

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO – ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

LEONARDO AUGUSTO FERRARESI BASSI

**Análise exergética e ambiental da substituição de carvão mineral por
biomassa em centrais termelétricas no Brasil**

São Paulo - SP
2024

LEONARDO AUGUSTO FERRARESI BASSI

**Análise exergética e ambiental da substituição de carvão mineral por
biomassa em centrais termelétricas no Brasil**

Versão Corrigida

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de Mestre
em Ciências.

Área de concentração: Engenharia
Mecânica - Energia e Fluidos

Orientador:
Prof. Dr. Silvio de Oliveira Junior

São Paulo - SP
2024

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Bassi, Leonardo Augusto Ferraresi

Análise exergética e ambiental da substituição de carvão mineral por biomassa em centrais termelétricas no Brasil / L. A. F. Bassi -- versão corr. -- São Paulo, 2024.

82 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1.Biomassa 2.Carvão 3.Termelétricas 4.Exergia I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.

AGRADECIMENTOS

À Escola Politécnica da USP pelo acolhimento em mais esta passagem.

Ao Prof. Silvio de Oliveira Junior, meu orientador, pela incrível paciência, presença sempre cordial e palavras encorajadoras.

Aos mestres e amigos da empresa Figener Engenheiros Associados por oferecerem tantas oportunidades, ensinamentos e por me ajudarem a encontrar um norte em minha vida profissional. Um aceno especial ao amigo Caio Joppert por todo o suporte e por ser referência de qualidade e empenho naquilo que faz.

Agradeço imensamente à minha mãe e ao meu pai pelo apoio incondicional, pelas palavras amorosas, inteligentes e por mais uma vez serem fundamentais na minha jornada.

Ao meu irmão, Gustavo, por estar ao meu lado e ser tão compreensivo e generoso no momento mais decisivo deste processo.

À Bárbara por todo o amor, cumplicidade e por tolerar tantas ausências e inquietações, sem nunca deixar de ser uma pessoa doce e brilhante nas suas próprias conquistas.

RESUMO

BASSI, L. A. F. **Análise exergética e ambiental da substituição de carvão mineral por biomassa em centrais termelétricas no Brasil.** 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica: Ênfase em Energia e Fluidos) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024.

Na última década, o consumo de biomassa sólida vegetal para fins de geração elétrica apresentou crescimento significativo, especialmente na União Europeia, como parte do plano de reduzir as emissões de gases de efeito estufa através da substituição gradativa de combustíveis fósseis, como o carvão mineral, por fontes renováveis de energia. A pertinência da biomassa neste plano se dá principalmente por prover a previsibilidade apropriada para geração de base, em complemento às fontes renováveis intermitentes, como solar e eólica, e por compartilhar características com o carvão mineral que permitam a adaptação das centrais termelétricas a carvão para sua queima. No Brasil, embora a queima de carvão em centrais termelétricas ainda ocorra, é iminente a demanda ambiental por sua substituição por fontes menos poluentes e grandes instituições financiadoras já se posicionam contra o fomento de negócios atrelados ao carvão, aumentando a pressão sobre os grandes consumidores existentes. Este trabalho propõe identificar e modelar os ciclos de geração de eletricidade a partir do carvão mineral e comparar seu desempenho ao de diferentes tipos de biomassa disponíveis no Brasil - derivados de eucalipto, serragem e caroço de açaí - candidatos à substituição do carvão em grande escala. O trabalho permite avaliar os impactos técnicos e ambientais entre persistir no uso do carvão mineral nas centrais termelétricas existentes, entendendo nestes casos quais reformas são necessárias para que as emissões atmosféricas sejam mantidas dentro dos novos limites, ou então substituí-lo por biomassa. São utilizadas as abordagens energética e exergética para avaliar a eficiência de todo o ciclo de vida destes combustíveis, possibilitando identificar as etapas do ciclo de vida mais influentes sob os aspectos de consumo energético e de emissões de CO₂e. As conclusões indicam que, apesar de o desempenho energético da biomassa tender a ser inferior ao do carvão, em consequência principalmente do elevado consumo de energia em etapas de processamento e transporte da biomassa, em contrapartida seu desempenho ambiental revela vantagem significativa, reduzindo quase na totalidade as emissões de CO₂e na etapa de queima. A elevada disponibilidade de biomassa no país deve se mostrar instrumento de alto impacto para viabilizar a limitação do carvão da matriz elétrica brasileira e o cumprimento das novas metas ambientais.

Palavras-chave: biomassa, carvão, termelétricas, exergia

ABSTRACT

BASSI, L. A. F. **Exergy and environmental analysis of the substitution of coal for biomass in thermal power plants in Brazil.** 2024. MSc Thesis – Polytechnic School, University of São Paulo, São Paulo, 2024.

In the last decade, vegetal biomass consumption for electricity generation purposes presented significant growth, especially in the European Union, as part of the plan to reduce greenhouse gas emissions through the gradual substitution of fossil fuels, such as mineral coal, for renewable energy sources. Biomass is pertinent in this plan due to its predictability as a baseload energy source, in complement to intermittent renewable energy sources, such as solar and wind energy, and it shares characteristics with coal that allow the adaptation of coal-based thermal power plants for biomass burning. In Brazil, although coal burning still occurs in thermal power plants, the environmental demand is imminent to substitute coal for less polluting sources and large financial institutions already take a stand against coal investments, rising the pressure over existing consumers. This paper aims to identify and model coal-based power generation cycles and compare its performance to that of different types of biomasses available in Brazil – derivatives of wood, sawdust, açai stones – which are candidates to substitute coal in large scale. Technical and environmental impacts will be assessed both for upgrading existing coal power plants in order to conform atmospheric emissions to new standards and for substituting coal for biomass. Energy and exergy approaches are used to assess the full life cycle efficiency of these fuels, with a focus on the fuel combustion for steam generation, enabling the identification of inefficiencies and the selection of the most interesting operational opportunities. The conclusions show that, despite of the energy performance of biomass being usually lower than the performance of coal, mainly in consequence of the high energy consumption of processing and transporting the biomass, as a counterpart its environmental performance is highly advantageous, drastically reducing CO₂ eq. emissions in the combustion process. The availability and efficient use of biomass might be instruments of high impact to motivate the limitation of coal in the Brazilian electric matrix and the meeting of new environmental goals.

Keywords: biomass, coal, thermal power plants, exergy

LISTA DE ABREVIATURAS

ACV	Análise de Ciclo de Vida
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BEN	Balanço Energético Nacional
CAA	Caroço de Açaí
CAR	Carvão
CVC	Cavaco de Eucalipto
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
DS	Dessuperaquecedor
GEE	Gases de Efeito Estufa
GNL	Gás natural liquefeito
PEL	Pellets de eucalipto
SER	Serragem de eucalipto
TGV	Turbogerador a Vapor

LISTA DE SÍMBOLOS

SÍMBOLOS

b [kJ/kg]	Exergia específica
\dot{B} [kW]	Taxa de exergia
\dot{F} [kW]	Aporte energético na forma de combustível
h [kJ/kg]	Entalpia específica
\dot{m} [kg/s]	Fluxo mássico
M [g/mol]	Massa molar
PCI [kJ/kg]	Poder calorífico inferior
\dot{Q} [kW]	Taxa de calor
s [kJ/kg K]	Entropia específica
T_0 [K]	Temperatura ambiente
\dot{W} [kW]	Potência líquida gerada no ciclo
x [Ad.]	Fração mássica

SÍMBOLOS GREGOS

η [Ad.]	Rendimento
Δ [Ad.]	Varição

SUBSCRITOS

b	Exergético
bio	Biomassa
C	Relativo ao carbono
car	Carvão
comb	Combustível
cz	Cinzas
e	Energético
f	Física
CO_2	Relativo ao dióxido de carbono
$CO_2 e$	Dióxido de carbono equivalente
$CO_2 biogênico$	Dióxido de carbono biogênico
H_2	Relativo ao hidrogênio
H_2O	Relativo à água
N_2	Relativo ao nitrogênio
O_2	Relativo ao oxigênio
q	Química
rep	Reposição (make-up)
S	Relativo ao enxofre

u	Útil
vap	Vapor
w	<i>Water</i> (umidade)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1 - Limites históricos de emissões de SO _x em usinas a carvão na Europa, em mg/Nm ³ , e os limites BREF em 2017 (180 a 320 mg/Nm ³).....	12
Figura 1-2 - Limites históricos de emissões de NO _x em usinas a carvão na Europa, em mg/Nm ³ , e os limites BREF em 2017 (150 a 175 mg/Nm ³).....	13
Figura 2-1 - Matriz Elétrica Brasileira em 2022.....	15
Figura 2-2 - Mapa de localização das instalações de geração termelétrica baseadas em carvão.	17
Figura 2-3 - Mapa de localização das usinas termelétricas baseadas em carvão na Europa, em 2016.....	19
Figura 2-4 - Vista aérea da usina termelétrica Drax, em North Yorkshire, na Inglaterra.....	20
Figura 2-5 - Esquema simplificado de uma usina termelétrica de ciclo Rankine.....	22
Figura 2-6 - Esquema simplificado de usina termelétrica a carvão pulverizado.....	23
Figura 2-7 - Comparação entre tipos de fornalha para queima de carvão.	27
Figura 2-8 – Principais itens observados em projeto de conversão de carvão para biomassa.....	28
Figura 2-9 - Áreas potenciais para produção de pellets a partir de florestas energéticas.....	29
Figura 2-10 – Evolução da produção mundial de pellets.	31
Figura 2-11 - Estimativa da demanda de pellets de madeira, realizada em 2020, para o mercado industrial.	31
Figura 2-12 - Mapa de distribuição do potencial de energia primária da palha de soja no território brasileiro	34
Figura 2-13 – Mapa de distribuição do potencial de energia primária da palha de arroz no território brasileiro	34
Figura 3-1 – Fluxograma simplificado do ciclo típico das usinas termelétricas.	39
Figura 3-2 – Fluxograma simplificado do ciclo típico das centrais de cogeração.....	40
Figura 3-3 – Fluxos e fronteiras do ciclo de vida dos combustíveis.	45
Figura 3-4 Modelo da rota tecnológica do carvão mineral consumido em centrais termelétricas existentes.	49
Figura 3-5 - Modelo da rota tecnológica do cavaco de eucalipto.	50
Figura 3-6 - Modelo da rota tecnológica do pellet de eucalipto.	50
Figura 3-7 - Etapas de processamento do pellet de eucalipto.....	52
Figura 3-8 Rota tecnológica de resíduos: Serragem	53
Figura 3-9 Rota tecnológica de resíduos: Carço de Açai	53
Figura 3-10 – Comparação de fluxos de calor entre caldeiras a carvão de leito fluidizado (LF) e de queima pulverizada (QP).....	55
Figura 4-1 – Análise comparativa entre os ciclos de vida dos combustíveis: consumo de energia específica e emissões de CO _{2e}	65
Figura 4-2 – Diagrama de Grassmann para os fluxos de exergia do cenário de Cogeração, em caldeira QP, com queima exclusiva de carvão.	73
Figura 4-3 – Diagrama de Grassmann para os fluxos de exergia do cenário de Cogeração, em caldeira QP, com queima exclusiva de pellets de eucalipto.	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Lista de instalações de geração termelétrica baseadas em carvão mineral.	16
Tabela 2.2 - Limites de emissões atmosféricas a partir da combustão externa de carvão mineral.	18
Tabela 2.3 - Comparativo de desempenho e custos de tecnologias de abatimento de poluentes.	25
Tabela 2.4 - Propriedades do carvão e biomassa.	26
Tabela 2.5 - Produção madeireira anual e potencial de geração de resíduos nos 10 municípios com maior potencial, nos 5 estados brasileiros com maior potencial.	32
Tabela 2.6 – Potencial de energia primária nas regiões do Brasil por resíduo agrícola.	33
Tabela 3.1 Principais parâmetros de operação para as configurações de Cogeração e Geração Pura	41
Tabela 3.2 Cenários selecionados para análise.	42
Tabela 3.3 Composições elementares dos combustíveis selecionados (frações mássicas em base seca)...	46
Tabela 3.4 - PCI e exergia química para os combustíveis selecionados.	46
Tabela 3.5 – Energia e emissões de CO ₂ nas etapas do ciclo de vida do cavaco de eucalipto, para cada tonelada de combustível.....	54
Tabela 3.6 – Principais conversões de caldeiras a carvão para biomassa.	55
Tabela 3.7 – Características das cinzas de tipos diversos de biomassa.....	57
Tabela 4.1 – Energia e emissões de CO ₂ nas etapas do ciclo de vida do carvão mineral, para cada tonelada de combustível.	59
Tabela 4.2 – Energia e emissões de CO ₂ nas etapas do ciclo de vida do cavaco de eucalipto, para cada tonelada de combustível.....	60
Tabela 4.3 – Energia e emissões de CO ₂ nas etapas do ciclo de vida dos pellets de eucalipto, para cada tonelada de combustível.....	61
Tabela 4.4 – Energia e emissões de CO ₂ nas etapas do ciclo de vida da serragem de eucalipto, para cada tonelada de combustível.....	62
Tabela 4.5 – Energia e emissões de CO ₂ nas etapas do ciclo de vida do caroço de açaí, para cada tonelada de combustível.	63
Tabela 4.6 – Energia e emissões de CO ₂ nas etapas do ciclo de vida dos combustíveis avaliados, por cada insumo consumido.....	64
Tabela 4.7 – Energia e emissões de CO ₂ nas etapas do ciclo de vida dos combustíveis avaliados, por cada etapa do Ciclo de Vida.	64
Tabela 4.8 - Consumo de combustíveis e rendimentos para cada configuração – Caldeiras de Queima Pulverizada (QP) e Leito Fluidizado (LF) em central de Cogeração.....	67
Tabela 4.9 - Consumo de combustíveis e rendimentos para cada configuração – Caldeira de Queima Pulverizada (QP) em central de Geração Pura.....	68
Tabela 4.10 – Consolidação dos resultados de Ciclo de Vida e Conversão Energética para cada configuração – Central de Cogeração.....	70
Tabela 4.11 – Consolidação dos resultados de Ciclo de Vida e Conversão Energética para cada configuração – Central de Geração Pura.....	71

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	CONTEXTO	12
1.2	OBJETIVO	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	PRESENÇA DO CARVÃO MINERAL NO BRASIL PARA GERAÇÃO ELÉTRICA	15
2.2	CASO EUROPEU	19
2.3	ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS	21
2.3.1	Cenário Base	21
2.3.2	Continuidade do carvão	23
2.3.3	Substituição do carvão	25
2.4	POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOMASSA NO BRASIL	28
2.4.1	Cavaco e Pellets de Eucalipto	28
2.4.2	Serragem	32
2.4.3	Caroço de Açai	32
2.4.4	Palha	33
2.5	ANÁLISE DO CICLO DE VIDA	36
3	METODOLOGIA	38
3.1	MATERIAIS E PROCEDIMENTOS DE PESQUISA	38
3.2	CONFIGURAÇÕES DE CENTRAIS TERMELÉTRICAS	38
3.2.1	Usinas Termelétricas (Geração Pura)	38
3.2.2	Centrais de Cogeração	39
3.2.3	Principais premissas	41
3.2.4	Cenário selecionados	42
3.3	ANÁLISE EXERGÉTICA	43
3.4	CARACTERIZAÇÃO DOS COMBUSTÍVEIS	45
3.5	CÁLCULO DE EMISSÕES	47
3.6	CICLO DE VIDA	48
3.6.1	Rota Tecnológica do Carvão Mineral	48
3.6.2	Rota Tecnológica do Cavaco e Pellets de Eucalipto	50
3.6.3	Rotas Tecnológicas da Serragem e Caroço de Açai	53
3.7	IMPACTOS NAS CALDEIRAS	54
3.7.1	Comparação entre Modelos	54
3.7.2	Histórico de Conversões	55
3.7.3	Cinzas	56
4	RESULTADOS	58
4.1	CICLO DE VIDA	58
4.1.1	Desempenho do Carvão Mineral	58
4.1.2	Desempenho do Cavaco e Pellets de Eucalipto	60
4.1.3	Desempenho da Serragem e Caroço de Açai	62
4.1.4	Análise Comparativa	63
4.2	CONVERSÃO ENERGÉTICA	66
4.3	CONSOLIDAÇÃO DOS RESULTADOS	69
5	CONCLUSÕES	74
5.1	TRABALHOS FUTUROS	75
6	REFERÊNCIAS	76

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto

As mudanças climáticas provocadas pelo consumo de combustíveis fósseis têm incentivado esforços ambiciosos em todo o mundo, especialmente da União Europeia (UE), para reduzir as emissões de gases de efeito estufa até 2030, através da substituição gradativa de combustíveis fósseis por fontes renováveis de energia.

Neste contexto, desde 2010 o consumo de biomassa na UE apresentou crescimento significativo, em função de políticas que visam à redução da dependência dos combustíveis fósseis. Diversos países da União Europeia têm promovido a substituição gradativa de combustíveis fósseis por fontes alternativas e renováveis de energia, como a biomassa sólida vegetal, principalmente em função de sua característica apropriada para geração de base, em complemento às fontes renováveis intermitentes, como solar e eólica. No relatório COM (2010), estimou-se que provavelmente a maior contribuição para o aumento do desenvolvimento da bioenergia provirá da biomassa sólida, fato que foi ratificado em 2015 na COP 21 em Paris.

Entretanto, ainda há países da UE que não conseguiram, até esta data, atingir as metas de redução de emissões, por conta do uso do carvão das usinas termelétricas. Grandes instalações na UE deverão atender a limites de emissões atmosféricas mais restritivos impostos pelos BREF – *Best Available Techniques Reference Documents* - até 2022. A Figura 1-1 e Figura 1-2 comparam o histórico de emissões de SOx e NOx em instalações europeias com os novos limites introduzidos pelos BREF (IEEFA, 2017). Da amostra de 600 instalações baseadas em combustíveis sólidos com potência térmica superior a 50 MW, mais de 43% estão em não conformidade com os novos limites de SOx (180-320 mg/Nm³) e 69% foram consideradas em não conformidade com os novos limites de emissão de NOx (150-175 mg/Nm³).

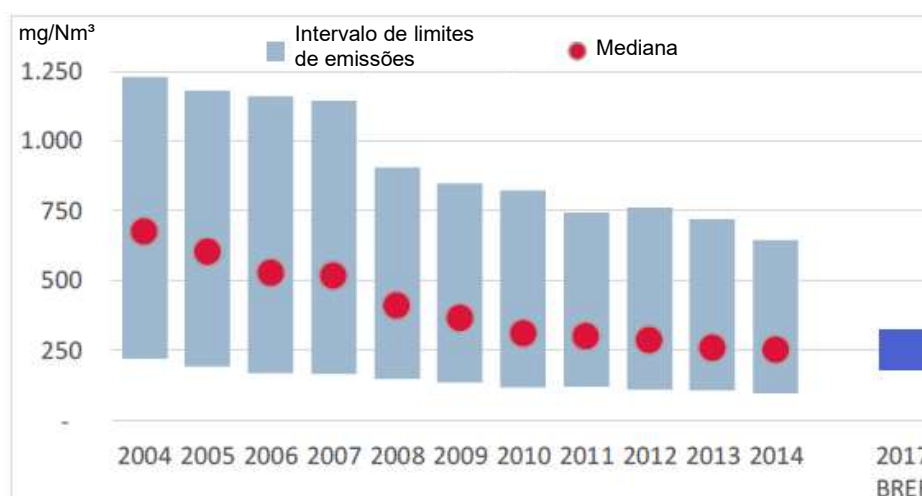


Figura 1-1 - Limites históricos de emissões de SOx em usinas a carvão na Europa, em mg/Nm³, e os limites BREF em 2017 (180 a 320 mg/Nm³). Fonte: Adaptado de IEEFA, 2017.

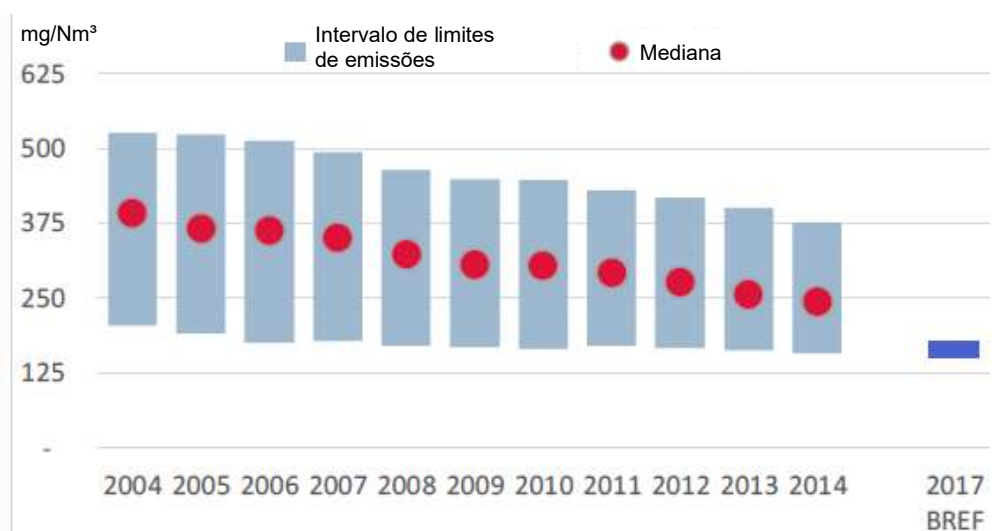


Figura 1-2 - Limites históricos de emissões de NOx em usinas a carvão na Europa, em mg/Nm³, e os limites BREF em 2017 (150 a 175 mg/Nm³). Fonte: Adaptado de IEEFA, 2017.

Para adequação aos novos limites de emissões, países como Reino Unido e Alemanha estão incentivando o uso de biomassa para geração de energia, tanto na geração de eletricidade quanto no setor residencial. A Alemanha utilizou terras em Madagascar para a produção de eucalipto para pellets como meio complementar de atingir redução de emissões além de fontes renováveis intermitentes como solar e eólica (GTZ, 2009). No Reino Unido, a Drax é uma das maiores geradoras de energia, tendo 4,0 GW de potência instalada, originalmente a carvão. Deste total, cerca de 2,6 GW já foram convertidos para queimar total ou parcialmente pellets de madeira, que são importados majoritariamente dos EUA (DRAX, 2018).

A substituição de carvão por biomassa é uma alternativa à reforma das usinas existentes a carvão para controle das emissões atmosféricas, que tende a ser uma solução pouco interessante financeiramente, ou mesmo ao seu desligamento, como tem ocorrido em grande número de usinas na Europa. Nos casos mais críticos, os investimentos necessários para sistemas de abatimento de NOx e SOx são proibitivos, obrigando estas instalações a fecharem (IEEFA, 2017).

Por compartilhar características de combustível sólido com o carvão mineral, as centrais termelétricas a carvão no Brasil também podem ser adaptadas para armazenamento e queima de biomassa, a exemplo da Drax, no Reino Unido, citada anteriormente, e a aplicação deste insumo no setor nacional de geração termelétrica seria de grande impacto ambiental. Embora o carvão mineral represente fração pequena da matriz energética brasileira, seu método de geração é o responsável pela maior emissão de CO₂ proporcionalmente ao MWh de eletricidade gerada (FLÓREZ-ORREGO et. al., 2014).

1.2 Objetivo

O objetivo deste trabalho é comparar os processos de geração de energia elétrica a partir de carvão mineral e tipos diversos de biomassa, de modo a identificar e quantificar os potenciais de utilização de biomassa como fonte energética em substituição ao carvão mineral. Esta análise utilizará os conceitos de eficiência exergética e análise de ciclo de vida para avaliar o desempenho das rotas tecnológicas de cada combustível, além de calcular as emissões de gases de efeito estufa resultantes destes processos. O estudo leva em conta ainda que estes processos deverão respeitar critérios ambientais mais rigorosos no Brasil nos próximos anos, portanto exigindo adaptação tecnológica das centrais termelétricas a carvão existentes para atendimento de limites menores de taxas de emissão atmosférica.

