertacoes/2009/Rodrigo_Perreira_Francisco.pdf). Acesso em: 07 maio 2023.

FONTES, H. R.; FERREIRA, J. M. S. **A cultura do coqueiro** / [Humberto Rollemberg Fontes, Joana Maria Santos Ferreira]. — Brasília, DF : Embrapa Informação Tecnológica, 2006. 101 p. il. color. — (Coleção Plantar, 48).

FONTES, H. R.; NUNES, M. U. C.; COSTA, E. N.; RIBEIRO, F.E., Revista Campos & Negócios Online. **Cultivo de coco**. Uberlândia: Revista Campos & Negócios, 2021. Disponível em: <https://revistacampoenegocios.com.br/cultivo-de-coco/>. Acesso em: 17 jun. 2023.

GENOVESE, A. L.; UDAETA, M. E. M.; GALVAO, L. C. R.. **Aspectos energéticos da biomassa como recurso no Brasil e no mundo..** In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 6., 2006, Campinas. Proceedings online... Available from: <[http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=MSC0000000022006000100021&lng=en&nrm=abn](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022006000100021&lng=en&nrm=abn)>.

GOLDEMBERG, J. **Biomassa e energia**. Química Nova, São Paulo - Sp, Brasil, v. 32, n. 3, p. 582-587, 2009. FapUNIFESP (SciELO).

IBGE. **Produção Agrícola Municipal**. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pam/tabelas>. Acesso em: 08 mai. 2023a.

IBGE. **Produção de Coco-da-baía**. 2023. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística-IBGE. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/coco-da-baia/ce>. Acesso em: 11 abr. 2023b.

KAREKEZI, S.; LATA, K. ; COELHO, S . **Traditional Biomass Energy: Improving its Use and Moving to Modern Energy Use**. In: Renewables 2004 - International Conference for Renewable Energies, Thematic Background Papers, Bonn, 2004.

LORA, E. E. S.; ANDRADE, R. V.; ÁNGEL, J. D. M.; LEITE, M. A. H.; ROCHA, M. H.; SALES, C. A. V. B.; MENDONZA, M. A. G.; CORAL, D. D. S. O. (2012). **Gaseificação e pirólise para a conversão da biomassa em eletricidade e biocombustíveis**. *Biocombustíveis. Interciência*, 1, 411-498.

MARCELINO, M. M. **Biomassa Residual do Coco para Obtenção de Energia e Intermediários Químicos via Gaseificação: Caracterização, modelagem e simulação**. 2017. 87 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Industrial, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2017.

MARTÍNEZ, J. D.; LORA, E. E. S.; ANDRADE, R. V.; JAÉN, R. L. **Experimental study on biomass gasification in a double air stage downdraft reactor**. *Biomass And Bioenergy*, [S.L.], v. 35, n. 8, p. 3465-3480, ago. 2011. Elsevier BV.

MARTINS, C. R., JESUS JÚNIOR, L. A. de. **Produção e comercialização de coco no Brasil frente ao comércio internacional: panorama 2014**. Aracaju. Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2014. 51 p.

McKENDRY, P. **Energy production from biomass (part 3): Gasification Technologies**. *Bioresource Technology* 83 (2002) 55–63

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

MOSCATO, A. L. S. **Análise exergética de uma caldeira de biomassa utilizando redes neurais artificiais**. 2019. 114f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, 2019.

Nações Unidas Brasil (org.). **Sobre o nosso trabalho para alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil**. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 01 maio 2023.

NUNES, M. U. C.; SANTOS, J. R.; SANTOS, T. C. **Tecnologia para Biodegradação da Casca de Coco Seco e de Outros Resíduos do Coqueiro**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2007. 5 p. (Embrapa Tabuleiros Costeiros. Circular Técnica, 46)

PINTO, C. A. Q., SILVA, D. J. . P., & P.A.C. (2009). **Adubando para alta produtividade e qualidade: fruteiras tropicais do Brasil**. Fortaleza: IIP. Boletim 18-Embrapa Agroindústria Tropical.

PINTO, S. B. Paes, L. da S.; Oliveira, A. T.; Soares, A. C.; Peixoto, A. A.; Ferreira, D. C. O. **Concepção do Uso e Desuso de Resíduos Sólidos numa Abordagem Investigativa de Cunho Social**. p. 58–77, 1 jan. 2022.