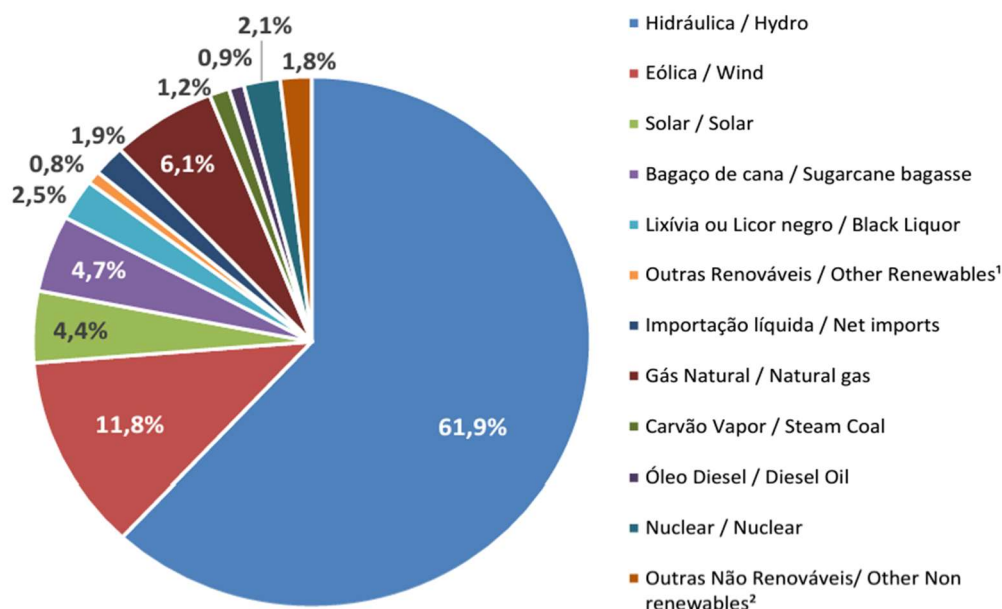
O trabalho aborda os impactos técnicos e ambientais entre persistir no uso do carvão mineral nas centrais termelétricas existentes, avaliando nestes casos quais cenários são mais favoráveis para que as emissões atmosféricas sejam mantidas dentro de limites previstos para os próximos anos, ou então substituí-lo por biomassa, reconhecendo que o Brasil tem potencial para produzi-los internamente em escala significativa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados os levantamentos do cenário atual de uso de carvão para fins de geração elétrica no Brasil, o precedente europeu das iniciativas de eliminação do carvão de sua matriz energética e potenciais soluções disponíveis no Brasil para sua substituição. Por fim, trata-se de como a abordagem de Análise de Ciclo de Vida já foi aplicada em trabalhos anteriores para avaliações da mesma natureza que se pretende fazer neste trabalho, simulando os impactos da substituição de carvão em toda a cadeia produtiva do combustível.

2.1 Presença do Carvão Mineral no Brasil para Geração Elétrica

Quando se analisa a matriz elétrica brasileira, nota-se que o carvão mineral possui baixa participação, como ilustra o diagrama na Figura 2-1. A participação indicada de 1,2% para carvão vapor representou oferta de cerca de 8,0 TWh em 2022, dentro do total de 677 TWh da geração elétrica no país no mesmo ano (EPE, 2023).



Notas / Notes:

1. Inclui Lenha, Biodiesel e Outras renováveis / Includes Firewood, Biodiesel and Other Renewables

2. Inclui Óleo Combustível, Gás de Coqueria, Outras Secundárias e Outras Não-Renováveis / Includes Fuel Oil, Coke Oven Gas, Other Secondaries and Other Non-Renewables

Figura 2-1 - Matriz Elétrica Brasileira em 2022.

Fonte: EPE (2023).

Vale destacar que a participação do carvão e outras fontes de geração termelétrica foi menor em 2022 em relação aos anos anteriores, em função do aumento do despacho hídrico ocorrido ao longo daquele ano (EPE, 2023). Até 2021, o carvão mantinha estabilidade há pelo menos 10 anos, desde que houve maior despacho das termelétricas por conta da crise hídrica iniciada em 2012, situando-se como fonte para geração elétrica entre 14 TWh e 17 TWh anualmente. Em 2021, a participação do carvão havia aumentado em 21% em relação a 2020 (EPE, 2022).

A substituição do carvão mineral por fontes menos poluidoras é inibida pelo seu baixo custo operacional e pela não compatibilidade da sua tecnologia de queima com o gás natural, como ocorre em instalações baseadas em óleo combustível, que vêm sendo gradualmente convertidas para gás. Tampouco se tem exemplos de queima mista de carvão e biomassa, embora sejam frequentes os estudos de viabilidade técnica e econômica encomendados pelos agentes do setor, muitas vezes concluindo que a injeção de biomassa ainda é pouco competitiva com o carvão do ponto de vista financeiro.

As instalações baseadas em carvão existentes no Brasil são pouco numerosas, mas caracterizam-se por suas elevadas potências individuais, como mostra a Tabela 2.1. Em seguida, na Figura 2-2, mostra-se a distribuição destas instalações pelo território nacional.

Tabela 2.1 - Lista de instalações de geração termelétrica baseadas em carvão mineral.

	Empreendimento	Potência Outorgada (MW)	Entrada em Operação	Município
UTE	Candiota III	350	2011	Candiota - RS
	Pampa Sul	345	2019	Candiota - RS
	Jorge Lacerda A	190	1965	Capivari de Baixo - SC
	Jorge Lacerda B	220	1979	Capivari de Baixo - SC
	Jorge Lacerda C	330	1997	Capivari de Baixo - SC
	Figueira	20	1963	Figueira - PR
	Porto do Pecém I	720	2012	São Gonçalo do Amarante - CE
	Porto do Pecém II	365	2013	São Gonçalo do Amarante - CE
	Porto do Itaqui	360	2013	São Luís - MA
Cogeração	Braskem Copesul	74	1999	Triunfo - RS
	Alumar	75	2009	São Luís - MA
	Alunorte	104	2007	Barcarena - PA
	Total contratado	3049		

Fonte: Elaboração do autor, com base em SIGA (ANEEL, 2020).

A Figura 2-2 evidencia a concentração de usinas a carvão em dois locais: na região Sul, dividindo-se entre Rio Grande do Sul e Santa Catarina, e na costa Norte do país, espalhando-se nos estados do Pará, Maranhão e Ceará. Na região Sul, o carvão é proveniente de reservas locais, em especial da jazida de Candiota, enquanto na costa Norte o combustível é importado majoritariamente da Colômbia e Estados Unidos. É notório também que 7 dentre as 12 unidades listadas iniciaram operação há um prazo relativamente curto, desde 2007, indicando que até então não havia relevante desestímulo financeiro ou ambiental com relação ao uso do carvão para fins energéticos.

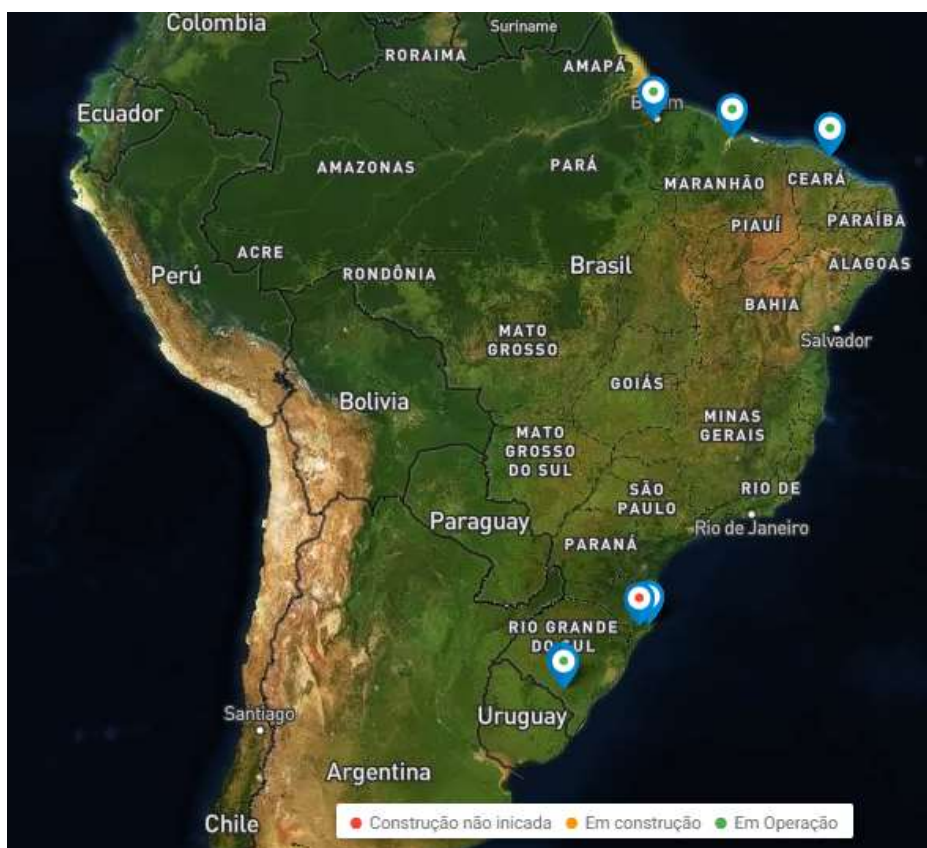


Figura 2-2 - Mapa de localização das instalações de geração termelétrica baseadas em carvão.

Fonte: Adaptada de Plataforma de Energia (IEMA, 2020).

A Tabela 2.1 aponta ainda a existência de instalações de cogeração baseadas em carvão, além das usinas termelétricas convencionais (UTE's). Estas unidades de cogeração consistem em produtores de alumina – Alunorte e Alumar – e de uma petroquímica, todos grandes consumidores de vapor, que utilizam turbinas a vapor de contrapressão para geração simultânea de vapor para seu processo e energia elétrica. Além do baixo custo operacional já mencionado, outro atrativo para o uso do carvão nestes agentes de cogeração é sua contribuição para a variabilidade de combustíveis em sua matriz, dado que estas unidades possuem caldeiras baseadas em diferentes fontes (carvão mineral, óleo combustível, gás natural, gás residual de processo), com isto garantindo maior segurança e flexibilidade operacional.

Justamente devido à concentração das usinas a carvão em poucas regiões no país, não há clareza nas normas ambientais de âmbito nacional sobre os limites a serem respeitados na operação de queima do carvão. A Resolução CONAMA 382/2006 (MMA, 2006) especifica os limites máximos de emissões atmosféricas para diversos combustíveis, tanto fósseis quanto renováveis, mas não para o carvão. Assim, a vigilância ambiental em torno da queima do carvão no Brasil se dá por meio de diretrizes técnicas locais nas regiões que sediam as grandes usinas. A Tabela 2.2 mostra os limites de emissões estabelecidos pela FEPAM, válida no Rio Grande do Sul (FEPAM, 2018).

Tabela 2.2 - Limites de emissões atmosféricas a partir da combustão externa de carvão mineral.

Potência Térmica Nominal MW	MP-total mg/Nm ³	CO mg/Nm ³	NOx mg/Nm ³	SOx mg/Nm ³
Até 10	300	500	1600	2700
Maior que 10 até 70	200	500	800	2200
Maior que 70 até 500	80	500	750	1300
Maior que 500 até 1000	65	250	600	950
Maior que 1000	50	250	400	400

Fonte: Diretriz Técnica nº01/2018 (FEPAM, 2018).

Embora os limites impostos pela FEPAM para a combustão do carvão sejam os mais rigorosos hoje no Brasil, nota-se que ainda assim é uma norma bastante permissiva em comparação aos limites europeus ilustrados anteriormente na Figura 1-1 e Figura 1-2. O limite europeu para o SOx situa-se na faixa entre 130 e 320 mg/Nm³, a depender da tecnologia de queima e da data de instalação do equipamento, enquanto a FEPAM estabelece 400 mg/Nm³ no caso mais restritivo. Para o NOx, o limite europeu situa-se entre 150 e 175 mg/Nm³, a depender da tecnologia de queima, enquanto a FEPAM impõe 400 mg/Nm³ no caso mais restritivo. Torna-se claro com isto que há defasagem tecnológica relevante entre os sistemas de abatimento de poluentes dos gases empregados no Brasil e na Europa. Caso se queira estabelecer limites de emissões semelhantes no Brasil, como é premissa deste trabalho, as instalações nacionais teriam que sofrer significativas atualizações nos sistemas de abatimento, como é abordado à frente na seção 2.3.2.

Embora ainda não haja imposição por normas ou regulamentos que determine o encerramento de atividades do carvão, a iniciativa privada já se movimenta no sentido de se desvincular deste combustível e dos impactos ambientais por ele provocados. Dentre as usinas listadas na Tabela 2.1, o Complexo Jorge Lacerda e a Pampa Sul, de capacidades outorgadas de 740 MW e 345 MW, respectivamente, ambas de propriedade do grupo francês Engie até recentemente, tiveram suas vendas concretizadas entre 2021 e 2022 (ENGIE, 2021; ENGIE, 2023). Como anunciado pelo próprio grupo, esta venda fez parte de uma estratégia de saída das operações a carvão em todo o mundo até 2027 e atingimento da marca de ser uma geradora 100% renovável.

Em âmbito nacional, em 2023, a NDC (*National Determined Contribution*) brasileira foi atualizada, estabelecendo que o Brasil deve reduzir suas emissões em 48% até 2025 e 53% até 2030, em relação às emissões de 2005 (BRASIL, 2023), fato que demonstra posicionamento institucional do governo nacional em comprometer-se com a redução de emissões fósseis e deve desencadear novos mecanismos de estímulo à indústria.

2.2 Caso Europeu

A Figura 2-3 ilustra a localização das usinas termelétricas a carvão na Europa em 2016 (CLIMATE ANALYTICS, 2017). É evidente que há elevada intensidade no uso per capita do carvão em alguns países, com destaque para República Tcheca, Alemanha, Polônia e Bulgária.

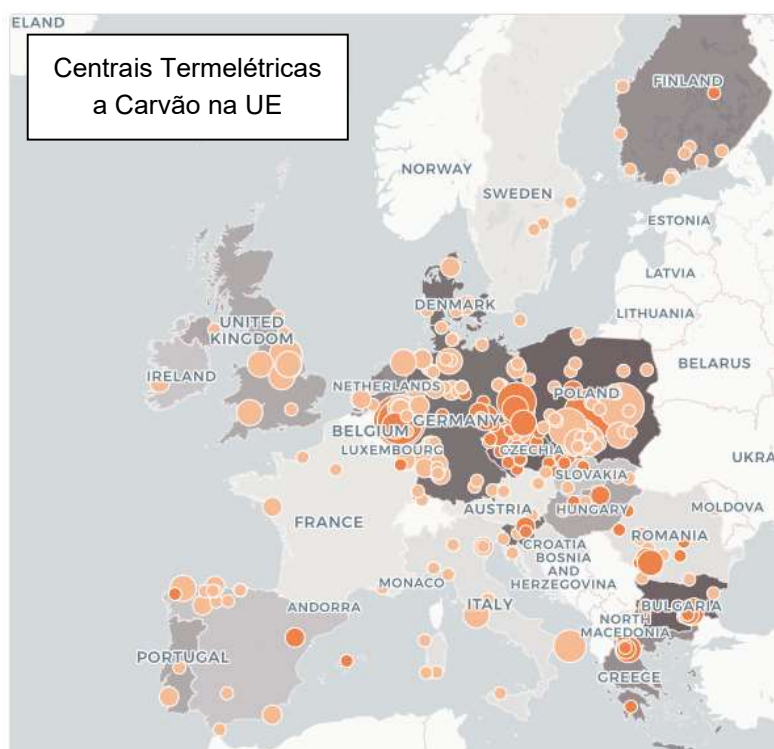


Figura 2-3 - Mapa de localização das usinas termelétricas baseadas em carvão na Europa, em 2016. O diâmetro do círculo é proporcional à capacidade da usina. A coloração do país indica o uso de carvão per capita (quanto mais escuro, maior o uso per capita). Fonte: CLIMATE ANALYTICS (2017).

Para atingimento das metas estabelecidas no Acordo de Paris, a previsão do estudo citado era de que 25% destas usinas deveriam ser fechadas até 2020, elevando-se para 75% até 2025 e 100% até 2030 (CLIMATE ANALYTICS, 2017). O estudo chega a propor duas possíveis estratégias para o sequenciamento do fechamento destas usinas, seja pelo critério de iniciar pelas usinas com emissões mais intensivas, seja pelo critério de iniciar pelas usinas menos lucrativas.

Desde 2016, no entanto, as mudanças têm sido mais lentas do que o esperado e não houve alteração significativa no mapa mostrado, porém há diversos sinais de ações ou anúncios promovidos pelo setor de carvão no sentido de reduzir seu consumo. Em estudo mais recente da mesma agência (CLIMATE ANALYTICS, 2019), é constatado que o número de novas usinas a carvão anunciadas entre 2015 e 2019 se reduziu em 75%. Além disso, o fator de capacidade de usinas a carvão decresceu em diversos países europeus, apontando para maiores probabilidades de fechamento ou, ao menos, da não expansão dessas instalações. Países pouco dependentes de carvão, como Bélgica e Áustria (PV MAGAZINE, 2020) já eliminaram totalmente o carvão de suas matrizes, enquanto países com elevada geração a carvão seguem tomando medidas para

sua eliminação gradual, como fez a Alemanha (BBC, 2020), que já fechou sua última mina de carvão e anunciou interrupção do consumo de carvão em usinas até 2038.

Outro exemplo de grande relevância na tomada de ações para eliminação do uso do carvão é o Reino Unido, simbolizado pela usina Drax, já mencionada anteriormente (DRAX, 2018). A Figura 2-4 mostra imagem aérea da usina, após a incorporação de silos para pellets de biomassa ao lado do pátio de armazenamento de carvão.



Figura 2-4 - Vista aérea da usina termelétrica Drax, em North Yorkshire, na Inglaterra. São circulos em vermelho os silos de armazenamento de pellets de madeira, coexistindo com o pátio de carvão. Fonte: DRAX (2018).

A conversão da Drax vem ocorrendo gradualmente desde 2003, quando a usina iniciou testes com queima mista de carvão e biomassa em suas caldeiras. Em 2010, a capacidade de 400 MW iniciou operação comercial com queima mista de carvão de pellets de madeira, até que, de 2013 em diante, suas unidades geradoras passaram a ser convertidas para queima exclusiva de biomassa. Em 2018, concluiu-se a conversão de 4 de suas 6 unidades geradoras, representando 2,6 GW dentre os 4,0 GW de potência instalada. Em 2023, a usina interrompeu totalmente seu consumo de carvão (DRAX, 2023).

O caso da Drax é representativo de uma diretriz de mudança que pode ser reproduzida nas usinas a carvão brasileiras. A adaptação tecnológica para a queima de pellets de biomassa aproveita grande parte da infraestrutura existente nas usinas a carvão, como é abordado na seção 2.3, e o país dispõe de biomassa suficiente para esta substituição, como é levantado na seção 2.4.

Impactos da Guerra da Ucrânia no setor energético

Desde fevereiro de 2022, quando se iniciou o conflito entre Rússia e Ucrânia, diversos setores produtivos sofreram impacto devido a limitações de suas cadeias de suprimentos causadas pela guerra. Dentre estes setores, foram notórios os impactos em fertilizantes, alumínio, níquel, alimentos, com destaque também à energia.

A interrupção da exportação de combustíveis por parte da Rússia provocou elevações expressivas de preços para o petróleo, gás natural e carvão (NERLINGER et. al., 2022). A Europa sofreu grandes consequências neste setor, já que era um dos grandes importadores de energia da Rússia. Nos últimos anos, a Europa vinha elevando seu consumo de gás natural, visto como combustível de transição para a descarbonização. Do total de gás natural consumido no continente, 41% eram importados da Rússia (BESSON, 2023). Por este motivo, a Europa tem buscado diversificar os países fornecedores de gás natural, importar GNL.

Neste contexto, alternativas ao gás natural foram avaliadas, a exemplo da energia nuclear, que teve na Bélgica seu encerramento prorrogado de 2025 para 2035. Outra alternativa, em regime de emergência, seria o próprio carvão, ainda que na contramão do atingimento das metas de redução de emissões. No entanto, a dependência da Europa ao carvão proveniente da Rússia também é elevada, chegando a 46% do consumo total europeu, portanto este insumo também teve preços impactados (NERLINGER et. al., 2022). A limitação ao consumo de gás natural e carvão causada pelo aumento de preços foi tal que não se registrou aumento significativo das emissões (MYLLYVIRTA, 2023).

Em pouco tempo, tanto o carvão quanto seu substituto habitual, o gás natural, tornaram-se escassos e sofreram aumento de preços. Este contexto demonstra a importância da diversificação do suprimento de combustíveis para o continente, lição que pode ser aplicada também a outros países e continentes.

2.3 Alternativas Tecnológicas

2.3.1 Cenário Base

É comum dentre as usinas termelétricas a carvão que a conversão em energia elétrica seja realizada através de um Ciclo Rankine, como é ilustrado na Figura 2-5.

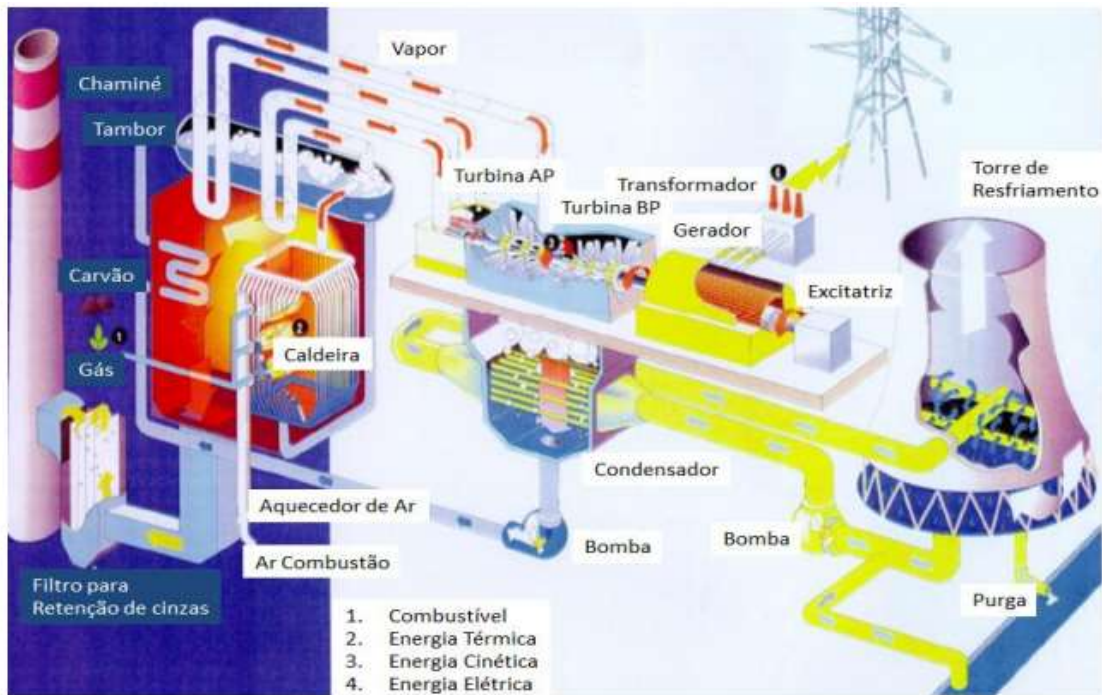


Figura 2-5 - Esquema simplificado de uma usina termelétrica de ciclo Rankine.
Fonte: Tractebel, reproduzido em TOLMASQUIM (2016).

Neste tipo de ciclo, há transferência de calor dos gases gerados na combustão à água que circula na caldeira, produzindo vapor superaquecido. Este vapor alimenta uma turbina e movimenta seu eixo, acoplado a um gerador, convertendo esta rotação em eletricidade, que por sua vez é transformada para a tensão requerida na concessionária de distribuição. O vapor exausto da turbina é direcionado a um condensador, onde ocorre troca térmica com um fluido frio, e o condensado gerado é bombeado para um desaerador e posteriormente retorna à caldeira, fechando o ciclo termodinâmico (TOLMASQUIM, 2016).

O sistema de processamento do carvão também possui características gerais semelhantes nas diversas usinas, consistindo de: armazenamento em pilhas, transporte por correias transportadoras, trituração, pulverização e, por fim, condução até os queimadores da caldeira.

A diferenciação entre usinas a carvão se dá principalmente pelo tipo de tecnologia empregada para combustão na caldeira. O sistema mais utilizado é por combustão pulverizada de carvão, que está presente em mais de 90% das unidades em operação no mundo (TOLMASQUIM, 2016). Neste sistema, o carvão pulverizado é admitido na caldeira pneumaticamente por ventiladores de ar de combustão. A Figura 2-6 mostra um esquema simplificado deste tipo de caldeira.

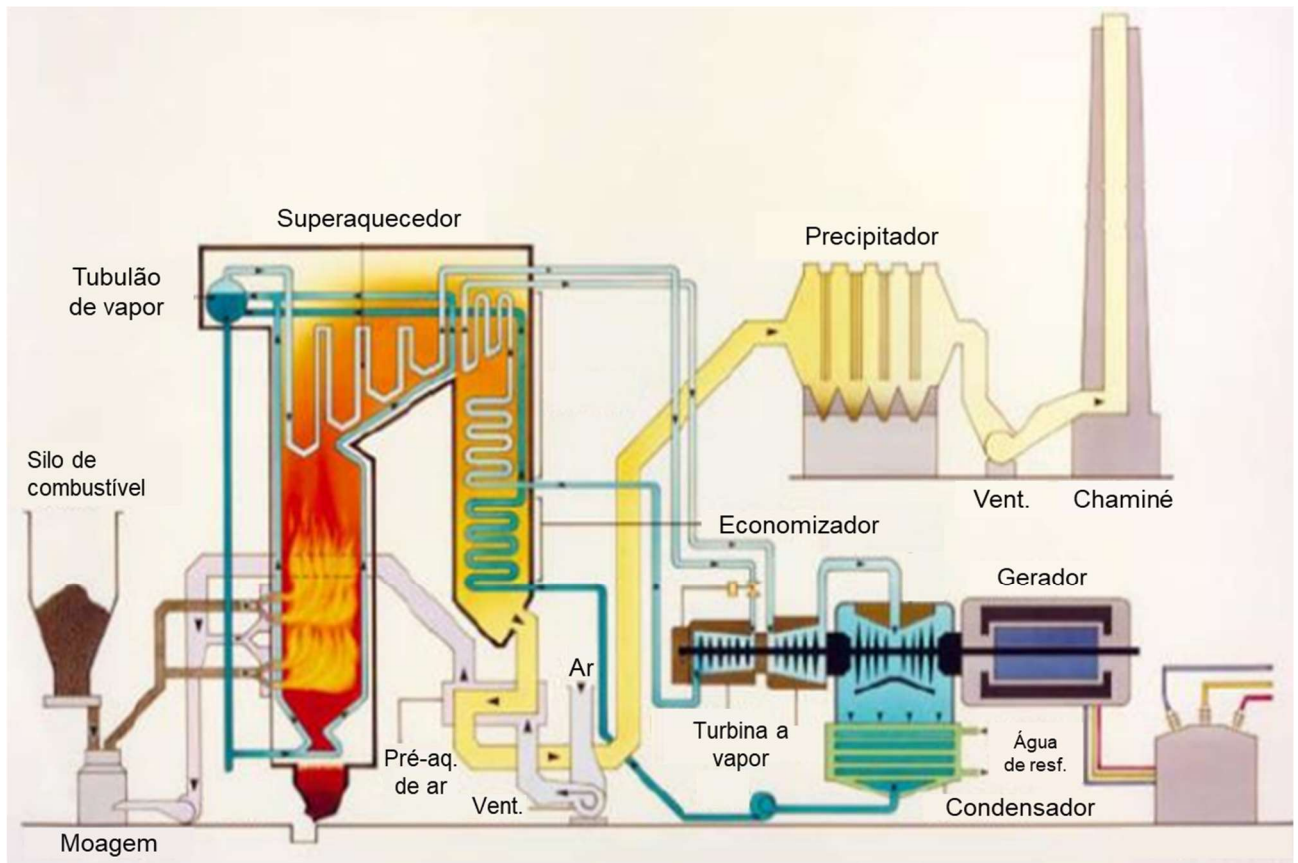


Figura 2-6 - Esquema simplificado de usina termelétrica a carvão pulverizado.
 Fonte: Adaptado de Tractebel, reproduzido em TOLMASQUIM (2016).

Além da tecnologia de queima pulverizada, são avaliadas neste trabalho configurações com leito fluidizado circulante, pois ambos são tipos presentes nas centrais termelétricas nacionais.

2.3.2 Continuidade do carvão

Frente às diretrizes ambientais impostas pelos governos europeus com o fim de cumprir as metas de emissões atmosféricas estabelecidas no Acordo de Paris, os proprietários de usinas termelétricas a carvão daqueles países são pressionados a avaliar técnica e economicamente se é vantajoso manter a operação baseada em carvão, porém executando retrofit para abatimento dos principais poluentes e garantir o cumprimento dos novos limites, ou se é viável substituir o carvão por outro combustível sólido menos poluente, aproveitando ao máximo a infraestrutura existente para o carvão.

Na primeira alternativa, de manter a operação do carvão, listam-se as principais frentes de ação necessárias:

a) Captura de CO₂

Uma das estratégias disponíveis para mitigação das emissões de GEE é a remoção do CO₂ da atmosfera, aplicada através de sistemas de captura e armazenamento de carbono (CCS). No caso das centrais termelétricas a carvão, sua captura seria em fase pós-combustão do carvão e seu armazenamento seria em reservatórios geológicos, como sugere o estudo de PELISSARI (2021),

que avalia os reservatórios potenciais para armazenamento geológico do carbono emitido pelo Complexo de Jorge Lacerda.

No entanto, até o momento a experiência com sistemas CCS relativos ao carvão tem sido limitada. Embora haja maior número de projetos em desenvolvimento, são registrados 5 projetos de CCS operacionais no mundo, dos quais apenas 2 são do setor de geração termelétrica (IEA, 2022). No Brasil, há diversos estudos em andamento, como cita o relatório recente da CCS Brasil (2023), mas há o entendimento de que o tema carece de atenção pelos órgãos responsáveis no país e dificilmente será viabilizado economicamente sem que se torne parte de um plano de longo prazo aliando estímulos governamentais e o desenvolvimento de estrutura regulatória direcionada (NETTO et. al., 2021; ROCHEDO et. al., 2016).

Pelo dado contexto, entende-se que a solução de CCS como mecanismo aliado à continuidade do carvão é tema de elevado potencial como estratégia de descarbonização do setor energético, mas que ainda carece de demonstrações mais sólidas de viabilidade técnico-econômica, especialmente em âmbito nacional.

b) Abatimento de NO_x

Uma das abordagens para redução de emissões de NO_x visa à redução de sua geração ainda no processo de combustão, sendo estas técnicas denominadas primárias. No entanto, as técnicas que se provam mais efetivas são do grupo secundário, que abatem o NO_x gerado após o processo da combustão. A melhor tecnologia disponível é a Redução Catalítica Seletiva (SCR), que consiste na mistura dos gases de exaustão com uma solução de amônia e na condução dessa mistura por um catalisador de vanádio e titânio (IEEFA, 2017). Este processo transforma o NO_x dos gases em água e nitrogênio molecular.

A SCR é capaz de reduzir a concentração de NO_x para menos de 100 mg/Nm³, portanto razoavelmente menor do que o novo limite europeu estabelecido (150-175 mg/Nm³) (IEEFA, 2017). No entanto, este sistema possui elevado custo de investimento e requer grande área de instalação. Relata-se, ainda, que ele apresenta mau desempenho em regimes intermitentes de operação das caldeiras. Atualmente as usinas a carvão no Brasil não convivem com rotinas de operação excessivamente intermitentes, como foi o caso, por exemplo, das usinas a óleo combustível nos últimos 8 anos, mas é possível que a tendência futura seja de maior modulação destas usinas em função do crescimento da participação de fontes renováveis intermitentes na matriz elétrica.

c) Abatimento de SO_x

As tecnologias mais eficientes para redução do SO_x consistem na dessulfurização dos gases de exaustão por via úmida, onde os gases são lavados por contrafluxo numa torre de absorção e

reagem com um neutralizador, geralmente calcário, dissolvendo os poluentes no líquido de lavagem (IEEFA, 2017). Apesar de mais eficiente, esta técnica é mais custosa do que outras disponíveis, secas e semi-secas.

A Tabela 2.3 mostra um levantamento de desempenho e custos para implantação das melhores tecnologias de abatimento de NOx e SOx na Europa (IEEFA, 2017). A tabela mostra tanto o custo inicial quanto os custos necessários para manutenção ao longo dos anos subsequentes (*upgrade*). Como premissas para a obtenção dos custos específicos (por MW e MWh) mostrados nas duas colunas à direita, foi admitida a depreciação dos custos ao longo de 15 anos de operação, considerando fator de carga da usina de 70%. Os custos foram levantados para usinas de grande porte já existentes, que costumam ter estes custos mais elevados do que seriam em usinas novas.

Tabela 2.3 - Comparativo de desempenho e custos de tecnologias de abatimento de poluentes.

Poluente	Tecnologia	Emissão mg/Nm ³	Limite BREF mg/Nm ³	CAPEX €/ MW	OPEX €/ MWh
NOx	SCR	<100	150-175	138.000,00	1,91
	SCR (upgrade)	<100	150-175	27.600,00	0,63
SOx	DeSOx	<100	130-320	300.000,00	5,99
	DeSOx (upgrade)	<100	130-320	22.500,00	3,90

Fonte: IEEFA (2017).

No caso europeu, estes preços poderiam representar acréscimo de até 20% no custo operacional (OPEX) das usinas, quando acumuladas as soluções de abatimento de NOx e SOx. Esta elevação é tão significativa que chega a inviabilizar sua implantação, ajudando a explicar então a decisão de muitos investidores por fechar as usinas ao invés de reformá-las para adequação às normas.

2.3.3 Substituição do carvão

As alternativas de substitutos do carvão são limitadas por sua tecnologia de combustão. É pouco viável tecnicamente converter uma caldeira projetada para a queima de carvão tal que receba combustíveis líquidos ou gasosos, mantendo-se a capacidade térmica original do equipamento, devido principalmente às diferenças entre o perfil de fornalha requerido em cada caso. Dado que o custo da caldeira pode representar entre 20% e 30% do investimento total de uma usina típica de ciclo Rankine, a aquisição de uma nova caldeira inviabilizaria financeiramente a reforma da usina para a queima de tipos líquidos ou gasosos de combustíveis.

Com isto, deve-se recorrer a outros combustíveis sólidos para substituição do carvão. A biomassa mostra-se a melhor candidata para esta substituição, não só por gerar concentrações significativamente inferiores de poluentes atmosféricos, mas também por ser compatível com

grande parte da infraestrutura e da tecnologia já existentes para o carvão. Esta compatibilidade permite o reaproveitamento da tecnologia e a minimização dos custos de reforma.

Outra característica buscada na biomassa para viabilização desta substituição é que tenha uma densidade energética não muito distinta da densidade do carvão. O volume específico ocupado pelo carvão em relação ao seu poder calorífico tem impacto tanto no dimensionamento do pátio de armazenamento quanto no próprio volume da fornalha. Isto dificulta que a biomassa substituta seja *in natura*, ou seja, ainda úmida e não compactada, pois seu volume ocupado para proporcionar a mesma capacidade calorífica que o carvão seria muito maior.

Para ilustrar estas diferenças, a Tabela 2.4 apresenta as principais características físicas do carvão, eucalipto (em pellet e cavaco) e caroço de açaí. Os pellets consistem da biomassa processada, já seca e compactada, enquanto o cavaco é a tora de eucalipto apenas picada, portanto ainda em condição de umidade próxima à da madeira *in natura*.

Tabela 2.4 - Propriedades do carvão e biomassa.

Combustível	Umidade %	PCI (mas.) MJ/kg	Massa específica kg/m³	PCI (vol.) MJ/m³	$\frac{PCI (vol.)}{PCI, carvão}$
Carvão	8,0%	23,5	800	18800	100%
Pellet de eucalipto	7,0%	16,2	657	10643	57%
Cavaco de eucalipto	40,0%	10,46	285	2981	16%
Caroço de açaí	16,5%	14,4	788	11331	60%

Fonte: Adaptado de ROHLOFF (2017), PEREIRA (2014), PEREIRA (2018), NOGUEIRA (2010).

Nota-se que o cavaco de eucalipto possui PCI muito inferior, em termos volumétricos, numa relação de 16% em comparação ao do carvão. Isto significa que o volume ocupado pelo cavaco será cerca de 6 vezes maior do que o carvão, para o mesmo poder calorífico armazenado. Os outros tipos de biomassa também possuem PCI inferior ao do carvão, mas numa relação próxima de 60%, tornando os volumes ocupados por estes tipos cerca de 1,6 vezes maiores do que o carvão. Evidentemente o uso de pellets ou do caroço de açaí não elimina a necessidade de adaptações da tecnologia do carvão, mas já são combustíveis suficientemente semelhantes para viabilizar sua substituição, a depender do tipo de caldeira.

No capítulo 2.3.1 comentou-se sobre a existência de diferentes tipos de caldeira alimentadas por carvão, dentre as quais a queima pulverizada era a mais utilizada. Este tipo também se mostra o mais apropriado para lidar com a menor densidade energética da biomassa em relação ao carvão, pois é a caldeira que requer menor volume de combustível injetado na fornalha. As caldeiras de grelha e leito fluidizado exigem maior tempo de residência do combustível na fornalha, portanto aumentando o volume instantâneo de combustível sofrendo a queima. Ao utilizar pellets ao invés

de carvão, o impacto é menos relevante na caldeira de queima pulverizada. A Figura 2-7 ilustra os quatro principais tipos de caldeira a carvão.

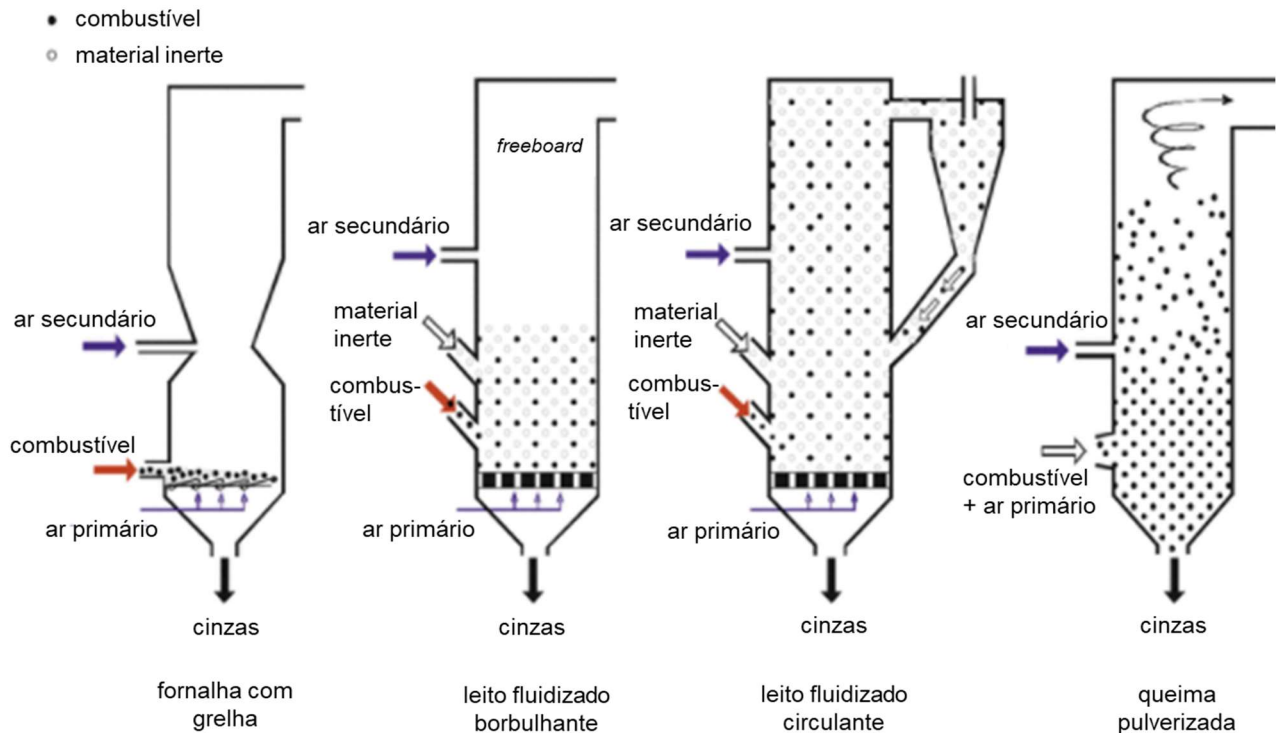


Figura 2-7 - Comparação entre tipos de fornalha para queima de carvão.

Fonte: Adaptado de OBERNBERGER et. al. (2013).

Em caldeiras de grelha, a participação da biomassa em eventual queima mista com carvão é limitada pelo volume ocupado pelo combustível e por sua menor taxa de geração de cinzas, que é insuficiente para manter a temperatura da fornalha em nível aceitável. Por isto, a caldeira de queima pulverizada é a melhor candidata dentre todos os tipos a preservar sua carga térmica original projetada para o carvão mesmo após a conversão total para queima de biomassa. A depender do tipo de biomassa e das modificações executadas, é viável que a biomassa atinja mesma condição de carga do carvão também em caldeiras de leito fluidizado.

Devido ao maior volume ocupado pelos pellets, a substituição do carvão requer a ampliação de capacidade dos dispositivos de alimentação de combustível e adaptação do queimador. Na Figura 2-6, à esquerda, mostravam-se o silo de combustível (*bunker*) e o moinho de pulverização (*pulverising mill*). Ambos os conjuntos devem ser ampliados para a queima da biomassa, além dos ventiladores e queimadores propriamente ditos. Isto é reforçado pelo fabricante Mitsubishi (MHI, 2021), que lista os queimadores e o moinho como principais sistemas alterados em instalações que sofreram esta conversão, entre elas a Drax, no Reino Unido, a Avedore, na Dinamarca, e a Atikokan, no Canadá. O fabricante resume na Figura 2-8 os principais itens a sofrerem modificações em projetos de conversão de carvão para biomassa.

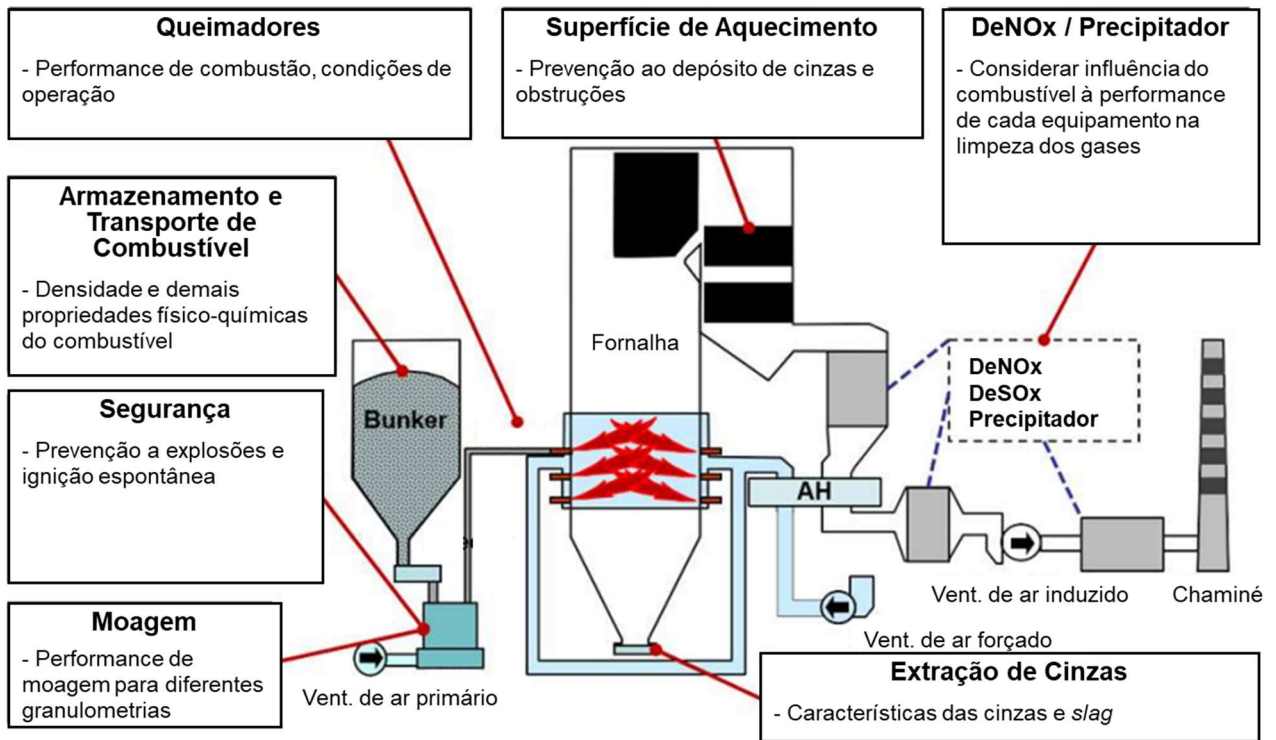


Figura 2-8 – Principais itens observados em projeto de conversão de carvão para biomassa.

Fonte: Adaptado de MHI (2021).

2.4 Potencial de Geração de Biomassa no Brasil

Em função da concentração de unidades consumidoras de carvão nos extremos Sul e Norte do país, conforme apresentado anteriormente no item 2.1, serão priorizados neste estudo os tipos de biomassa mais presentes nessas mesmas regiões, no intuito de proporcionar as menores distâncias possíveis de transporte entre os respectivos locais de produção da biomassa e de seu consumo nas caldeiras. Por este motivo, justifica-se a exclusão nesta análise do bagaço de cana, dado que sua produção é concentrada nas regiões Sudeste e Nordeste do país.

Nos itens 2.4.1 e 2.4.2 são apresentados os potenciais do eucalipto na forma de cavaco, pellets ou serragem, além do caroço do açaí, discutido no item 2.4.3. No item 2.4.4, justifica-se a exclusão da palha como objeto deste estudo. Apesar do aparente potencial da palha, que é resíduo altamente presente em diversas regiões do país, é discutido adiante que suas características físico-químicas dificultam seu uso em grande escala e a queima simultânea com outros tipos de combustível.

2.4.1 Cavaco e Pellets de Eucalipto

O Brasil possui grande vocação na produção sustentável de florestas para produção de madeira do gênero *Eucalyptus* (ESCOBAR FARAGO, 2016). A tese demonstra inclusive que o país tem potencial para se tornar produtor de pellets de madeira em grande escala e é capaz de atender parte da demanda internacional pelo insumo, desde que a madeira seja devidamente tratada para

eliminação de cloro e outros inorgânicos que contaminam os gases de exaustão após sua queima. Um estudo sobre o potencial energético de resíduos florestais complementa esta visão (EPE, 2018), estimando que há cerca de 633 MW de potencial de capacidade instalada de geração termelétrica a partir de biomassa residual do processamento de madeira em toras, especialmente nas regiões Sul e Sudeste. Mesmo na região Norte, há enorme potencial de uso da biomassa para atendimento dos sistemas isolados de energia elétrica, podendo nestes casos substituir as usinas a gás natural ou óleo combustível existentes na região.

A Figura 2-9 ilustra a localização de áreas potenciais para o plantio de eucalipto para fins energéticos.