PITK, P.; KAPARAJU, P.; PALATSI, J; AFFES, R.; VILU, R. **Co-digestion of sewage sludge and sterilized solid slaughterhouse waste: Methane production efficiency and process limitations**. *Bioresource Technology*, v. 134, p. 227-232, 2013.

PORTURBIVAP, P. **Turbina a vapor de contrapressão**. 2020a. Disponível em: <<https://turbivap.com.br/turbina-a-vapor-de-contrapressao/>>. Acesso em: 14 jun. 2023.

PORTURBIVAP, P. **Turbina a vapor de condensação**. 2020b. Disponível em: <<https://turbivap.com.br/turbina-a-vapor-de-condensacao/>>. Acesso em: 14 jun. 2023.

POTTER, M. C. & SCOTT, E. P. **Ciências Térmicas: termodinâmica, mecânica dos fluidos e transmissão do calor**. São Paulo: Thomson Learning, 277p, 2007.

PURSEGLOVE, J.W. **Tropical crops monocotyledons**. 2<sup>a</sup> ed, London, 1975. 607p.

PUMPS BOMBAS. **Usinas de Ciclo Combinado**. 2023. Disponível em: <https://pumpsbombas.com/curso/curso-bombas-en-centrales-de-ciclo-combinado/leccion/centrales-termicas-de-ciclo-combinado/>. Acesso em: 21 maio 2023.

RAMOS, L. P.; SILVA, F. R. da; MANGRIC, A. S.; CORDEIRO, C. S. (2011). **Tecnologias de produção de biodiesel**. *Revista virtual de química*, 3(5), 385-405.

RENDEIRO, G. (Coord.). **Combustão e gaseificação de biomassa sólida: soluções energéticas para a Amazônia**. Brasília: 1a edição, Ministério de Minas e Energia, 2008. 193 p. (Soluções energéticas para a Amazônia).

RIBEIRO, F. E.; SIOUEIRA, E. R. de; ARAGÃO, W. M. de; TUPINAMBÁ, E. A. **O coqueiro-anão no Brasil**. Aracaju: Embrapa-CPATC. 1999. 220. EMBRAPA-CPATC. Documentos, 81.

ROSA, M. F.; SANTOS, F. J. S.; MONTENEGRO, A. A. T.; ABREU, F. A. P.; CORREIA, D.; ARAUJO, F. B. S.; NOROES, E. R. V. **Caracterização do pó da casca de coco-verde usado como substrato agrícola**. Comunicado Técnico (INFOTECA-E). Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, n. 54, p. 1-6, 2001.

ROUT, T. K. **Pyrolysis of coconut shell**. n. 211, p. 18–20, 2013.

SÁNCHEZ, C. G. (Org.). **Tecnologia da gaseificação de biomassa**. Campinas, SP: Editora Átomo, 2010. p. 189.

SANTOS, J. V. **Projeto de Planta de Geração de Potência com Ciclo Combinado Brayton-Rankine**. 2020. 86 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Física, Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: [http://cbpfindex.cbpf.br/publication\\_pdfs/dissertacaoDeMestrado\\_2021-07-21-13-36-44ZGIzc2VydGFjYW9EZU1lc3RyYWRv.pdf](http://cbpfindex.cbpf.br/publication_pdfs/dissertacaoDeMestrado_2021-07-21-13-36-44ZGIzc2VydGFjYW9EZU1lc3RyYWRv.pdf). Acesso em: 07 maio 2023.

SANTOS, F. A. dos. **Análise da aplicação da biomassa da cana como fonte de energia elétrica: Usina de açúcar, etanol e bioeletricidade**. 2012. Dissertação (Mestre em Engenharia). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

SEGUNDO, S.; DA, V. B. **Princípio de balanços termoenergéticos em caldeiras geradoras de vapor nas indústrias sucroalcooleiras**. 2014.