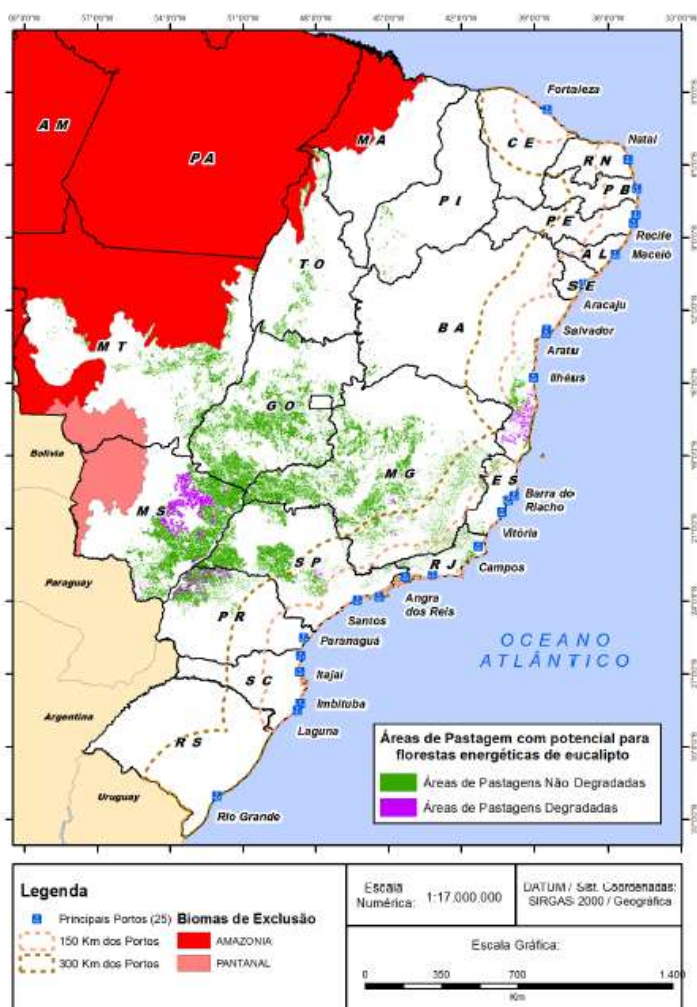


Figura 2-9 - Áreas potenciais para produção de pellets a partir de florestas energéticas.

Fonte: ESCOBAR FARAGO (2016).

A Figura 2-9 representa delimitações a 150 km e 300 km do litoral, indicando que florestas dentro dessas áreas terão maior potencial comercial para exportação ou até mesmo para consumo interno, via transporte hidroviário. Considerando apenas as florestas energéticas a 300 km do porto, é estimado um potencial de produção de 125 milhões de toneladas de pellets por ano. Com

base no BEN relativo a 2019 (EPE, 2020), naquele ano a potência elétrica convertida a partir de carvão vapor em 2019 foi de 15,3 TWh, o que equivale ao consumo anual de cerca de 6,1 milhões de toneladas de carvão para geração termelétrica no Brasil. Considerando os poderes caloríficos informados anteriormente na Tabela 2.4, calcula-se uma massa de pellets equivalente ao carvão consumido anualmente, em termos energéticos, próxima de 9,1 milhões de toneladas de pellets. Conclui-se que a substituição de todo o carvão utilizado para geração termelétrica no Brasil equivaleria a apenas 7% do potencial de produção de pellets em florestas a 300 km do porto. Isto demonstra que o país possui larga folga no potencial de produção de pellets de eucalipto para consumo interno.

Como já mencionado, o eucalipto cultivado no Brasil tende a apresentar elevado conteúdo de cloro, que contamina os gases de exaustão após sua queima. Esta característica dificulta que os pellets produzidos no Brasil se enquadrem nas especificações exigidas por normas europeias para importação. Este fato representa uma barreira também para a produção e consumo de pellets internamente no país, dado que a viabilização deste mercado dependeria fortemente da escala proporcionada pela exportação para a Europa. Como solução para isto, em estudo direcionado (ESCOBAR FARAGO, 2016), é proposta uma técnica de extração de cloro da madeira, que, se for incorporada ao processo de produção de pellets, pode auxiliar no enquadramento da biomassa nacional nas especificações europeias e como consequência no aumento de sua escala e viabilização comercial.

Na Figura 2-10 (MATTHEWS, 2015; SILVA, 2017), é visto que a produção mundial de pellets no mundo vem demonstrando crescimento consistente, desde 2 Mt em 2000 até 28 Mt em 2015. Deste total, em 2015, 15 Mt foram destinados para aquecimento doméstico e 13 Mt para o setor industrial e geração de energia.

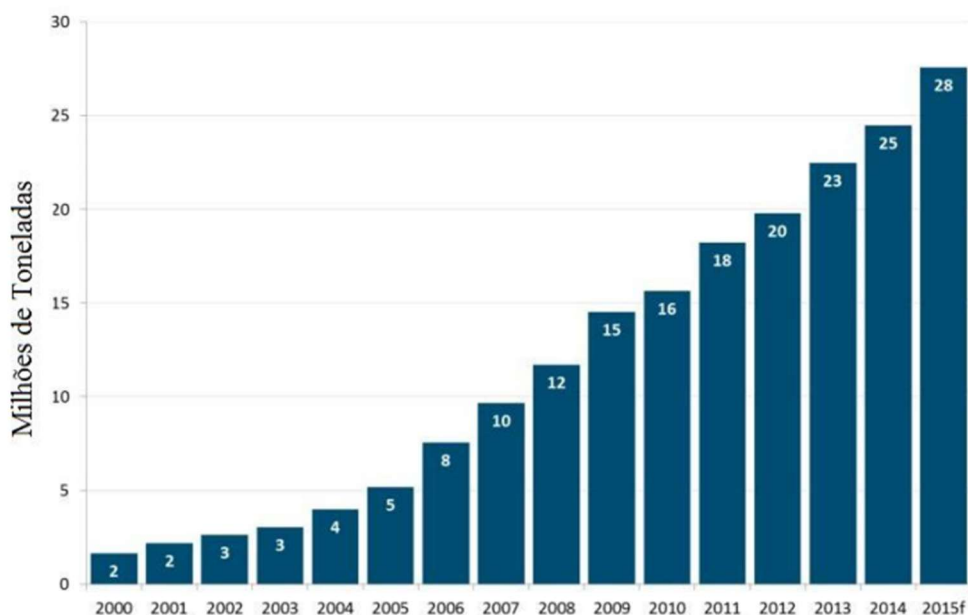


Figura 2-10 – Evolução da produção mundial de pellets.

Fonte: MATTHEWS (2015), SILVA (2017).

Com foco no setor industrial, a Figura 2-11 (STRAUSS, 2020; SARTORI, 2022) mostra as tendências esperadas para a demanda por pellets pelo mercado industrial, com viés significativo de crescimento em novos países consumidores, como Japão e Coreia do Sul, enquanto se mantém o patamar elevado de consumidores já bem estabelecidos, como Reino Unido e Dinamarca. Na Figura 2-11 observa-se para a Coreia do Sul expectativa de consumo em 2025 duplicada em relação a 2017, enquanto o Japão passaria de um consumo ínfimo em 2017 a se tornar o maior consumidor da Ásia nesse mesmo período.

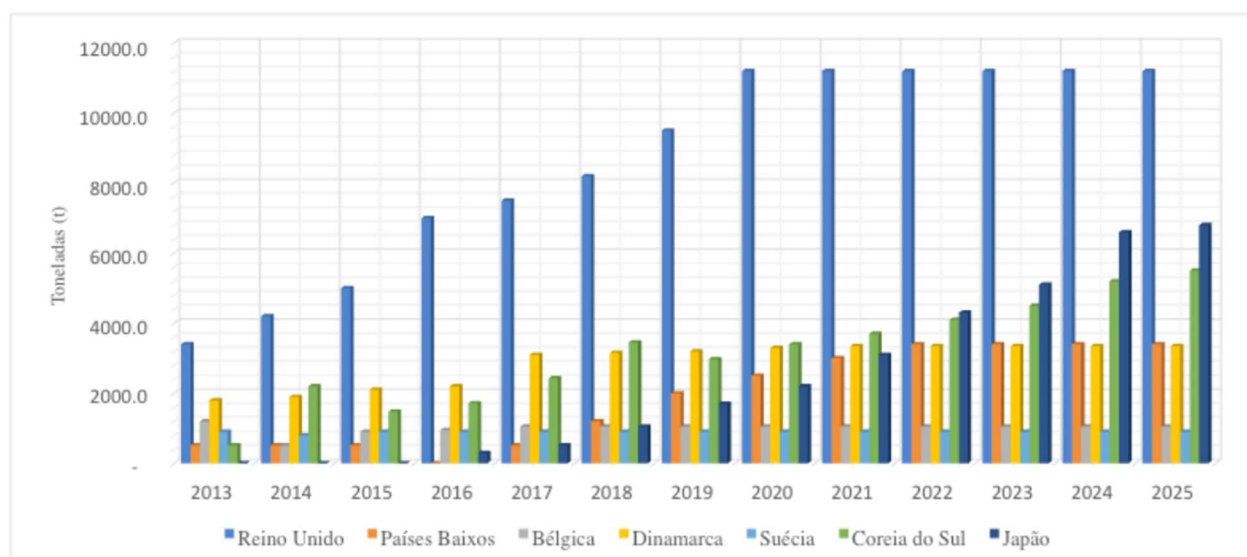


Figura 2-11 - Estimativa da demanda de pellets de madeira, realizada em 2020, para o mercado industrial.

Fonte: STRAUSS (2020), SARTORI (2022).

2.4.2 Serragem

Além da madeira em formas processadas exclusivamente para fins energéticos, como cavacos ou pellets, há potencial também para seu aproveitamento na forma de resíduos de processos já existentes. Em estudo sobre o potencial energético de resíduos florestais (EPE, 2018), a partir da produção de madeira em tora para a indústria de papel e celulose, carvão vegetal, lenha e outros fins, é estimada a quantidade de resíduos do processamento da madeira em todos os estados brasileiros. A Tabela 2.5 mostra os resultados para os 5 estados brasileiros com maior potencial, restringindo-se aos 10 municípios de maior potencial em cada estado.

Tabela 2.5 - Produção madeireira anual e potencial de geração de resíduos nos 10 municípios com maior potencial, nos 5 estados brasileiros com maior potencial.

UF	Madeira em tora (1.000 m ³)	Resíduos do Proc. (1.000 t)
PR	7.226	1.221
SP	5.506	931
MG	2.908	492
RS	2.904	491
SC	2.511	424
Total	21.056	3.558

Fonte: EPE (2018).

É observado maior potencial na Região Sul, que segundo essa estimativa totalizariam 2,1 Mt de resíduos por ano, correspondentes a cerca de 490 MW térmicos. Nos dois estados listados para a região Sudeste, a quantidade estimada chega a 1,4 Mt por ano. Ainda que estas quantidades não tenham escala tão expressiva como a mencionada na seção anterior para cavaco e pellets provenientes de madeira de reflorestamento, a serragem é oferecida a mercado já com características físicas e granulometria mais próximas às desejadas a combustão em caldeiras, requerendo assim menos etapas de processamento do material, tornando-a um tipo de biomassa menos custoso e mais vantajoso sob o aspecto de eficiência energética do ciclo de vida, como se pretende mostrar adiante neste trabalho. Especialmente na região Sul, onde apresenta maior disponibilidade, é opção de biomassa relevante de ser avaliada como substituta ao carvão.

2.4.3 Caroço de Açaí

Segundo levantamento de dados do IBGE (SEDAP, 2021), em 2020 o Pará concentrou cerca de 94% da produção nacional de açaí, atingindo o patamar de 1,39 Mt anuais. Dos frutos maduros do açaizeiro é extraída a polpa, que é consumida como alimento, principalmente, gerando como resíduo seu caroço, que corresponde a cerca de 85% do peso total do fruto (COSTA, 2014). Isto resulta em cerca de 1,15 Mt anuais de caroço sendo gerado no estado.

Ainda que o caroço possua aplicações próprias, tais como a produção de fibras para indústrias diversas e também a extração de óleo e a mistura a outros produtos alimentícios, seu consumo

não acompanha o ritmo de produção da polpa, provocando enorme quantidade de caroço residual, a ponto de se tornar motivo de preocupação aos municípios produtores. Somente na Região Metropolitana de Belém, é estimada a produção de cerca de 2 t diárias de caroço (MOREIRA et. al., 2020), que resultam em mais de 700 t anuais.

Há exemplos da destinação do caroço de açaí como substituto a combustíveis fósseis no contexto industrial, como é o caso da Votorantim Cimentos (VC, 2020), que utiliza cerca de 80.000 t anuais de caroço para substituição parcial de coque de petróleo em fornos de cimento. Em maior escala, para fins energéticos, ainda não há registro de aplicações, porém há pesquisas em andamento que investigam a viabilidade e o comportamento da queima simultânea do caroço para substituição parcial ao carvão, especialmente na Hydro Alunorte (HYDRO, 2022), localizada em Barcarena, no Pará. O potencial energético do caroço de açaí não é compatível com a geração nacional de energia elétrica a partir do carvão, porém sua elevada concentração no estado do Pará pode viabilizá-lo como solução interessante para os grandes consumidores daquela região, já mapeados na Figura 2-2.

2.4.4 Palha

Além da possibilidade de se produzir biomassa para fins energéticos, como foi levantado no caso dos pellets de eucalipto, é de majoritória importância também o estudo do aproveitamento de resíduos dos processos agrícolas mais predominantes no Brasil. Em estudo direcionado à densificação de resíduos agrícolas no Brasil (SILVA, 2017), é realizado o mapeamento do potencial energético das palhas residuais de diversos produtos agrícolas: cana de açúcar, soja, milho, arroz e trigo. Na Tabela 2.6, mostra-se o potencial energético para os diferentes tipos de resíduos e sua organização por regiões no território brasileiro.

Tabela 2.6 – Potencial de energia primária nas regiões do Brasil por resíduo agrícola.

Região	Potencial de bioenergia primária (TJ/ano)					Total
	Palha de cana-de-açúcar	Palha de arroz	Palha de Soja	Palha de milho	Palha de trigo	
Sul	45.584	252.250	358.538	173.394	26.102	855.869
Sudeste	442.714	2.731	61.180	78.433	1.981	587.038
Norte	4.195	24.810	42.623	12.272	-	83.901
Nordeste	63.722	22.540	79.534	47.643	-	213.438
Centro-Oeste	121.874	21.330	508.217	256.769	347	908.537
Total	678.089	323.661	1.050.091	568.511	28.430	2.648.782

Fonte: SILVA (2017).

Anteriormente, no mapa de localização das centrais termelétricas a carvão mostrado na Figura 2-2, notavam-se concentrações de grandes consumidores nas regiões Norte e Sul do Brasil. Dentre estas, apenas a região Sul possui potencial interessante advindo das palhas residuais, especialmente dos cultivos de soja e arroz. Visando à identificação dos melhores potenciais de aproveitamento de resíduos em substituição ao carvão, observam-se em maior detalhe, então, as palhas de soja e arroz, por apresentarem menor distância e maior sinergia com as centrais consumidoras de carvão da região Sul.

Como ilustração dos potenciais listados na Tabela 2.6, mostram-se nas figuras a seguir os mapas temáticos para a concentração das palhas de soja e arroz.

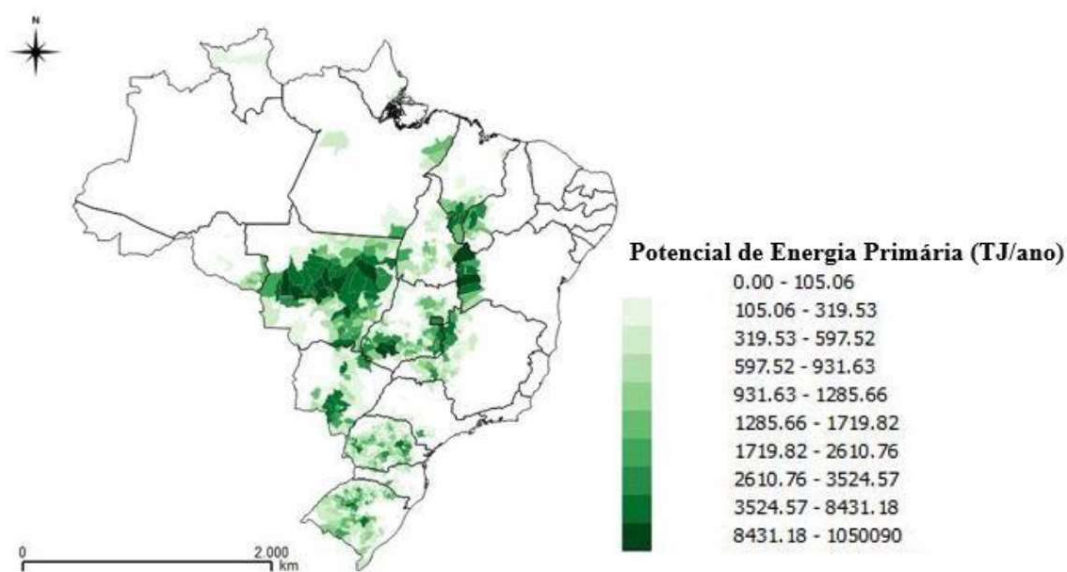


Figura 2-12 - Mapa de distribuição do potencial de energia primária da palha de soja no território brasileiro. Fonte: SILVA (2017).

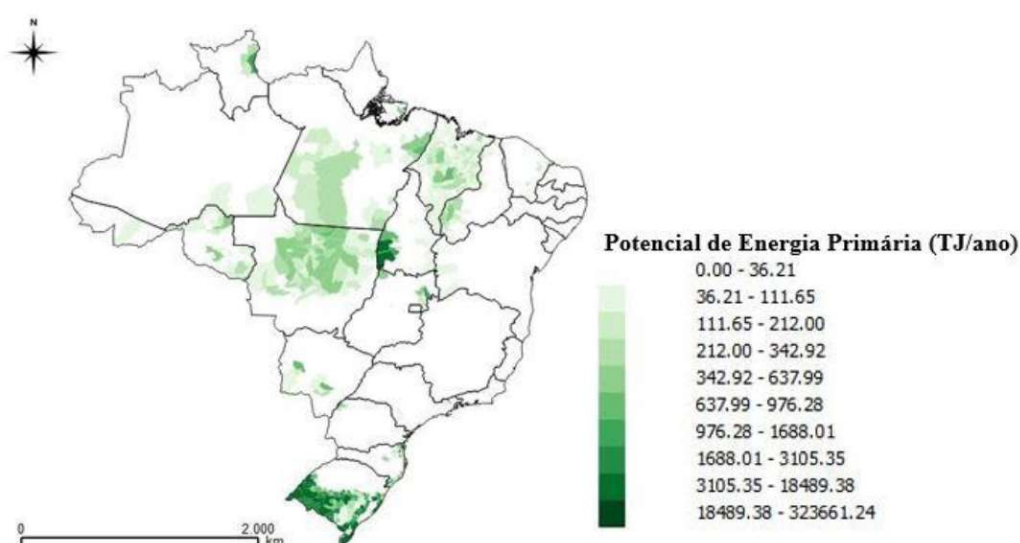


Figura 2-13 – Mapa de distribuição do potencial de energia primária da palha de arroz no território brasileiro. Fonte: SILVA (2017).

A partir das potências instaladas baseadas em carvão listadas na Tabela 2.1, somente na região Sul estima-se que são consumidas cerca de 1,0 milhão de toneladas de carvão para fins de geração elétrica, que representam cerca de 27.000 TJ em potencial energético do combustível. Os potenciais energéticos disponíveis na região Sul para as palhas de arroz e de soja listados na Tabela 2.6 representam respectivamente cerca de 11% e 8% do conteúdo energético do carvão consumido na região, mostrando-se então candidatas para substituição parcial do carvão na região Sul.

Como exemplo de experiência anterior que envolveu a queima de palha com carvão, na usina termelétrica de Studstrup, na Dinamarca, iniciou-se na década de 1990 um projeto de conversão de uma de suas caldeiras a carvão de queima pulverizada para admitir o *co-firing* com palha, tendo sido uma experiência bem-sucedida a longo prazo, conforme relatado por VAN LOO (2008). No Brasil, o *co-firing* de palha de arroz com carvão pulverizado já foi estudado como alternativa para o Complexo Termelétrico de Jorge Lacerda, tendo sido apontado nos estudos que o uso da palha acarreta não só a redução de emissões de CO₂ propriamente dito, mas também de CH₄, já que seu uso para fins energéticos evita que permaneça e se decomponha no solo (BAZZO et. al., 2011; RESTREPO VICTORIA, 2012).

Embora apresente potenciais energético e ambiental expressivos, a palha possui teores elevados de inorgânicos que intensificam efeitos de corrosão e incrustação nas caldeiras, dificultando com isto sua aplicação, principalmente em equipamentos existentes a carvão. No exemplo mencionado da usina de Studstrup, os anos iniciais de testes com a palha foram marcados por dificuldades operacionais, tornando necessário o trabalho junto a fornecedores para obtenção de material com maior controle de qualidade e umidade (<25%), além de ter limitado sua participação no mix em apenas 10% (VAN LOO, 2008). Em estudo nacional direcionado ao setor sucroalcooleiro, o PROJETO SUCRE (2019) apresenta dificuldades relacionadas à queima da palha em caldeiras, como incrustações severas e instabilidade de chama devido ao alto teor de voláteis, tendo proposto rotas de processamento da palha para lavagem e eliminação dos principais contaminantes previamente à sua queima. Ainda em torno do setor sucroalcooleiro, ao avaliar alternativas para aproveitamento da palha residual, JOPPERT (2019) conclui que o recolhimento da palha no campo adiciona custo operacional relevante ao processo, visto que é um material de baixa densidade e por isto requer maior esforço de transporte, além de apresentar potencial mais nobre ao ser aproveitada como fonte de celulose adicional para geração de etanol 2G, ou mesmo biogás, ao invés de ser queimada para geração de vapor.

Devido aos precedentes de elevada dificuldade operacional da palha e de restrições à sua inserção em equipamentos originalmente projetados para carvão, a palha como opção de biomassa não é objeto deste estudo.

2.5 Análise do Ciclo de Vida

Quando se pretende avaliar de forma ampla os impactos ambientais decorrentes de uma substituição energética como a proposta neste plano, utiliza-se a análise de ciclo de vida (ACV) para estudar as configurações de rotas tecnológicas, levantar dados operacionais e analisar os consumos específicos de combustível e emissões em todo o processo, desde a extração da matéria-prima até sua queima e conversão para eletricidade.

Na literatura, registra-se interesse pela comparação entre os ciclos de vida do carvão e da biomassa desde trabalhos como o de SPATH et. al. (1998), que executaram esta análise para tecnologias de queima de carvão pulverizado e ciclos combinados de gaseificação de madeira. Já se concluía naquele momento sobre a vantagem da biomassa em relação ao carvão tanto em termos de emissões de CO₂ quanto de eficiência energética.

A necessidade pela atualização de estudos como este se dá pela constante renovação das tecnologias empregadas na geração termelétrica e pela evolução das políticas ambientais, que impõem rigor crescente nas taxas de emissões atmosféricas permitidas. A ACV também tem maior valor quando foca em determinado país ou região, pois aborda aspectos locais dos processos de extração e consumo das matérias-primas e especifica com maior precisão as características dos combustíveis estudados.

Tem-se exemplo de ACV aplicado ao caso brasileiro no trabalho de FLÓREZ-ORREGO et. al. (2014), que estudou os custos exergéticos e emissões de CO₂ resultantes dos processos de geração elétrica a partir de todos os principais combustíveis presentes na matriz energética nacional, inclusive carvão mineral e biomassa. Concluiu-se que a queima de biomassa possuía elevado custo exergético em comparação aos demais combustíveis, porém somente uma pequena fração deste custo era não-renovável. Em termos de emissões específicas de CO₂, a biomassa apresentava grande vantagem em relação ao carvão, que era o combustível mais poluente dentre todos neste quesito. Ressalva é feita sobre a biomassa estudada neste trabalho, que para efeitos de simplificação foi representada apenas pelo bagaço-de-cana, pois é a matéria-prima predominante no grupo da biomassa para geração termelétrica no Brasil.

Estudo aprofundado sobre o ciclo de vida dos pellets de madeira no Brasil foi conduzido na tese de PEREIRA (2018), que comparou as cadeias produtivas de cavaco e de pellets de madeira, especialmente derivados de pinus e eucalipto, que são as duas espécies mais cultivadas nacionalmente. O autor concluiu que, considerando a mesma eficiência de conversão energética para ambas as rotas tecnológicas, as emissões de CO₂ são muito similares, mas a rota do pellet consome menos combustíveis fósseis que a rota do cavaco em prazo de 25 anos de utilização. A área de terra requerida na rota do pellet também é significativamente menor do que a do cavaco, para cada MWh/ano produzido.

Adiante, no capítulo 3, são apresentadas modelagens dos ciclos de vida do carvão mineral e dos tipos de biomassa considerados representativas do caso brasileiro, que servirão de base para o cálculo dos desempenhos energético e ambiental de todos os combustíveis, a serem comparados no capítulo 4.

Não foi parte deste estudo o uso de softwares específicos para a ACV, a exemplo do SimaPro (PRé Sustainability, 2024) ou o openLCA (GreenDelta, 2024), pois se considerou que os cálculos relativos ao ciclo de vida nestes casos são de baixa complexidade e que a coleta de premissas referentes aos ciclos dos diferentes tipos de biomassa é própria para os casos estudados, portanto dificultando a aplicação dos bancos de dados típicos oferecidos nos softwares.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentadas as configurações típicas empregadas na geração elétrica a partir do carvão, os procedimentos de cálculo a serem aplicados para análise exérgica e as hipóteses e dados levantados para as rotas tecnológicas de combustíveis analisadas neste trabalho.

3.1 Materiais e Procedimentos de Pesquisa

Para cálculos de ciclos termodinâmicos é utilizado o *software* PowerFNESS®, que permite a modelagem de ciclos de geração elétrica e de calor por meio de redes de linhas e nós. O software resolve os balanços de massa, energia e entropia dos ciclos através de algoritmo numérico que lineariza as equações de balanço. O sistema é determinado de acordo com condições de contorno de pressão, vazão e temperatura impostas pelo usuário. O software conta também com base de dados de propriedades termodinâmicas para combustíveis e fluidos de trabalho pertinentes: água, ar e gases de combustão.

3.2 Configurações de Centrais Termelétricas

Pelo termo “centrais termelétricas” adotado no título deste trabalho, compreendem-se tanto usinas termelétricas, cuja finalidade exclusiva é a geração de energia elétrica, quanto centrais de cogeração, cujos produtos são energia elétrica e calor para processo, simultaneamente. Ambos os tipos são presentes dentre os grandes geradores de eletricidade baseados em carvão listados na Tabela 2.1. A definição dos ciclos termodinâmicos representativos das centrais termelétricas é fundamentada na literatura e não é descrita no corpo principal deste trabalho. São apresentados a seguir os ciclos típicos de trabalho em cada tipo de central.

3.2.1 Usinas Termelétricas (Geração Pura)

O ciclo típico das usinas termelétricas é do tipo Rankine, conforme representado na Figura 3-1.

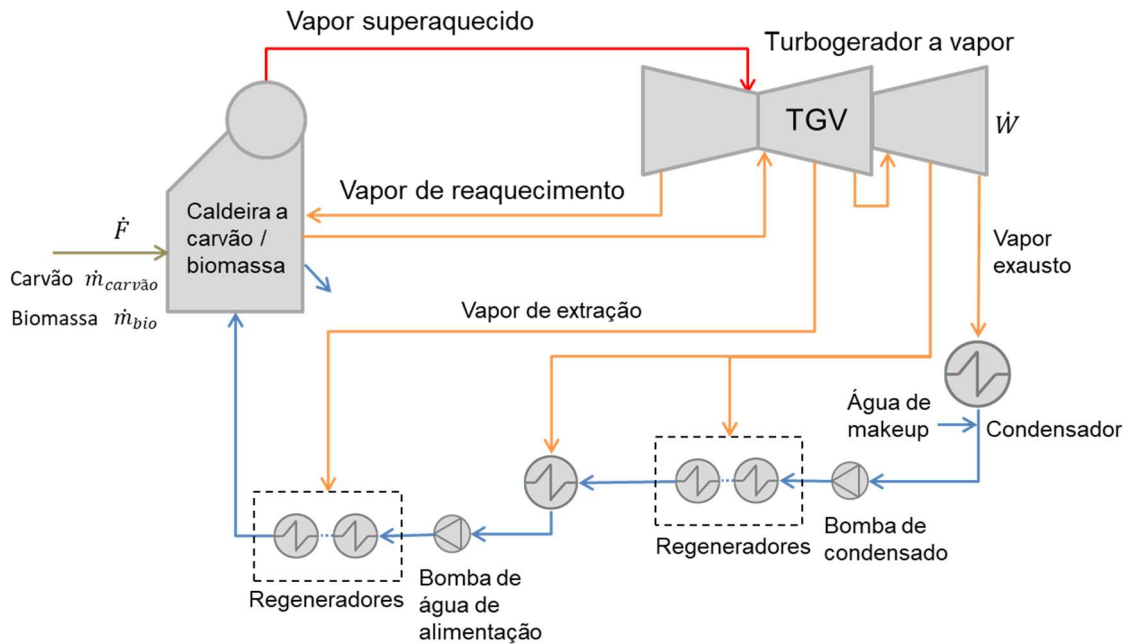


Figura 3-1 – Fluxograma simplificado do ciclo típico das usinas termelétricas.

Fonte: Elaboração do autor.

Na condição atual das usinas termelétricas avaliadas, apenas carvão é queimado nas caldeiras, que podem ser de leito fluidizado ou queima pulverizada. O vapor de alta pressão é expandido no TGV, que conta com uma extração. O vapor de extração alimenta o desaerador, que promove regeneração do condensado antes de ser bombeado novamente à caldeira pelas bombas de água de alimentação.

As usinas termelétricas a carvão operantes no Brasil podem apresentar variações em relação a este ciclo típico quanto ao número de equipamentos. Para adequar a capacidade da usina aos equipamentos disponíveis no mercado e para que se garanta flexibilidade operacional, é comum que a usina conte com mais de uma caldeira e mais de um TGV. Neste trabalho, o conhecimento exato do número de equipamentos em cada central não é relevante, mas sim os desempenhos globais de consumo de combustível e geração de eletricidade. Não é objeto deste trabalho abordar peculiaridades dos equipamentos presentes em cada central.

Em cenários a serem analisados neste trabalho que representem a condição futura de operação destas usinas após a inclusão de biomassa, são avaliados tanto cenários de queima conjunta de biomassa e carvão nas caldeiras existentes, quanto cenários de substituição total do carvão pela biomassa, naqueles casos em que o tipo de biomassa e o modelo da caldeira viabilizarem esta alternativa.

3.2.2 Centrais de Cogeração

As centrais típicas de cogeração são modeladas conforme representação da Figura 3-2.

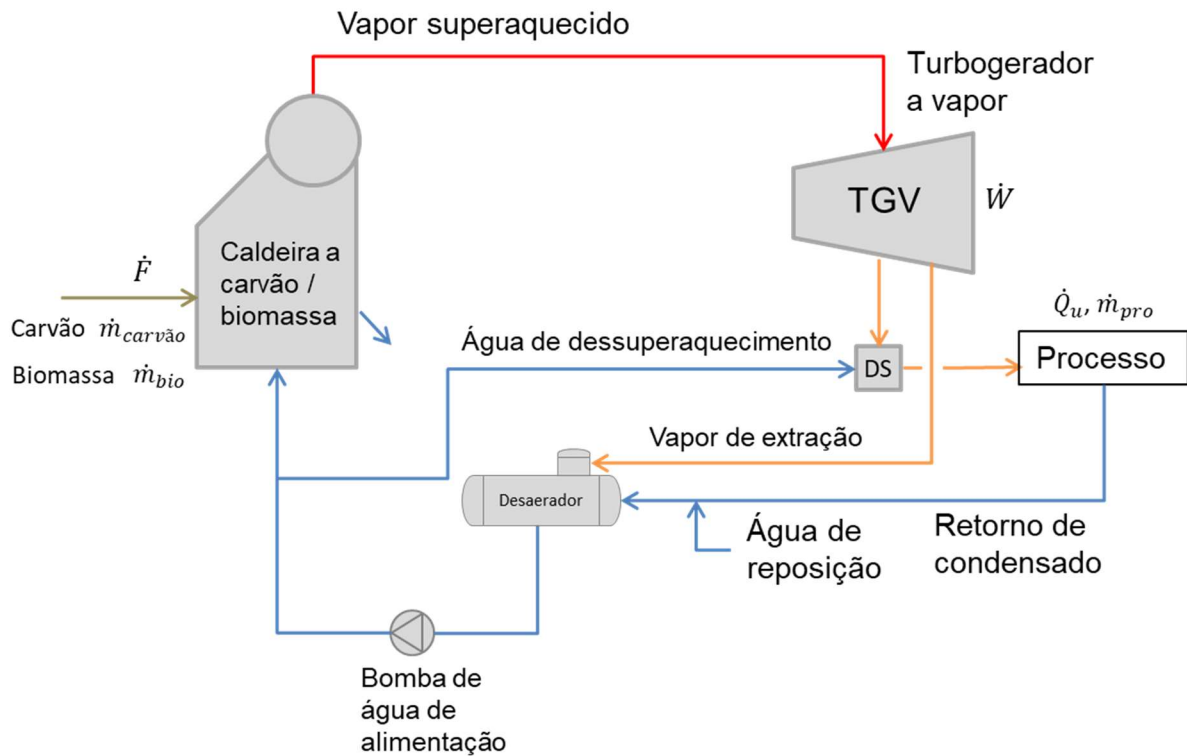


Figura 3-2 – Fluxograma simplificado do ciclo típico das centrais de cogeração.

Fonte: Elaboração do autor.

Estas centrais estão presentes em grandes indústrias que necessitem de grande volume de vapor para processo e a partir disto aplicam o conceito da cogeração por possuir vantagem econômica em relação à aquisição de energia elétrica das concessionárias locais. As centrais abordadas neste trabalho geralmente são tipo *bottoming* (AL MOUSSAWIA et. al., 2017), sendo projetadas primariamente para atendimento do processo, e por consequência geram energia elétrica que atende parcialmente à demanda da fábrica, sendo esta complementada por energia comprada da concessionária.

Em diferentes estágios da turbina, o vapor de extração é extraído de forma controlada ou não controlada do TGV, para envio ao processo ou ao próprio desaerador. No vapor direcionado ao processo, após controle da pressão, o condicionamento do vapor é completado pelo desuperaquecedor (DS), que resfria o vapor a partir da injeção de água proveniente das bombas de água de alimentação.

Assim como no caso das usinas termelétricas, as centrais de cogeração ativas no Brasil apresentam configurações com mais caldeiras e mais turbogeradores do que é representado no esquema típico, porém isto é pouco relevante para a análise de impactos em âmbito nacional aqui proposta.

3.2.3 Principais premissas

A Tabela 3.1 apresenta parâmetros típicos de operação para as duas configurações estudadas.

Tabela 3.1 Principais parâmetros de operação para as configurações de Cogeração e Geração Pura

Parâmetro de Processo	Unidade	Cogeração	Geração Pura
Caldeira			
Tipo	-	QP / LF	QP
Pressão do vapor	bar a	85	170
Temperatura do vapor	°C	485	540
Rendimento térmico	%	90	91
Turbogerador			
Pressão do vapor exausto	bar a	15	0,085
Rendimento térmico	%	84	86
Perdas Gerador / Redutor	%	3	2
Demanda de Calor do Processo			
Fluxo de vapor	t/h	500	-
Pressão do vapor	bar a	15	-
Temperatura do vapor	°C	210	-
Retorno de condensado			
Taxa de retorno	%	90	100
Temperatura	°C	100	43
Água de makeup			
Temperatura	°C	25	25

QP: Queima Pulverizada. LF: Leito Fluidizado.

Fonte: Elaboração do autor.

Dado que duas das três centrais de Cogeração a carvão listadas pela ANEEL estão presentes em refinarias de alumina (EPE, 2020; ANEEL, 2023), então na configuração de Cogeração foi admitido que o processo demandará vapor de baixa pressão a 15 bar, que é o nível representativo para tais refinarias (EPE, 2017).

Nos casos com queima parcial ou total de biomassa, é previsto que haja prejuízo na eficiência do equipamento em comparação à eficiência de referência válida para o carvão. TILLMAN (2001) e VAN LOO (2008) sugerem que a redução de eficiência em casos de *co-firing* é função do aumento do excesso de ar provocado pela biomassa, da taxa de carbono não-queimado do combustível e da própria fração de participação da biomassa no mix. Os testes apresentados por TILLMAN (2001) mostram que a inserção de até 20% de serragem em diferentes umidades no mix com carvão provocou reduções entre 1% e 2% da sua eficiência, tendo concluído que as perdas de eficiência decorrentes da presença de biomassa são relativamente pequenas e admissíveis. Com base nestas referências e no relato de fornecedores com experiência em conversões de caldeira a carvão para biomassa, adotaram-se os seguintes prejuízos às eficiências, com relação aos valores de referência para o carvão:

- Cenários de queima parcial de biomassa: redução de 1,0 ponto percentual;

- Cenários de queima total de biomassa: redução de 1,5 pontos percentuais.

3.2.4 Cenários selecionados

A Tabela 3.2 reúne os cenários selecionados para análise, em função de sua configuração (Cogeração ou Geração Pura), modelo de caldeira (Queima Pulverizada ou Leito Fluidizado) e mix de combustíveis. As porcentagens do mix são em termos energéticos.

Tabela 3.2 Cenários selecionados para análise.

Configuração	Modelo	Carvão	Biomassa	
		Mix	Tipo	Mix
Cogeração	QP	100%	-	-
Cogeração	QP	-	PEL	100%
Cogeração	QP	-	SER	100%
Cogeração	QP	80%	PEL	20%
Cogeração	LF	100%	-	-
Cogeração	LF	-	PEL	100%
Cogeração	LF	-	CVC	100%
Cogeração	LF	80%	PEL	20%
Cogeração	LF	80%	CAA	20%
Geração Pura	QP	100%	-	-
Geração Pura	QP	-	PEL	100%
Geração Pura	QP	-	SER	100%
Geração Pura	QP	80%	PEL	20%

Fonte: Elaboração do autor.

Enquanto nas usinas termelétricas de Geração Pura no Brasil o modelo predominante de caldeira é o de Queima Pulverizada, dentre as centrais de Cogeração há exemplos de caldeiras instaladas tanto de Queima Pulverizada quanto de Leito Fluidizado, por isto a consideração de ambos os modelos para esta configuração. Dado que a caldeira de Leito Fluidizado é mais flexível a combustíveis mais úmidos e de maior granulometria, como o cavaco de eucalipto e o caroço de açaí, então torna-se relevante sua inclusão juntamente à de Queima Pulverizada, que é restritiva a combustíveis mais secos e de pequena granulometria.

Conversões de caldeira a carvão para a queima parcial ou total de pellets de madeira são o exemplo mais recorrente de conversões de carvão para biomassa, como é mostrado no histórico presente na seção 3.7 adiante. As possíveis aplicações de combustíveis menos processados do que os pellets, como o cavaco, a serragem e o caroço de açaí não são viáveis no caso europeu, já que a biomassa é predominantemente importada na forma de pellets, mas é cenário viável no Brasil, onde há abundância de resíduos agroflorestais, conforme discutido na seção 2.4.

Quanto aos cenários de *co-firing* de carvão e biomassa, adotou-se o percentual de 20% de inclusão da biomassa, seja de pellets ou de caroço de açaí, pois é fração típica mais frequente em casos de *co-firing*, geralmente não ultrapassada em caldeiras de queima pulverizada

(FERNANDO, 2012). Entretanto, exemplos de maior participação da biomassa no mix são relatados por fornecedores e são estudados por trabalhos como o de OLIVEIRA (2022), que concluiu em experimento com forno de queda livre que a presença de serragem em proporção de até 40% ainda apresenta bom comportamento em *co-firing* com o carvão, sob os aspectos de eficiência da queima e emissões de CO e NO. A necessidade pelo atendimento de metas de descarbonização aumenta o interesse do setor energético a investigar a inserção de maiores proporções de biomassa em *co-firing* com o carvão, devendo tornar estes casos cada vez mais frequentes no setor.

3.3 Análise Exergética

Em ciclos de cogeração, o rendimento está associado ao uso da energia elétrica e da energia térmica útil e ao aporte energético na forma de combustível utilizado para produzir a energia elétrica e o calor. O rendimento é definido pela equação (1):

$$\eta_e = \frac{\dot{W} + \dot{Q}_u}{\dot{F}} \quad (1)$$

Onde \dot{W} [kW] é o trabalho líquido gerado no ciclo, \dot{Q}_u [kW] é a taxa de calor útil transferida na cogeração e \dot{F} [kW] é o input de fluxo de energia na forma de combustível. Este rendimento também é chamado de fator de utilização da energia e é baseado somente na 1ª Lei da Termodinâmica, ou seja, não leva em consideração as diferentes qualidades de calor e trabalho (segundo a 2ª Lei da Termodinâmica).

Nos ciclos típicos das usinas termelétricas, o termo do calor útil é zerado, pois não há finalidade nestas centrais além da geração pura de eletricidade.

Nos ciclos de cogeração, tem-se que:

- $\dot{Q}_u = \dot{m}_{vap}(h_{vap} - h_{rep})$ (2)

- $\dot{F} = \dot{m}_{car} \cdot PCI_{car} + \dot{m}_{bio} \cdot PCI_{bio}$ (3)

Onde os índices *vap* e *rep* se referem às condições do vapor e a da água de reposição, respectivamente. Os índices *car* e *bio* se referem ao carvão e à biomassa, seja ela qual for no cenário avaliado.

Para trabalhar com um valor de rendimento que considere a qualidade da energia, deve-se trabalhar em base exergética. Define-se o rendimento exergético do ciclo de cogeração como:

$$\eta_b = \frac{\dot{W} + \Delta \dot{B}_f}{\dot{B}_q} \quad (4)$$

Onde \dot{W} [kW] é o trabalho líquido gerado no ciclo, $\Delta\dot{B}_f$ [kW] é a taxa de exergia física associada à taxa de calor útil gerado na cogeração e \dot{B}_q [kW] é o fluxo de exergia química na forma de combustível. Assim, no caso dos ciclos considerados, tem-se:

$$\bullet \quad \Delta\dot{B}_f = \dot{m}_{vap}(b_{vap} - b_{rep}) = \dot{m}_{vap}[(h_{vap} - h_{rep}) - T_0 \cdot (s_{vap} - s_{rep})] \quad (5)$$

$$\bullet \quad \dot{B}_q = \dot{m}_{car} \cdot b_{q,car} + \dot{m}_{bio} \cdot b_{q,bio} \quad (6)$$

De forma análoga ao que foi comentado sobre a equação (1), na equação (5) o fluxo de exergia associado ao calor transferido é zerado para os casos das usinas termelétricas, pois não representa um produto útil nessas centrais.

Quanto às exergias químicas dos combustíveis, as mesmas devem ser calculadas separadamente. Estima-se a exergia química por correlações apresentadas por SZARGUT (2005) para combustíveis sólidos, que relacionam a exergia química do combustível ao seu PCI, sua umidade e sua composição elementar, entre outros:

$$b_{q,biom} = \beta \cdot (PCI_{comb} + x_w \cdot h_{lv}) + x_w \cdot b_{q,H_2O,l} + x_S \cdot (b_{q,S} - PCI_S) + x_{CZ} \cdot b_{q,CZ} \quad (7)$$

Onde PCI_{comb} e PCI_S [kJ/kg] são os PCI do combustível e do enxofre respectivamente, x_w [%] é a umidade em base seca, x_S , x_{H_2} , x_{O_2} , x_{N_2} , x_C e x_{CZ} são as frações mássicas em base seca de enxofre, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio, carbono, e cinzas, respetivamente, h_{lv} [kJ/kg] é a entalpia de vaporização da água a 25 °C, $b_{q,H_2O,l}$, $b_{q,S}$ e $b_{q,CZ}$ [kJ/kg] são as exergias químicas padrão da água líquida, enxofre e das cinzas, respectivamente.

O multiplicador β varia conforme a composição mássica do respectivo combustível. Consideraram-se os seguintes:

- Para sólidos em geral, compostos por C, H, O e N ($O/C < 2$):

$$\beta = \frac{1,044 + 0,016(H/C) - 0,3493(O/C)[1 + 0,0531(H/C)] + 0,0493(N/C)}{1 - 0,4124(O/C)} \quad (8)$$

- Para madeira:

$$\beta = \frac{1,0412 + 0,216(x_{H_2}/x_C) + 0,2499(x_{O_2}/x_C)[1 + 0,7884(x_{H_2}/x_C)] + 0,045(x_{N_2}/x_C)}{1 + 0,3035(x_{O_2}/x_C)} \quad (9)$$

- Para carvão:

$$\beta = 1,0437 + 0,1896(x_{H_2}/x_C) + 0,2499(x_{O_2}/x_C) + 0,0428(x_{N_2}/x_C) \quad (10)$$

- Para combustíveis líquidos (ex: diesel):

$$\beta = 1,041 + 0,1728(x_{H_2}/x_C) + 0,0432(x_{O_2}/x_C) + 0,2169x_S/x_C(1 - 2,0628x_{H_2}/x_C) \quad (11)$$

Por fim, para a fonte energética do diesel, que é utilizado em etapas do ciclo de vida dos combustíveis anteriores à conversão energética, utiliza-se a mesma abordagem utilizada por RESTREPO VICTORIA (2012), que propõe calcular valores de exergia equivalentes assumindo que o diesel seja utilizado por uma “máquina térmica fictícia”, com eficiência térmica equivalente à eficiência do ciclo termodinâmico da central termelétrica, η_e . O equivalente exergético passa a ser calculado conforme a equação (12):

$$\bullet \dot{B}_{eq} = \dot{m}_{Diesel} \cdot PCI_{Diesel} \cdot \eta_e \quad (12)$$

O ciclo de vida dos combustíveis e respectivos fluxos exergéticos são resumidos na Figura 3-3.

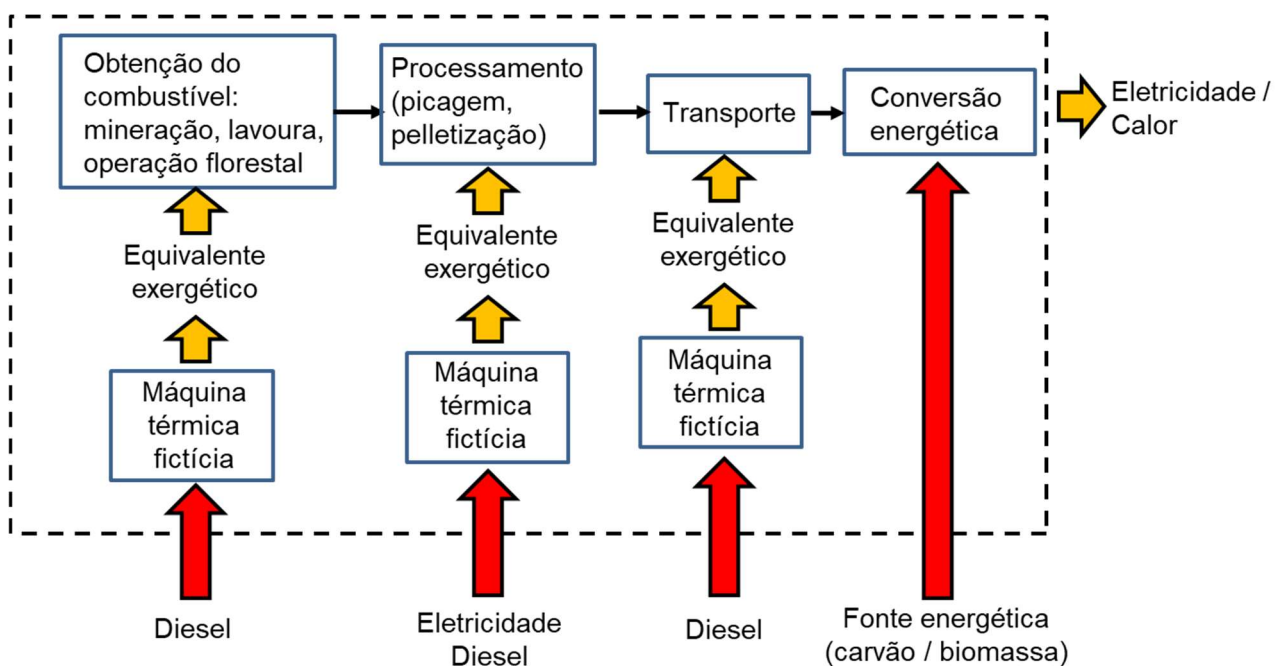


Figura 3-3 – Fluxos e fronteiras do ciclo de vida dos combustíveis.