SILVA, A. C. **Reaproveitamento da casca de coco verde**. Revista Monografias Ambientais – REMOA, v. 13, n. 5, p. 4077- 4086, dez. 2014

SILVA, T. T.; MULDER, A. P.; SANTANA, I. **Coqueiro (Cocos nucifera L.) e produtos alimentícios derivados: Uma revisão sobre aspectos de produção, tecnológicos e nutricionais**. 82 Tecnologia de Alimentos: Tópicos Físicos, Químicos e Biológicos, 2016.

SIQUEIRA, L. A.; ARAGÃO, W. M.; TUPINAMBÁ, E. A. **A introdução do coqueiro no Brasil, importância histórica e agrônômica**. Aracaju. EMBRAPA Tabuleiros Costeiros. 2002.24p. (Embrapa Tabuleiros Costeiros, Documento 47).

SOLIDDA, ENERGIA. **Turbinas e microturbinas: energia limpa**. Catálogo de produtos, 2017.

SOUZA, Samuel N. M. de, SORDI, Alexandre e OLIVA, Carlos A. **Potencial de energia primária de resíduos vegetais no Paraná**. 4º Encontro de Energia no Meio Rural.. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 4., 2002, Campinas. Anais eletrônicos... Disponível em: [http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=MSC000000022002000200042&lng=pt&nrm=abn](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC000000022002000200042&lng=pt&nrm=abn).

SOUZA, O. P.; MELO, B.; MANCIN, C. A. **Cultura do Coqueiro**. Núcleo de Fruticultura - Universidade Federal de Uberlândia, 2003. Disponível em: <<http://www.fruticultura.iciag.ufu.br/coqueiro.html>>. Acesso em: 17 jun. 2023.

SOUZA, D. R. de; Gadelha, A. M. T.; Rios, M. A. de S.; Toneli, J. T. de C. L.; Antonio, G. C. **Comparativo da Análise Elementar de Casca de Coco Babaçu e Castanha de Caju**. In: CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA, 76., 2019, Palmas. Anais [...]. Palmas: Spea, 2019. p. 01-05.

SOARES, C. M. T.; FEIDEN, A.; TAVARES, S. G. **Fatores que influenciam o processo de digestão anaeróbica na produção de biogás**. *Nativa*, [S. l.], v. 5, n. 7, p. 522–528, 2018. Disponível em: <https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/nativa/article/view/5155>.

TOGAWA, V. **Os Principais Tipos de Caldeiras**. Disponível em: <<https://togawaengenharia.com.br/blog/os-principais-tipos-de-caldeiras/>>. Acesso em: 06 jul. 2023.

TOLMASQUIM, M. T. Alternativas energéticas sustentáveis no Brasil. 1. ed. Rio de Janeiro: Relume-Dumará, 488 p., 2004.

VASCONCELOS, S. J. de. **Dicionário de termos técnicos de botânica**. Escola de Agricultura São Bento. Recife, 1945.

VASCONCELOS, H. E. M.; MOTA, D. M.; ARAÚJO, J. B. C. (2010). **Sustentabilidade de sistemas de produção irrigados para agricultura familiar: um desafio para os colonos do Projeto Curu Paraipaba**. Congresso da Sociedade Brasileira de Sistemas de Produção <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/871700/1/p657.pdf>

VASCONCELOS, T. S. L.; LIMA, L. C. (2015). **Perímetro irrigado curu-paraipaba: Colonos, normatizações e tensionalidades**. *Revista da Casa da Geografia de Sobral*, ISSN-e 1516-7712, Vol. 17, Nº. 3, 2015 <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5301281.pdf>

VIEIRA, G. E. G.; NUNES, A. P.; TEIXEIRA, L. F.; COLEN, A. G. N. **Biomassa: uma visão dos processos de pirólise**. *Revista Liberato*, [S. l.], v. 15, n. 24, p. 167–178, 2014. Disponível em: <http://old.liberato.com.br/index.php/revista/article/view/319>.

WADT. **Avaliação de divergência genética em coqueiro (cocos nucifera) usando marcadores RAPD em amostras de plantas individuais ou compostas**. 1997.109f. Tese. Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias - Universidade Estadual do Norte Fluminense. Rio de Janeiro.

WERTHER, J.; SAENGER, M.; HARTGE, EU; OGADA, T.; e SIAGI, Z. (2000) **Combustão de Resíduos Agrícolas**. *Progress in Energy and Combustion Science*, 26, 1-27.