Fonte: Adaptado de RESTREPO VICTORIA (2012).

3.4 Caracterização dos Combustíveis

Derivados de eucalipto e caroço de açaí são contemplados como combustíveis candidatos para substituição do carvão, dada sua abundância como resíduos agroflorestais e seu potencial de plantio em grande escala, conforme discutido na seção 2.4. Composições elementares e teor umidade para cada combustível são apresentados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 Composições elementares dos combustíveis selecionados (frações mássicas em base seca).

Elemento	Carvão	Eucalipto	Caroço de açaí
C	69,8%	47,5%	47,0%
H	5,0%	6,1%	6,6%
N	1,5%	1,5%	1,1%
O	13,2%	43,8%	43,6%
S	0,6%	0,0%	0,9%
Cinzas	9,9%	1,1%	0,9%
Umidade	8,0%	40,0% (cavaco) 15,0% (serragem) 7,0% (pellets)	16,5%

Fonte: Elaboração própria, com base em ROHLOFF (2017), PEREIRA (2014), NOGUEIRA (2010).

Das equações (7) a (9) e das composições elementares apresentadas na Tabela 3.3, a exergia química para cada combustível é calculada, como mostrado na Tabela 3.4, assim como a razão entre exergia química e PCI.

Tabela 3.4 - PCI e exergia química para os combustíveis selecionados.

Propriedade	Unidade	Carvão	Cavaco de Eucalipto	Pellets de Eucalipto	Serragem de Eucalipto	Caroço de Açaí
Umidade	%	8%	40%	7%	15%	17%
Densidade aparente	kg/m ³	800	285	657	342	788
PCI (mássico)	MJ/kg	23,5	10,5	16,2	15,8	14,4
PCI (volumétrico)	MJ/m ³	18800	2981	10643	5400	11331
PCI _{biomassa} / PCI _{carvão} (volumétrico)	-	-	16%	57%	29%	60%
bq	MJ/kg	26,3	11,9	16,9	16,7	15,4
bq/PCI	-	1,12	1,14	1,05	1,06	1,07

Fonte: Elaboração própria, com base em ROHLOFF (2017), PEREIRA (2014), PEREIRA (2018), OBIDZINSKI (2019), NOGUEIRA (2010).

Como apresentado na Tabela 3.4, tanto o pellet de eucalipto quanto o caroço de açaí resultaram em valores relativamente baixos da razão entre exergia química e PCI, variando entre 1,04 e 1,08, o que é causado pelo seu baixo teor de umidade. Combustíveis *in natura* como o cavaco, que possuem teor de umidade de até 40%, resultam em razões mais elevadas, de até 1,14, o que prejudica significativamente a eficiência exérgica de suas respectivas configurações.

Embora os pellets e o caroço de açaí sejam tipos de biomassa com densidades energéticas relativamente elevadas, de até 11.330 MJ/m³, eles ainda são menos densos que o carvão e requerem adaptações no pátio de combustível e na caldeira propriamente dita no sentido de ampliação do volume ocupado. Esta ampliação causa impactos principalmente na área destinada à pilha de armazenamento de combustível, no dimensionamento de transportadores e nos queimadores propriamente ditos.

3.5 Cálculo de Emissões

Para cálculo de emissões de gases de efeito estufa (GEE), o Programa Brasileiro GHG Protocol (GHG BRASIL, 2023) propõe metodologia e disponibiliza ferramenta de cálculo que permite consultar fatores de emissão e calcular emissões conforme escopos 1, 2 e 3.

Como este trabalho trata da combustão de diferentes tipos de biomassa e nem todas possuem fatores de emissão pré-determinados pelo GHG Protocol, então optou-se por calcular as emissões de CO₂ a partir da composição adotada para os combustíveis e resolução estequiométrica da reação de combustão, mas utilizando a ferramenta GHG Protocol (GHG BRASIL, 2023) como apoio em parte das premissas. São calculadas taxas de emissão de CO₂, em [kg CO₂/kg comb], que são aplicadas mais adiante para cada cenário estudado. As taxas de emissões para o carvão e biomassa são calculados como:

Carvão e biomassa:

$$TaxaEmissão_{CO_2} = \dot{m}_{CO_2} / \dot{m}_{comb} = (1 - x_w) \cdot x_c \cdot M_{CO_2} / M_C \quad (13)$$

A partir do resultado da equação 13, calculam-se as taxas de emissão de CO₂e e CO₂ biogênico, através das equações 14 a 16.

Carvão:

$$TaxaEmissão_{CO_2e} = TaxaEmissão_{CO_2} \quad (14)$$

Biomassa:

$$TaxaEmissão_{CO_2e} = 1,7\% \cdot TaxaEmissão_{CO_2} \quad (15)$$

$$TaxaEmissão_{CO_2biogênico} = TaxaEmissão_{CO_2} \quad (16)$$

Nas equações consta o conceito de CO₂ biogênico, significando o CO₂ proveniente de combustíveis renováveis, que naturalmente é absorvido durante o ciclo de crescimento da fonte renovável, não resultando em saldo adicional de CO₂ lançado à atmosfera, mesmo após combustão do material. O CO₂ de origem fóssil e outros gases que contribuam para o efeito estufa e tenham equivalências ao carbono são tratados como CO₂e (equivalente). Nestes casos, tanto o metano (CH₄) quanto o óxido nitroso (N₂O) são gases com equivalências ao CO₂ respectivamente de 28 e 265 (GHG BRASIL, 2023).

No caso do carvão, considera-se que todo o CO₂ gerado é de origem fóssil, não havendo emissão relevante de CH₄ e N₂O. Já na biomassa, todo o CO₂ é considerado biogênico, porém há emissões de pequena escala de CH₄ e N₂O. Para esta proporção entre emissões não biogênicas e biogênicas, foi adotado o fator de 1,7%, baseado em resultados da ferramenta do GHG para outros tipos de biomassa.

Por fim, para cálculo das emissões devido à queima do óleo diesel em etapas do ciclo de vida, utilizam-se as expressões 17 e 18 (GHG BRASIL, 2023): É admitido na ferramenta que todo o óleo diesel comercial consumido no Brasil possui parcela de 10% em biodiesel e 90% em óleo diesel puro. Por isto, todas as emissões decorrentes do diesel mostradas neste trabalho terão pequena parcela de CO₂ biogênico, justamente pela participação do biodiesel.

Óleo diesel:

$$TaxaEmissão_{CO_2e} = 90\% \cdot Fator_{CO_2,Diesel Puro} \quad (17)$$

$$TaxaEmissão_{CO_2biogênico} = 10\% \cdot TaxaEmissão_{CO_2,Biodiesel} \quad (18)$$

Sendo:

$$Fator_{CO_2,Diesel Puro} = 2,603 \text{ kg } CO_2/l$$

$$Fator_{CO_2,Biodiesel} = 2,431 \text{ kg } CO_2/l$$

Os resultados de emissões são apresentados adiante no capítulo 4, onde são diferenciadas em cada tabela as emissões de CO₂e e CO₂ biogênico, seguindo os moldes descritos nas normas GRI (2016). As normas GRI são amplamente utilizadas por organizações que publicam em relatórios de sustentabilidade sobre seus próprios impactos relacionados às emissões.

3.6 Ciclo de Vida

3.6.1 Rota Tecnológica do Carvão Mineral

Para mapeamento das etapas do ciclo de vida do carvão foi utilizado o trabalho de RESTREPO VICTORIA (2012) como principal referência, que estabeleceu suas premissas em torno da operação do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda, localizado em Capivari de Baixo, SC, cujos principais parâmetros operacionais são:

- Potência elétrica gerada: 45,8 MW (operação em 2020);
- Características do vapor gerado: 185 t/h, 89 bar, 510°C;
- Consumo de carvão: 8,4 t/h;
- Eficiência global da UTE: 30%

O levantamento de parâmetros operacionais envolvidos desde a mineração até a queima do carvão nas caldeiras permite calcular taxas específicas de consumo energético e emissões de carbono em função da massa de carvão processado/movimentado. As principais etapas

identificadas para o ciclo de vida do carvão e respectivos insumos e efluentes gasosos produzidos em cada etapa são apresentadas na Figura 3-4.

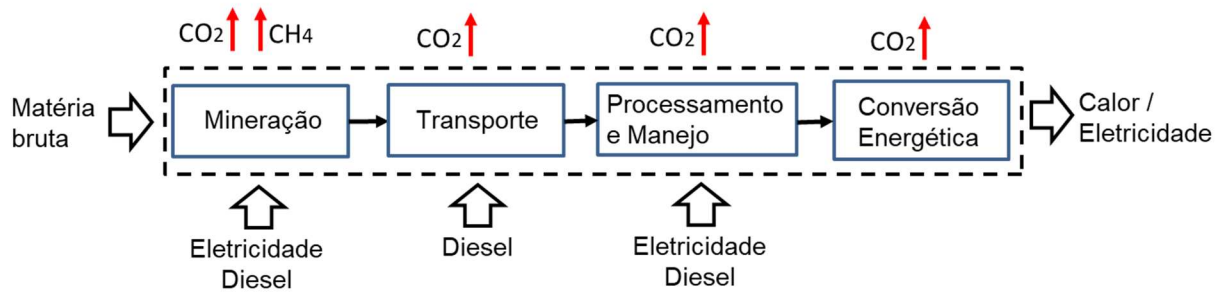


Figura 3-4 Modelo da rota tecnológica do carvão mineral consumido em centrais termelétricas existentes. Fonte: Elaboração própria, com base em RESTREPO VICTORIA (2012).

É objeto deste trabalho avaliar o desempenho operacional do uso de carvão mineral e eventuais transições de combustível em centrais termelétricas existentes, portanto foram excluídas do limite desta análise o consumo de energia e emissões decorrentes da construção e descomissionamento dos equipamentos da usina, que deveriam ser consideradas caso se pretendesse analisar o uso do carvão como energia nova.

Nota-se ainda na Figura 3-4 que, além das emissões de CO_2 provenientes da própria combustão do carvão e do consumo de óleo diesel em equipamentos nas etapas produtivas, também é relevante a contabilização da emissão de CH_4 na etapa de mineração. O metano é produzido durante o processo de formação do carvão e é gradualmente liberado para a atmosfera na medida em que camadas de carvão são quebradas e desconfinam o gás. LENZEN (2008) estima que a contribuição do metano na emissão total de CO_2 equivalente pode situar-se entre 1% e 9%.

Os parâmetros coletados do trabalho de RESTREPO VICTORIA (2012) pertinentes a esta análise são:

- Mineração do carvão envolve consumo de diesel e eletricidade para abastecimento de maquinário e equipamentos: 1,3 kg diesel/t carvão; 46,1 kWh/t carvão.
- Mineração também provoca liberação de gases relevantes à contabilização das emissões de efeito estufa: 2,44 kg CH_4 /t carvão; 0,224 kg CO_2 /t carvão.
- Transporte do carvão é feito por misto entre modal rodoviário entre a usina de beneficiamento até o centro de armazenagem, em trecho de 20 km, e modal ferroviário desde o centro de armazenagem até a UTE, em trecho de 80 km, contabilizando ida e volta, resultando em: 1,14 kg diesel/t carvão.

- Processamento e manejo do carvão na UTE, envolvendo equipamentos como moegas vibradoras de recebimento, peneiras vibratórias e esteiras transportadoras, totalizando aproximadamente: 119 kWh/t carvão; 3,4 kg diesel/t carvão.

3.6.2 Rota Tecnológica do Cavaco e Pellets de Eucalipto

Para identificação das etapas no ciclo de vida do cavaco e do pellet de eucalipto e coleta de parâmetros de operação, foi utilizada como principal referência o trabalho de PEREIRA (2018), que desenvolveu análise exergoambiental da cadeia produtiva para comparar as rotas dos dois materiais, quando utilizados como biomassa para fins energéticos. A Figura 3-5 e a

apresentam as rotas para o cavaco e para o pellet, respectivamente, e os principais insumos consumidos em cada etapa.

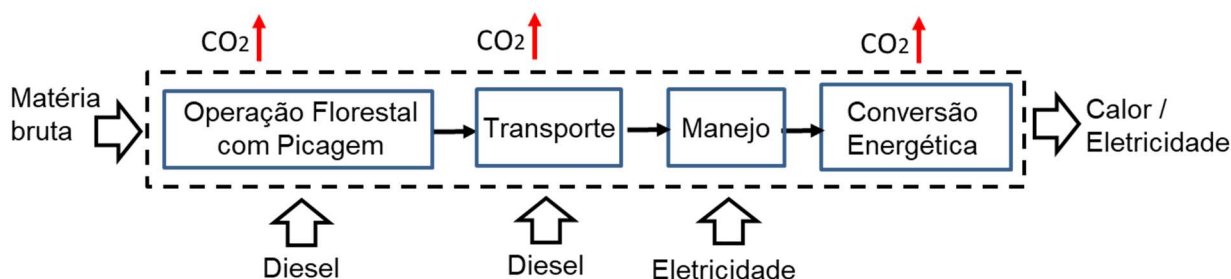


Figura 3-5 - Modelo da rota tecnológica do cavaco de eucalipto.

Fonte: Adaptado de PEREIRA (2018).

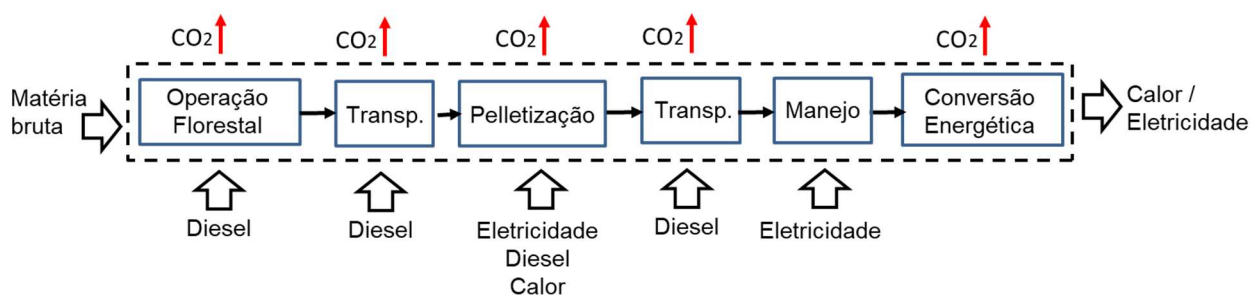


Figura 3-6 - Modelo da rota tecnológica do pellet de eucalipto.

Fonte: Adaptado de PEREIRA (2018).

Analogamente à modelagem da rota do carvão mineral, não se pretende contabilizar para o eucalipto o consumo energético e as emissões decorrentes das etapas de construção e descomissionamento dos equipamentos integrantes da unidade de processamento e da central termelétrica que consumirá a biomassa. É admitido que a biomassa será consumida em centrais termelétricas existentes, não em centrais de energia nova.

Como é comentado por PEREIRA (2018), dado que as atividades de silvicultura do eucalipto possuem baixo nível de mecanização quando comparadas com as etapas seguintes de derrubada, corte, picagem e transporte, então o consumo de diesel nessa etapa pode ser considerado desprezível na análise do ciclo completo do material. Justifica-se com isto a omissão da etapa de silvicultura nas rotas ilustradas pelas duas figuras.

As premissas para cálculo do consumo energético e emissões de carbono ao longo das etapas do ciclo de vida do cavaco e pellets são descritas a seguir.

Etapas comuns ao cavaco e aos pellets:

- Extração florestal executada por equipamentos harvester, forwarder e charger, envolvidos nas ações de derrubada, arraste e traçamento (toragem) da madeira em pé: 2,1 l diesel/t madeira (PEREIRA, 2018).
- Manejo do combustível na central termelétrica de forma automatizada, por esteiras transportadoras acionadas eletricamente, estimado como a fração do consumo elétrico total estabelecido para o manejo do carvão (119 kWh/t carvão) correspondente apenas às esteiras transportadoras, excluindo-se moegas e peneiras vibratórias ausentes no sistema da biomassa, resultando em: 70,5 kWh/t biomassa.

Etapas exclusivas ao cavaco:

- Picagem em campo por picadores móveis, a diesel, seguida da formação de pilhas de armazenamento de cavaco em pátio local: 2,3 l diesel/t madeira.
- Transporte de cavaco por modal rodoviário, em raio médio de 150 km: 1,5 km/l diesel. Para fins do cálculo de consumo energético e emissões desta etapa do ciclo de vida, são contabilizadas ida e volta dos caminhões.

Etapas exclusivas aos pellets:

- Transporte de toras por modal rodoviário, em raio médio de 150 km: 1,5 km/l diesel, contabilizando ida e volta dos caminhões, com volume de 100 m³.
- Processamento completo das toras para produção de pellets conforme etapas ilustradas na Figura 3-7. A maior parte das etapas depende unicamente de eletricidade para ativação dos equipamentos; a secagem depende também da queima de biomassa auxiliar para geração de calor. 0,48 l diesel/t madeira; 174 kWh/t madeira; 1,85 MJ calor/t madeira (PEREIRA, 2018).
- Transporte de pellets por modal rodoviário, em raio médio de 100 km: 1,5 km/l diesel, contabilizando ida e volta dos caminhões, com volume de 100 m³.

A diferenciação entre as rotas do cavaco e dos pellets se dá pelo tipo de equipamento utilizado na picagem e na forma com que a madeira é transportada. Em aplicações de cavaco, a picagem da madeira costuma ocorrer no próprio campo onde as toras foram derrubadas, por picadores móveis alimentados a diesel, em seguida sendo transportada na forma de cavaco para os pontos consumidores. Na rota dos pellets, cujo processamento é mais complexo e naturalmente requer infraestrutura própria além da floresta, é preferível que a madeira seja transportada em forma mais compacta (toras) e que todo o processamento ocorra num mesmo local, passando por picagem, secagem e compactação. Por isto, no caso dos pellets, considerou-se picagem por equipamento estacionário, acionado eletricamente. Após finalização do pellet, há nova etapa de transporte desde a unidade produtiva até a indústria ou usina consumidora.

Em ambas as rotas, é seguido o conceito de que a biomassa chegue aos pontos consumidores já na forma pronta para queima nas caldeiras, não dependendo de processamento adicional, já que tais usinas ou indústrias costumam não possuir infraestrutura disponível para receber os sistemas necessários a estas etapas: pátio para armazenamento de toras, picadores, secadores, entre outros. Além disso, não é interessante levar à fábrica os riscos atrelados a tais etapas de processamento, como acúmulo de pó, ruídos e exposição de operadores a equipamentos de corte e moagem.



Figura 3-7 - Etapas de processamento do pellet de eucalipto.

Fonte: PEREIRA (2018).

3.6.3 Rotas Tecnológicas da Serragem e Carço de Açai

A Figura 3-8 e Figura 3-9 apresentam as etapas no ciclo de vida da serragem e caroço de açai contempladas neste estudo.

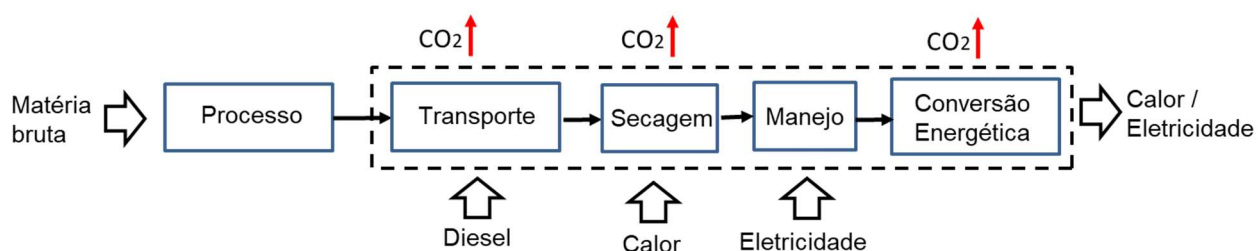


Figura 3-8 Rota tecnológica de resíduos: Serragem

Fonte: Elaboração própria.

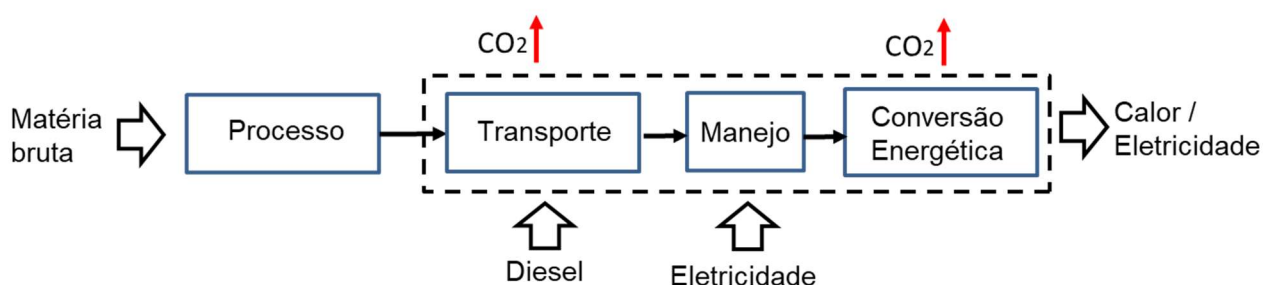


Figura 3-9 Rota tecnológica de resíduos: Carço de Açai

Fonte: Elaboração própria.

Diferentemente do carvão, dos pellets e cavaco de eucalipto, a serragem e o caroço de açai considerados nesta análise são residuais de processos já existentes, portanto não se contabilizam os insumos consumidos em seu processamento como integrantes do ciclo de vida do combustível para fins de conversão energética. Os insumos e emissões são contabilizados a partir da coleta destes materiais nos respectivos locais produtores e seu transporte à central termelétrica.

No caso da serragem, é admitida etapa adicional de secagem, para redução da umidade do material de 40% para 15%, considerada umidade máxima que permita bom resultado para a moagem e pulverização na caldeira (CAILLAT, 2013).

As premissas adotadas nestes casos são:

- Transporte dos resíduos por modal rodoviário, em raio médio de 150 km: 1,5 km/l diesel, contabilizando ida e volta dos caminhões, com volume de 100 m³.
- Calor para secagem da serragem, com queima de biomassa auxiliar 0,82 MJ calor/t serragem.

- Manejo do combustível na central termelétrica de forma automatizada, por esteiras transportadoras acionadas eletricamente, com premissa semelhante à descrita para os pellets e cavaco de eucalipto: 70,5 kWh/t biomassa.

3.7 Impactos nas Caldeiras

3.7.1 Comparação entre Modelos

A Tabela 3.5 resume as principais diferenças entre os dois modelos de caldeiras presentes nas centrais termelétricas a carvão selecionados para análise.

Tabela 3.5 – Energia e emissões de CO₂ nas etapas do ciclo de vida do cavaco de eucalipto, para cada tonelada de combustível.

	Queima Pulverizada	Leito Fluidizado Circulante
Potência térmica	5 MW - 1000 MW	15 MW - 250 MW
Teor de umidade	< 20%	5% - 60%
Teor de cinzas	< 1%	< 10%
Granulometria	< 5 mm	< 100 mm
Temperatura da fornalha	1300°C - 1400°C	850°C - 900°C
Abatimento de SO _x	Não	Sim
Amolecimento de cinzas	Maior probabilidade	Menor probabilidade

Fonte: Elaboração própria, com base em CAILLAT (2013), UTT (2011), VAN LOO (2008).

Em cada aplicação, o tipo de caldeira é selecionado principalmente em função das características do combustível que receberá. Materiais com maior granulometria são recomendados para leitos fluidizado, enquanto materiais secos e com granulometria pequena são indicados para queima pulverizada (CAILLAT, 2013). É visto na Tabela 3.5 que as caldeiras de queima pulverizada costumam admitir somente combustíveis secos, com no máximo 20% de umidade, devido à dificuldade de pulverização de materiais mais úmidos. Embora haja precedentes como o de TILLMAN (2001), que conduziu testes tanto com serragem seca (umidade de 14%) quanto com serragem “verde” (umidade de até 52%), neste trabalho é adotada premissa conservadora de que a serragem deverá ser queimada com umidade reduzida a 15%, às custas de consumo de calor em sua secagem, como foi estabelecido na caracterização de combustíveis na seção 3.4.

Na Tabela 3.5 também se menciona que a probabilidade de amolecimento de cinzas é menor no caso do leito fluidizado. Isto se deve à melhor distribuição de temperaturas da fornalha no caso do leito fluidizado, como é ilustrado na Figura 3-10. Picos locais de temperatura estimulam a formação de NO_x e aumentam a probabilidade de fusão das cinzas, principalmente no caso de cinzas derivadas de biomassa, cujas temperaturas de amolecimento são menores que a do carvão, como se discutirá na seção 3.7.3 adiante.

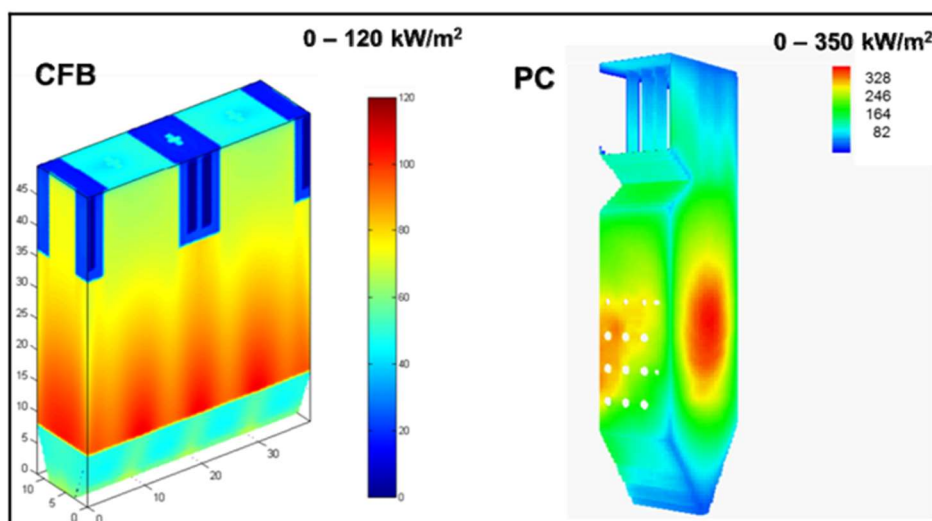


Figura 3-10 – Comparação de fluxos de calor entre caldeiras a carvão de leito fluidizado (LF) e de queima pulverizada (QP). Fonte: UTT (2011).

3.7.2 Histórico de Conversões

Na Europa, há pelo menos duas décadas desenvolveram-se sistemas de conversão de caldeiras a carvão para biomassa, com destaque ao Reino Unido e Dinamarca. A Tabela 3.6 resume os casos levantados a partir de listas de fornecimentos de fabricantes e do relatório energético nacional, no caso do Reino Unido (DUKES, 2023).

Tabela 3.6 – Principais conversões de caldeiras a carvão para biomassa.

Indústria	País	Pot. Elétrica	Pot. Térmica	Ano
		MWe	MWt	
RWE Amer 9	Holanda	631		2019
Vattenfall Uppsala 1	Suécia		130	2018
Koen Yeoungdong 2	Coreia do Sul	200		2018
Lynemouth	Reino Unido	420		2018
Drax 4	Reino Unido	660		2018
Orsted Avedore 1	Dinamarca	258		2016
Orsted Studstrup 3	Dinamarca	362		2016
Atikokan	Canadá		200	2016
Drax 3	Reino Unido	660		2015
Drax 2	Reino Unido	660		2014
Dong Koge 1	Dinamarca	-		2014
Dong Avedore 2	Dinamarca	415		2014
Mondi Swiecie	Polônia		231	2014
Drax 1	Reino Unido	660		2013
Engie Max Green	Bélgica	180		2011
Dalkia Poznan	Polônia		89	2010
Dong Amager 1	Dinamarca	90		2009
Dong Herning 1	Dinamarca	80	125	2009
Dong Avedore 2	Dinamarca	415	585	2003

Fonte: Elaborado pelo autor, com base em: ANDRITZ (2023), BIOFIT (2020), BWE (2023), DUKES (2023), IEA (2007), MHI (2012).

Não se pretende com este levantamento abranger todos os casos de conversão, mas sim reunir número suficiente de precedentes que demonstre a viabilidade técnica de soluções de conversão, especialmente os de participação elevada ou total de biomassa. Listas mais extensas de casos de *co-firing* de biomassa com carvão em quaisquer proporções podem ser encontradas no trabalho de FERNANDO (2012).

Dentre as caldeiras listadas, há equipamentos com capacidade de geração de vapor desde 110 t/h até mais de 1000 t/h, com pressões de vapor entre 60 bar e 300 bar. Quase a totalidade é do tipo queima pulverizada, e foi convertida para a queima de pellets de madeira.

Exceção é feita a dois casos listados pela ANDRITZ (2023), em Swiecie e Poznan, na Polônia, onde se fez a conversão de caldeiras de Leito Fluidizado circulante, para queima de resíduos de madeira *in natura*, com elevada umidade (até 50%). A conversão foi feita tal que a caldeira se mantivesse flexível a queimar 100% de carvão ou 100% de biomassa. No cenário de queima de 100% de biomassa, o fabricante relata que a caldeira opera em capacidade reduzida, entre 75% e 80% da capacidade nominal. Com isto, entende-se que é viável adotar a hipótese do uso de biomassa *in natura* em caldeiras de leito fluidizado, desde que restringindo sua carga em função da redução de aporte energético provido pela biomassa em relação ao carvão. Para cálculo e análise no capítulo 4, é proposto cenário com queima exclusiva de cavaco de eucalipto em caldeiras de Leito Fluidizado em instalações de Cogeração, porém limitando-se a 70% da carga original do equipamento.

3.7.3 Cinzas

As cinzas derivadas da biomassa possuem alta presença de substâncias inorgânicas provenientes de ligações com o próprio carbono do material ou de impurezas que acompanham a biomassa durante as etapas de seu ciclo de vida (VAN LOO, 2008). Durante a combustão, uma fração destes compostos volatiliza e é carregada junto aos gases de exaustão através da fornalha, ainda no estado gasoso, enquanto outra fração é formada no estado sólido e pode tanto ser carregada em suspensão pelos gases (*fly ash*) quanto se depositar no fundo da fornalha (*bottom ash*) até ser drenada por mecanismos de extração de cinzas.

O potássio (K) é um exemplo de composto inorgânico que tende a formar sais volatilizados. Quando estes sais encontram as paredes frias da fornalha e evaporador, provocam incrustações severas e reduzem com isto a produção de vapor e a eficiência da caldeira.

A Tabela 3.7 mostra a composição das cinzas para diferentes tipos de biomassa, assim como suas propriedades de amolecimento e fusão.

Tabela 3.7 – Características das cinzas de tipos diversos de biomassa.

		Cavaco de madeira (pinus)	Casca de madeira (pinus)	Palha de trigo
Teor de cinzas	% (comb, b.s.)	1,0 - 2,5	5,0 - 8,0	4,0 - 12,0
Temp. amolecimento	°C	1410 - 1640	1320 - 1680	860 - 900
Temp. fusão	°C	> 1700	1410 - 1700	1080 - 1120
Si	% (cinzas, b.s.)	4,0 - 11,0	7,0 - 17,0	16,0 - 30,0
Ca	% (cinzas, b.s.)	26,0 - 38,0	24,0 - 36,0	4,5 - 8,0
Mg	% (cinzas, b.s.)	2,2 - 3,6	2,4 - 5,6	1,1 - 2,7
K	% (cinzas, b.s.)	4,9 - 6,3	5,0 - 9,9	10,0 - 16,0
Na	% (cinzas, b.s.)	0,3 - 0,5	0,5 - 0,7	0,2 - 1,0
P	% (cinzas, b.s.)	0,8 - 1,9	1,0 - 1,9	0,2 - 6,7

Fonte: Adaptado de VAN LOO (2008).

A presença destes inorgânicos têm alta influência também nas temperaturas de amolecimento e fusão das cinzas. O próprio potássio e o sódio (Na) exercem efeito de redução da temperatura de amolecimento das cinzas, enquanto o cálcio (Ca) e o magnésio (Mg) exercem efeito de elevá-la (VAN LOO, 2008). Além disso, a sílica (Si) em combinação com K e Na levam à formação de silicatos de baixo ponto de amolecimento, representando riscos também à operação na fornalha. Combustíveis com alto teor de cloro (Cl) também sofrem do risco do desencadeamento de mecanismos de corrosão, através de sua associação ao K e ao Na.

Conforme mostrado na seção 3.7.1, o leito fluidizado é considerado como menos suscetível a picos locais de temperatura, já que possui temperatura de fornalha mais homogênea em relação à queima pulverizada. Isto inibe ocorrências de amolecimento das cinzas. Por outro lado, a operação do leito fluidizado é sensível ao teor de cinzas dos combustíveis, que é menor para os variados tipos de biomassa em relação ao carvão, podendo chegar próximo de 11%, como se estabeleceu nas premissas da Tabela 3.3. A depender do tipo de biomassa utilizada, esta taxa de geração de *bottom ash* será insuficiente para manter a altura e fluidização do leito, exigindo que haja reposição frequente de material inerte para compensação desta evasão de material.

4 RESULTADOS

Com base nas premissas para as rotas tecnológicas estabelecidas no capítulo 3, apresentam-se neste capítulo os resultados para os desempenhos energético, exergético e ambiental do carvão mineral e dos tipos de biomassa avaliados. A análise é dividida entre o Ciclo de Vida (seção 4.1), que representa as etapas desde a extração do combustível da natureza ou da sua coleta como resíduo de processo até sua alimentação na caldeira na central termelétrica, e a Conversão Energética (seção 4.2), que representa sua queima em caldeira em central termelétrica de Geração Pura ou Cogeração. Ao final (seção 4.3) os resultados de Ciclo de Vida e Conversão Energética são consolidados e assim obtém-se a visão completa de cada cenário avaliado.

4.1 Ciclo de Vida

As seções a seguir apresentam os resultados de desempenho energético e ambiental para cada combustível avaliado neste trabalho, dividindo-se entre os grupos: carvão mineral (seção 4.1.1), cavaco e pellets de eucalipto (seção 4.1.2) e resíduos de serraria e caroço de açaí (seção 4.1.3). Na seção 4.1.4, os resultados para todos os combustíveis são resumidos em tabela e comparados.

Conforme apresentado no capítulo 3.3 sobre a metodologia de análise exergética, para avaliação do fluxo de exergia devido à queima de diesel em equipamentos auxiliares é adotada a equação (12), que aplica um conceito de uso de máquina térmica fictícia com eficiência semelhante à do ciclo em que ela está inserida. Por este motivo, já que este trabalho aborda diversos cenários de ciclos termodinâmicos com diferentes eficiências entre si, optou-se por calcular os fluxos exergéticos do Ciclo de Vida somente na etapa de Consolidação dos Resultados, no item 4.3 à frente, onde já estarão estabelecidas as eficiências de cada ciclo e então os fluxos exergéticos devido à queima de diesel poderão também ser calculados.

4.1.1 Desempenho do Carvão Mineral

Os resultados de desempenho do carvão constam na Tabela 4.1. A tabela é organizada por colunas correspondentes a cada etapa do ciclo de vida descrito anteriormente no item 3.6.1, enquanto nas linhas são mostrados os insumos energéticos e fontes emissoras de GEE envolvidos nas etapas.

Tabela 4.1 – Energia e emissões de CO₂ nas etapas do ciclo de vida do carvão mineral, para cada tonelada de combustível.

CAR		Mineração	Transporte	Processamento e Manejo	Total por Insumo
diesel					
Consumo específico	l/t comb	1,5	1,1	4,0	6,6
Energia específica	MJ/t comb	54,2	40,5	141,2	235,9
Emissões CO ₂ e fóssil	kg/t comb	3,6	2,7	9,3	15,6
Emissões CO ₂ biog.	kg/t comb	0,4	0,3	1,0	1,6
Eletricidade					
Consumo específico	kWh/t comb	46,1		119,0	165,1
Energia específica	MJ/t comb	166,0		428,6	594,5
Liberação de Gases					
CH ₄	kg/t comb	2,4			
CO ₂	kg/t comb	0,2			
Emissões CO ₂ e fóssil	kg/t comb	68,5			
Total por Etapa					
Energia específica	MJ/t comb	220,2	40,5	569,7	830,4
Emissões CO ₂ e fóssil	kg/t comb	72,1	2,7	9,3	84,1
Emissões CO ₂ biog.	kg/t comb	0,4	0,3	1,0	1,6

Fonte: Elaborado pelo autor.

Sob o aspecto do consumo energético, nota-se maior participação da etapa de processamento e manejo, tanto pelo consumo de diesel quanto de eletricidade pelos equipamentos do pátio de combustível, representando 68,6% do total do Ciclo de Vida. Diferentemente do que ocorre no Ciclo de Vida dos tipos de biomassa abordados à frente, após a chegada do carvão no pátio da central termelétrica ainda é requerida ação relevante de pás carregadeiras ou equipamentos a diesel similares para controle da umidade do combustível, previamente à sua queima. Uma vez que as pilhas de armazenamento de carvão são majoritariamente abertas e expostas ao tempo, o combustível absorve umidade em repouso e deve ser misturado com combustível seco antes do abastecimento das moegas e transportadores que o conduzem às caldeiras, alimentando-as a uma umidade média entre 8% e 12%. Além deste esforço, o carvão ainda requer equipamentos adicionais para manejo em relação à biomassa, a exemplo de vibradores ou mesmo britadores locais na central termelétrica, implicando em consumo adicional de potência elétrica nesta etapa.

Ainda que a etapa de Mineração tenha participação relevante também no consumo energético total do Ciclo de Vida do carvão, representando 26,5% do total, é devido à liberação de metano (CH₄) que esta etapa provoca maior impacto, resultando em quase 86% das emissões de CO₂e fóssil da cadeia do carvão. Isto condiz com os resultados de LENZEN (2008) relativos ao caso típico australiano, que apontaram participação do CH₄ em mais de 80% das emissões de CO₂e do Ciclo de Vida do carvão.

É válido mencionar que o fator de liberação de metano utilizado neste trabalho (2,44 kg CH₄/t carvão) é característica própria da jazida de extração do carvão do caso de referência em Santa Catarina (RESTREPO VICTORIA, 2012) e pode sofrer variação relevante para carvão proveniente

de outras jazidas, a exemplo da origem colombiana do carvão que alimenta os consumidores ao Norte do Brasil, portanto em análises direcionadas a centrais termelétricas específicas esta premissa deve ser reavaliada.

De maneira análoga, as premissas de modais de transporte e respectivo consumo de diesel considerados neste trabalho são próprios do caso de Santa Catarina, no qual a central termelétrica é situada em local relativamente próximo à jazida, acarretando trajeto total próximo de 100 km percorrido pelo carvão por trem e caminhões. Nos casos ao Norte do país, o modal predominante é o marítimo, o que exigiria investigação própria quanto ao consumo de diesel com relação à massa de combustível transportado.

Por fim, vale esclarecer que a emissão de CO₂ biogênico registrada na tabela é resultante da parcela de biodiesel contida no diesel comercial brasileiro, conforme comentado na seção 3.5. Embora este número seja de baixa magnitude no Ciclo de Vida do carvão, seu levantamento se mostrará importante na análise comparativa de todos os combustíveis e ciclos estudados, dado que o carvão é comparado com tipos de biomassa com alto teor de emissão de CO₂ biogênico.

4.1.2 Desempenho do Cavaco e Pellets de Eucalipto

Os resultados de Ciclo de Vida do cavaco e pellets de eucalipto constam na Tabela 4.2 e Tabela 4.3, divididos por cada etapa do Ciclo de Vida e por cada insumo consumido, conforme descrições na seção 3.6.2.

Tabela 4.2 – Energia e emissões de CO₂ nas etapas do ciclo de vida do cavaco de eucalipto, para cada tonelada de combustível.

CVC		Florestal com Picagem	Transporte	Manejo	Total por Insumo
diesel					
Consumo específico	l/t comb	4,4	7,0		11,4
Energia específica	MJ/t comb	156,9	249,3		406,2
Emissões CO ₂ e fóssil	kg/t comb	10,3	16,4		26,8
Emissões CO ₂ biog.	kg/t comb	1,1	1,7		2,8
Eletricidade					
Consumo específico	kWh/t comb			70,5	70,5
Energia específica	MJ/t comb			253,9	253,9
Total por Etapa					
Energia específica	MJ/t comb	156,9	249,3	253,9	660,1
Emissões CO ₂ e fóssil	kg/t comb	10,3	16,4		26,8
Emissões CO ₂ biog.	kg/t comb	1,1	1,7		2,8

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 4.3 – Energia e emissões de CO₂ nas etapas do ciclo de vida dos pellets de eucalipto, para cada tonelada de combustível.

PEL		Florestal	Transporte (duas etapas)	Processamento (Pelletização)	Manejo	Total por Insumo
diesel						
Consumo específico	l/t comb	2,1	5,4	0,5		8,0
Energia específica	MJ/t comb	74,6	191,3	17,1		282,9
Emissões CO ₂ e fóssil	kg/t comb	4,9	12,6	1,1		18,7
Emissões CO ₂ biog.	kg/t comb	0,5	1,3	0,1		1,9
Eletricidade						
Consumo específico	kWh/t comb			174,1	70,5	244,6
Energia específica	MJ/t comb			626,8	253,9	880,7
Calor						
Energia específica	MJ/t comb			1846,3		1846,3
Emissões CO ₂ e fóssil	kg/t comb			3,5		3,5
Emissões CO ₂ biog.	kg/t comb			184,8		184,8
Total por Etapa						
Energia específica	MJ/t comb	74,6	191,3	2490,1	253,9	3009,9
Emissões CO ₂ e fóssil	kg/t comb	4,9	12,6	4,6		22,2
Emissões CO ₂ biog.	kg/t comb	0,5	1,3	184,9		186,7

Fonte: Elaborado pelo autor.

Da Tabela 4.2, sob o aspecto do consumo energético, são observadas participações equilibradas das três etapas estudadas, seja pelo consumo de diesel em equipamentos florestais e de transporte, seja pelo consumo elétrico de transportadores no pátio de biomassa, embutido na etapa de manejo. Há variações possíveis para a caracterização destas etapas, a exemplo do tipo aplicado de picadores, que poderiam ter acionamento elétrico ao invés de motores a diesel, ou mesmo do manejo, que poderia ser parcialmente executado por pás carregadeiras a diesel, ao invés de ser um sistema totalmente elétrico e automatizado, como foi admitido neste trabalho. Certamente estas variações causariam redistribuição do consumo energético dentre os diferentes insumos, mas entende-se que a configuração adotada é representativa de aplicações nacionais de grande porte e as eventuais variações citadas não prejudicariam qualitativamente esta análise.

Em comparação ao cavaco, os resultados para os pellets da Tabela 4.3 mostram maior discrepância na etapa de Pelletização, na qual são consumidos cerca de 1846 MJ/t pellet para secagem, além de consumo relevante de eletricidade nos demais equipamentos de processamento (picagem, moagem, peneiramento). Esta etapa contribui em 83% para a totalização do consumo energético de 3010 MJ/t pellet, que por sua vez é 350% maior que a energia específica consumida no Ciclo de Vida do cavaco, de 660 MJ/t cavaco. Mesmo considerando que cada tonelada de pellet possui poder calorífico maior que o do cavaco, trata-se de uma vantagem de apenas 64%, indicando grande ineficiência térmica ao longo do processo.

Ainda sobre a etapa de Pelletização, o consumo energético adicional não implicou em aumento das emissões de CO₂e fóssil, já que se adotou a queima de biomassa na forma de resíduos vegetais diversos para geração dos gases quentes nesta secagem. A combustão deste material

libera quantidade relevante de CO₂, mas neste caso considerado biogênico, amenizando os prejuízos ambientais nesta etapa. Caso se estude uma instalação em que se utilize óleo diesel ou outro combustível de origem fóssil para a geração de gases quentes de secagem, haverá impacto relevante nos resultados do Ciclo de Vida dos pellets no sentido de elevar as emissões de CO₂e.

Nas etapas Florestal e de Transporte os consumos energéticos específicos para os pellets são menores do que para o cavaco, como era esperado, dado que a etapa Florestal no caso do cavaco inclui a atividade adicional de picagem, que no pellet está embutida na etapa de Pelletização, e também considerando-se que a densidade do cavaco é menor que a do pellet, portanto ocupando maior volume e exigindo maior número de viagens para transporte.

4.1.3 Desempenho da Serragem e Carço de Açai

Os resultados de Ciclo de Vida da serragem de eucalipto e do caroço de açai constam na Tabela 4.4 e Tabela 4.5, cuja etapas seguem descrições na seção 3.6.3.

Tabela 4.4 – Energia e emissões de CO₂ nas etapas do ciclo de vida da serragem de eucalipto, para cada tonelada de combustível.

SER		Transporte	Secagem	Manejo	Total por Insumo
diesel					
Consumo específico	l/t comb	5,8			5,8
Energia específica	MJ/t comb	207,8			207,8
Emissões CO ₂ e fóssil	kg/t comb	13,7			13,7
Emissões CO ₂ biog.	kg/t comb	1,4			1,4
Eletricidade					
Consumo específico	kWh/t comb			70,5	70,5
Energia específica	MJ/t comb			253,9	253,9
diesel					
Energia específica	MJ/t comb		820,0		820,0
Emissões CO ₂ e fóssil	kg/t comb		18,1		18,1
Emissões CO ₂ biog.	kg/t comb		82,1		82,1
Total por Etapa					
Energia específica	MJ/t comb	207,8	820,0	253,9	1281,7
Emissões CO ₂ e fóssil	kg/t comb	13,7	18,1		31,8
Emissões CO ₂ biog.	kg/t comb	1,4	82,1		83,5

Fonte: Elaborado pelo autor.

Embora sejam materiais bastante distintos, o agrupamento e a análise conjunta destes dois combustíveis se devem à sua característica comum de serem residuais de outros processos industriais, portanto não se contabilizando consumo energético e emissões de etapas anteriores à sua coleta, pois são atividades externas ao escopo da geração de energia. Apenas transporte e manejo são contabilizados nestes casos, além da secagem no caso da serragem.

A etapa de secagem da serragem representa fração de 64% da energia específica total de seu ciclo de vida, embora isto se reflita em proporção bem menor nas emissões de CO₂e, já que é admitida a queima de resíduos vegetais para transferência de calor em sua secagem. Esta etapa de secagem é requisito mais provável para queima em caldeiras do tipo queima pulverizada, mas pode ter sua intensidade reduzida em caldeiras de leito fluidizado, que são flexíveis a combustíveis com umidade elevada. Em contraponto, o uso de combustível úmido traria risco do não atingimento da plena capacidade da caldeira, a exemplo do raciocínio sugerido para o cavaco neste trabalho.

Tabela 4.5 – Energia e emissões de CO₂ nas etapas do ciclo de vida do caroço de açaí, para cada tonelada de combustível.

CAA		Transporte	Manejo	Total por Insumo
diesel				
Consumo específico	l/t comb	2,5		2,5
Energia específica	MJ/t comb	90,2		90,2
Emissões CO ₂ e fóssil	kg/t comb	5,9		5,9
Emissões CO ₂ biog.	kg/t comb	0,6		0,6
Eletricidade				
Consumo específico	kWh/t comb		70,5	70,5
Energia específica	MJ/t comb		253,9	253,9
Total por Etapa				
Energia específica	MJ/t comb	90,2	253,9	344,1
Emissões CO ₂ e fóssil	kg/t comb	5,9		5,9
Emissões CO ₂ biog.	kg/t comb	0,6		0,6

Fonte: Elaborado pelo autor.

Devido às suas menores massas específicas, dentre todos os combustíveis avaliados, o cavaco e a serragem apresentam os piores desempenhos em termos do consumo energético para Transporte, resultando em 249 e 208 MJ/t combustível, respectivamente. Já o caroço de açaí apresenta a massa específica elevada, de 788 kg/m³, tornando seu consumo de insumos com transporte o menor dentre os tipos de biomassa avaliados.

4.1.4 Análise Comparativa

Os resultados apresentados nas seções 4.1.1 a 4.1.3 são resumidos na Tabela 4.6, Tabela 4.7 e Figura 4-1.

As tabelas apresentam energia específica e emissões de CO₂ do ciclo de vida de cada combustível estudado, sob as perspectivas do insumo consumido (Tabela 4.6) ou da etapa de ciclo de vida (Tabela 4.7).

O gráfico da Figura 4-1 reúne as informações das tabelas de forma que, para cada combustível, haja três colunas de dados: i) energia específica por insumo consumido; ii) energia específica por etapa do ciclo de vida; iii) emissões de CO₂.

Tabela 4.6 – Energia e emissões de CO₂ nas etapas do ciclo de vida dos combustíveis avaliados, por cada insumo consumido.

		CAR	PEL	CVC	SER	CAA
diesel						
Consumo específico	l/t comb	6,6	8,0	11,4	5,8	2,5
Energia específica	MJ/t comb	235,9	282,9	406,2	207,8	90,2
Emissões CO ₂ e fóssil	kg/t comb	15,6	18,7	26,8	13,7	5,9
Emissões CO ₂ biog.	kg/t comb	1,6	1,9	2,8	1,4	0,6
Calor						
Energia específica	MJ/t comb		1846,3		820,0	
Emissões CO ₂ e fóssil	kg/t comb		3,5		18,1	
Emissões CO ₂ biog.	kg/t comb		184,8		82,1	
Eletricidade						
Consumo específico	kWh/t comb	165,1	244,6	70,5	70,5	70,5
Energia específica	MJ/t comb	594,5	880,7	253,9	253,9	253,9
Total por Insumo						
Energia específica	MJ/t comb	830,4	3009,9	660,1	1281,7	344,1
Emissões CO ₂ e fóssil	kg/t comb	84,1	22,2	26,8	31,8	5,9
Emissões CO ₂ biog.	kg/t comb	1,6	186,7	2,8	83,5	0,6

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 4.7 – Energia e emissões de CO₂ nas etapas do ciclo de vida dos combustíveis avaliados, por cada etapa do Ciclo de Vida.

		CAR	PEL	CVC	SER	CAA
Extração						
Energia específica	MJ/t comb	220,2	74,6	156,9	0	0
Emissões CO ₂ e fóssil	kg/t comb	72,1	4,9	10,3	0	0
Emissões CO ₂ biog.	kg/t comb	0,4	0,5	1,1	0	0
Transporte						
Energia específica	MJ/t comb	40,5	191,3	249,3	207,8	90,2
Emissões CO ₂ e fóssil	kg/t comb	2,7	12,6	16,4	13,7	5,9
Emissões CO ₂ biog.	kg/t comb	0,3	1,3	1,7	1,4	0,6
Processamento/Manejo						
Energia específica	MJ/t comb	569,7	2744,0	253,9	1073,9	253,9
Emissões CO ₂ e fóssil	kg/t comb	9,3	4,6	0	18,1	0
Emissões CO ₂ biog.	kg/t comb	1,0	184,9	0	82,1	0
Total por Etapa						
Energia específica	MJ/t comb	830,4	3009,9	660,1	1281,7	344,1
Emissões CO ₂ e fóssil	kg/t comb	84,1	22,2	26,8	31,8	5,9
Emissões CO ₂ biog.	kg/t comb	1,6	186,7	2,8	83,5	0,6

Fonte: Elaborado pelo autor.

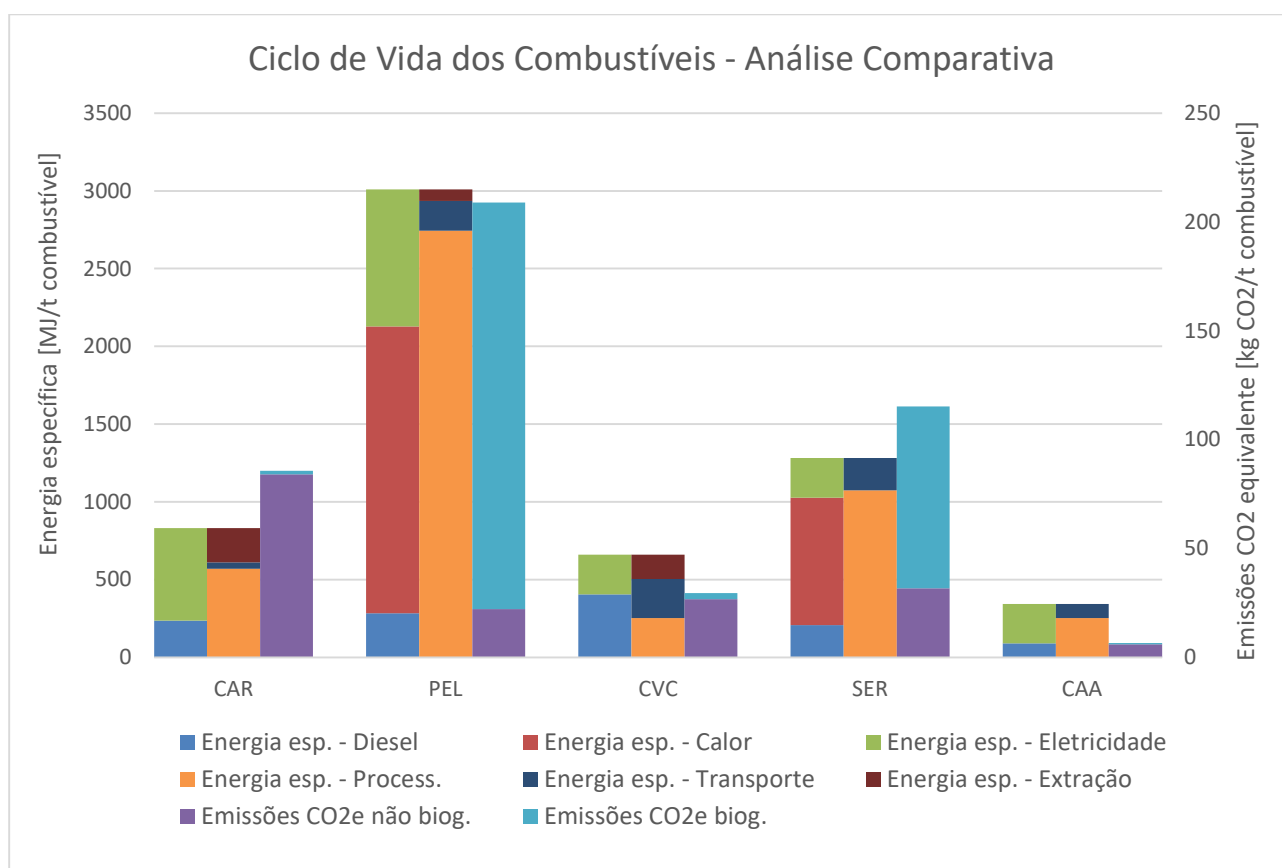


Figura 4-1 – Análise comparativa entre os ciclos de vida dos combustíveis: consumo de energia específica e emissões de CO₂e.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os pellets de eucalipto mostram-se o combustível mais intensivo sob o aspecto do consumo energético, totalizando 3010 MJ/t combustível, devido às elevadas demandas de calor e eletricidade na etapa de processamento. Este maior consumo energético representa também maior custo financeiro para a produção do pellet, reforçando o conceito de que os pellets são preteridos em situações onde a queima da biomassa *in natura* é tecnicamente viável e em centrais termelétricas localizadas a curtas ou médias distâncias das respectivas florestas produtoras da biomassa. A serragem mostra-se como solução intermediária em termos de processamento, já que exige consumo de calor para secagem, mas não requer consumos adicionais para moagem ou compactação, dado que o material já se encontra em granulometria adequada para combustão.

Em sequência aos pellets e à serragem, o próprio carvão apresentou o maior consumo específico de energia, com 830 MJ/t combustível, impulsionado principalmente pela eletricidade e diesel consumidos na etapa de processamento e manejo na central termelétrica. Sob o aspecto das emissões de CO₂e, somando-se ao efeito do consumo de diesel, há influência majoritária das emissões causadas pela liberação de metano no processo de Mineração, que tornam o Ciclo de Vida do carvão o maior emissor de CO₂e dentre os combustíveis, além de evidentemente ser também o maior emissor quando se tratar adiante de sua Conversão Energética na central termelétrica.

Como se esperava, também, o caroço de açaí, que é biomassa residual queimada *in natura*, mostrou os resultados mais favoráveis quanto ao consumo energético e emissões.

4.2 Conversão Energética

Nesta seção são apresentados os resultados de energia, exergia e emissões para a etapa de Conversão Energética nas centrais termelétricas, em continuidade às etapas de Ciclo de Vida abordadas na seção 4.1.

Conforme introduzido na seção 3.2, dentre as centrais termelétricas a carvão em operação no Brasil, há exemplos diversos de configurações construtivas das caldeiras instaladas, geralmente variando entre dois principais tipos: Queima Pulverizada (QP), ou Leito Fluidizado (LF). Dado que os impactos esperados e a própria seleção dos tipos de biomassa viáveis de serem queimados nesses equipamentos são significativamente influenciados pela sua configuração, neste capítulo são feitas análises independentes para cada configuração construtiva, assim como para cada mix de combustíveis contemplado.

Nas usinas termelétricas, predomina o uso de caldeiras QP, portanto a configuração de Geração Pura é avaliada apenas para caldeiras QP. Já nas centrais de Cogeração, há igual proporção entre caldeiras QP e LF, portanto é pertinente que os dois tipos sejam discutidos.

A Tabela 4.8 apresenta os resultados para centrais de Cogeração em caldeiras de Queima Pulverizada e Leito Fluidizado, enquanto a Tabela 4.9 apresenta resultados para central de Geração Pura em caldeira de Queima Pulverizada.

Tabela 4.8 - Consumo de combustíveis e rendimentos para cada configuração – Caldeiras de Queima Pulverizada (QP) e Leito Fluidizado (LF) em central de Cogeração.

Parâmetro de processo	Unidade	QP 100% CAR	QP 100% PEL	QP 100% SER	QP 20% PEL 80% CAR	LF 100% CAR	LF 100% PEL	LF 70% CVC	LF 20% PEL 80% CAR	LF 20% CAA 80% CAR
Carvão	%	100%	0%	0%	80%	100%	0%	0%	80%	80%
Consumo	t/h	60,3	0	0	48,7	60,3	0	0	48,7	48,7
Energia	MW	430,2	0	0	348,0	430,2	0	0	348,0	348,0
Exergia	MW	475,5	0	0	384,7	475,5	0	0	384,7	384,7
Biomassa	%	0%	100%	100%	20%	0%	100%	100%	20%	20%
Consumo	t/h	0	97,2	99,7	19,3	0	97,2	105,4	19,3	21,8
Energia	MW	0	437,5	437,5	87,0	0	437,5	306,2	87,0	87,0
Exergia	MW	0	457,5	463,4	91,0	0	457,5	347,1	91,0	93,4
Energia total	MW	430,2	437,5	437,5	435,0	430,2	437,5	306,2	435,0	435,0
Exergia total	MW	475,5	457,3	463,4	475,6	475,5	457,5	347,1	475,6	478,0
Geração de eletricidade	MW	52,3	52,3	52,3	52,3	52,3	52,3	36,6	52,3	52,3
Vapor para processo	t/h	500,0	500,0	500,0	500,0	500,0	500,0	350,0	500,0	500,0
Energia térmica	MW	338,5	338,5	338,5	338,5	338,5	338,5	237,0	338,5	338,5
Exergia térmica	MW	136,6	136,6	136,6	136,6	136,6	136,6	95,6	136,6	136,6
Rendimento energético	%	90,9%	89,3%	89,3%	89,8%	90,9%	89,3%	89,3%	89,8%	89,8%
Rendimento exergético	%	39,7%	41,3%	40,8%	39,7%	39,7%	41,3%	38,1%	39,7%	39,5%
Emissões CO ₂ e fóssil	kg/h	141,4	2,7	2,5	114,9	141,4	2,7	1,9	114,9	114,9
Emissões CO ₂ e biog.	kg/h	0,0	157,5	147,7	31,3	0,0	157,5	110,1	31,3	31,3

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 4.9 - Consumo de combustíveis e rendimentos para cada configuração – Caldeira de Queima Pulverizada (QP) em central de Geração Pura.

Parâmetro de processo	Unidade	QP 100% CAR	QP 100% PEL	QP 100% SER	QP 20% PEL 80% CAR
Carvão	%	100%	0%	0%	80%
Consumo	t/h	126	0	0,0	101,6
Energia	MW	897	0	0,0	725,3
Exergia	MW	991	0	0,0	801,6
Biomassa	%	0%	100%	100%	20%
Consumo	t/h	0	202,6	207,9	40,3
Energia	MW	0	911,7	911,7	181,3
Exergia	MW	0	953,5	965,7	189,6
Energia total	MW	896,6	911,7	911,7	906,6
Exergia total	MW	991,0	953,5	965,7	991,1
Geração de eletricidade	MW	365,0	365,0	365,0	365,0
Vapor para processo	t/h	0	0	0	0
Energia térmica	MW	0	0	0	0
Exergia térmica	MW	0	0	0	0
Rendimento energético	%	40,7%	40,0%	40,0%	40,3%
Rendimento exergético	%	36,8%	38,3%	37,8%	36,8%
Emissões CO ₂ e fóssil	kg/h	294,8	5,6	5,2	239,5
Emissões CO ₂ e biog.	kg/h	0,0	328,2	307,7	65,3

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tanto o cavaco de eucalipto quanto o caroço de açaí são combustíveis incompatíveis com a queima pulverizada, porém admitidos em leito fluidizado. No caso do cavaco, no entanto, em que se simulou queima exclusiva numa caldeira originalmente projetada para carvão, avalia-se que o volume da fornalha é limitante ao atingimento da plena carga do equipamento, limitando-o a uma carga térmica estimada em 70% da capacidade nominal. Por isto, a entrega de energia térmica e elétrica neste caso ficam também limitadas na mesma proporção. Embora uma limitação de carga fosse considerada proibitiva para centrais de Geração Pura, que se valem da potência originalmente contratada junto à ANEEL e devem mantê-la mesmo após uma conversão, entende-se que uma limitação de carga pode ser admissível em alguns casos para indústrias que realizam Cogeração, seja porque conceberam a central de Cogeração com capacidade superdimensionada para a demanda do processo visando à exportação de energia elétrica para a concessionária, seja porque parte da capacidade tenha se tornado obsoleta ao longo dos anos devido a otimizações no processo ou mesmo redução da capacidade produtiva da fábrica. Em casos como estes, é válido considerar manter a caldeira LF operando mesmo com combustíveis *in natura* de poder calorífico distante daquele do carvão, admitindo perda parcial da capacidade de geração de vapor (*derating*).

Sob a abordagem exergética, a vantagem é clara pelo uso de tipos secos de biomassa em substituição ao carvão. Os tipos secos resultaram em valores próximos entre PCI e exergia

química, o que afeta positivamente as eficiências exergeticas. Perdas de energia e exergia devido às etapas de processamento da biomassa (secagem, picagem, compactação) não são detectados nesta análise da etapa de Conversão Energética, mas sim na análise do Ciclo de Vida, que é consolidada junto à Conversão Energética adiante na seção 4.3.

Com respeito à configuração de Cogeração, as eficiências exergeticas são notoriamente menores do que as eficiências energéticas, como esperado, dado que a abordagem exergetica contempla o produto vapor de processo como uma corrente de baixo valor, com pouco potencial de geração de energia elétrica (15 bar a, 210°C). Já a configuração de Geração Pura possui valores próximos de eficiências energética e exergetica, dado que o produto útil neste caso é apenas energia elétrica.

Sob o aspecto das emissões de CO_{2e}, é visto que as soluções a biomassa resultam em volume de CO₂ total superior ao do carvão, no entanto quase majoritariamente considerado biogênico. A pequena parcela de CO_{2e} não biogênico nestes casos refere-se ao metano (CH₄) e ao óxido nitroso (N₂O) resultantes da queima da biomassa além do CO₂ propriamente dito, representando cerca de 1,5% a 2,0% do CO₂ total emitido.

Quando se analisa apenas o CO_{2e} não biogênico, as reduções provocadas pelo uso da biomassa são expressivas nos casos de substituição total do carvão, chegando a 98% de redução. Mesmo nos casos de substituição parcial do carvão, em queima simultânea com a biomassa, a redução de CO_{2e} chega próxima a 20% nos casos de queima parcial de caroço de açaí ou pellets de eucalipto. No caso de diversas empresas, esta faixa de redução já seria suficiente para atingimento de metas internas ou acordos setoriais de redução de emissões a curto e médio prazo, caracterizando assim a queima parcial como solução válida de transição, sendo menos invasiva e exigindo menor investimento em relação a conversões totais de equipamentos.

4.3 Consolidação dos Resultados

Ao reunir os resultados apresentados nas seções 4.1 e 4.2, chega-se à terceira etapa de análise, em que se totalizam energia, exergia e emissões envolvidas tanto no Ciclo de Vida quanto na Conversão Energética. A Tabela 4.10 e Tabela 4.11 apresentam os resultados consolidados para centrais de Cogeração e Geração Pura, respectivamente.

Tabela 4.10 – Consolidação dos resultados de Ciclo de Vida e Conversão Energética para cada configuração – Central de Cogeração.

COGERAÇÃO										
	Unidade	QP 100% CAR	QP 100% PEL	QP 100% SER	QP 20% PEL 80% CAR	LF 100% CAR	LF 100% PEL	LF 70% CVC	LF 20% PEL 80% CAR	LF 20% CAA 80% CAR
Consumo de Combustíveis										
Carvão	t comb/h	60	0	0	49	60	0	0	49	49
Biomassa	t comb/h	0	97	100	19	0	97	105	22	22
Ciclo de Vida										
Energia - Consumo	MW	14	81	36	27	14	81	19	17	13
Exergia - Consumo	MW	14	75	32	17	14	75	18	17	13
Emissões CO ₂ e fóssil	kg/h	5,1	2,2	3,2	4,5	5,1	2,2	2,8	4,5	4,2
Emissões CO ₂ e biog.	kg/h	0,1	18,2	8,3	3,7	0,1	18,2	0,3	3,7	0,1
Conversão Energética										
Energia - Fonte	MW	430	437	437	435	430	437	306	435	435
Exergia - Fonte	MW	475	458	463	476	475	458	347	476	478
Energia - Útil	MW	391	391	391	391	391	391	274	391	391
Exergia - Útil	MW	189	189	189	189	189	189	132	189	189
Emissões CO ₂ e fóssil	kg/h	141,4	2,7	2,5	114,9	141,4	2,7	1,9	114,9	114,9
Emissões CO ₂ e biog.	kg/h	0,0	157,5	147,7	31,3	0,0	157,5	110,1	31,3	31,3
Total por Cenário										
Eficiência energética	%	88%	75%	83%	85%	88%	75%	84%	86%	87%
Eficiência exergética	%	37%	25%	34%	36%	37%	25%	33%	36%	37%
Emissões CO ₂ e fóssil	kg/h	146,5	4,8	5,7	119,5	146,5	4,8	4,7	119,5	119,2
Emissões CO ₂ e biog.	kg/h	0,1	175,6	156,0	35,0	0,1	175,6	110,4	35,0	31,4

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 4.11 – Consolidação dos resultados de Ciclo de Vida e Conversão Energética para cada configuração – Central de Geração Pura.

GERAÇÃO PURA					
	Unidade	QP 100% CAR	QP 100% PEL	QP 100% SER	QP 20% PEL 80% CAR
Consumo de Combustíveis					
Carvão	t comb/h	126	0	0	102
Biomassa	t comb/h	0	203	208	40
Ciclo de Vida					
Energia - Consumo	MW	29	169	74	57
Exergia - Consumo	MW	24	98	38	31
Emissões CO ₂ e fóssil	kg/h	10,6	4,5	6,6	9,4
Emissões CO ₂ e biog.	kg/h	0,2	37,8	17,4	7,7
Conversão Energética					
Energia - Fonte	MW	897	912	912	907
Exergia - Fonte	MW	991	953	966	991
Energia - Útil	MW	365	365	365	365
Exergia - Útil	MW	365	365	365	365
Emissões CO ₂ e fóssil	kg/h	294,8	5,6	5,2	239,5
Emissões CO ₂ e biog.	kg/h	0,0	328,2	307,7	65,3
Total por Cenário					
Eficiência energética	%	39%	34%	37%	38%
Eficiência exergética	%	34%	28%	34%	34%
Emissões CO ₂ e fóssil	kg/h	305,3	10,1	11,8	249,0
Emissões CO ₂ e biog.	kg/h	0,2	366,0	325,1	73,0

Fonte: Elaborado pelo autor.

De forma geral, é visto que para quase todos os tipos de biomassa a energia consumida na etapa de Ciclo de Vida supera a do carvão, refletindo com isto o consumo energético adicional referente ao processamento da biomassa, no caso dos pellets, mas também a necessidade de maior número de viagens de caminhões para transporte dos tipos diversos de biomassa às centrais termelétricas em comparação ao transporte envolvido para o carvão. Esta tendência de maior consumo energético no Ciclo de Vida da biomassa resulta em menores eficiências energéticas e exergéticas globais em comparação às eficiências globais do ciclo do carvão, para uma mesma configuração de central termelétrica e mesma tecnologia de caldeira.

Esta maior representatividade da etapa de processamento ao ciclo da biomassa em relação ao ciclo do carvão pode ser visualizada também pela Figura 4-2 e Figura 4-3, onde são apresentados diagramas de Grassmann para os fluxos do carvão e do pellet de eucalipto, respectivamente, na configuração de Cogeração em caldeira QP. Em ambos os casos, é na etapa de conversão energética em que ocorrem as maiores destruições de exergia, em proporções de 58% a 60% da exergia aportada pelo combustível (fonte). Entretanto, para o carvão, a participação das outras

etapas do ciclo de vida é menor, com a destruição representando 3% da exergia da fonte, enquanto para os pellets esta proporção é de 15%.

Em contraste aos resultados de eficiência energética, no entanto, o desempenho ambiental de todos os tipos de biomassa mostram benefícios significativos quando comparados ao carvão. Da Tabela 4.11, por exemplo, é visto que as emissões de CO₂e para a queima exclusiva de pellets ou serragem resultam entre 10,1 e 11,8 kg CO₂e/h, o que representa entre 3% e 4% das emissões totais do carvão para o mesmo cenário. Mesmo que a inserção de pellets no mix seja apenas de 20%, a taxa de emissões deste cenário chega a 249,0 kg CO₂e/h, representando redução de 19% em relação ao carvão. A Tabela 4.10 das centrais de Cogeração repete estas proporções.

Como mostram ambas as tabelas, nos cenários de queima de pellets de eucalipto, é visto que as etapas de processamento do combustível embutidas no bloco de Ciclo de Vida representam fração significativa da energia aportada pelo combustível, denominada Energia Fonte. A exemplo da configuração de Geração Pura mostrada na Tabela 4.11, em comparação ao total de 912 MW aportados pelo combustível, uma fração de 18,5% (169 MW) são destinados às etapas diversas do seu Ciclo de Vida, desde sua extração, processamento e transporte até a central termelétrica.

Em contraponto, observa-se também para a Geração Pura o desempenho da serragem de eucalipto, cujo Ciclo de Vida consumiu 74 MW, apenas 8,1% da energia total aportada de 912 MW. Mesmo sob o ponto de vista exergético, em que a serragem leva desvantagem em relação aos pellets devido ao seu maior teor de umidade, a eficiência exergética final resultante é de 34%, superior à eficiência de 28% dos pellets, indicando que os ganhos devido à redução de etapas de processamento para a serragem superam sua desvantagem inicial vinculada à umidade em comparação aos pellets.

A comparação acima entre pellets e serragem é representativa da relevância de se analisar o Ciclo de Vida conjuntamente à Conversão Energética na central termelétrica. Quando se analisa apenas a Conversão Energética, o pellet tem melhor desempenho exergético do que a serragem, mas quando se agrega o Ciclo de Vida na análise, a serragem mostra-se mais vantajosa neste aspecto.

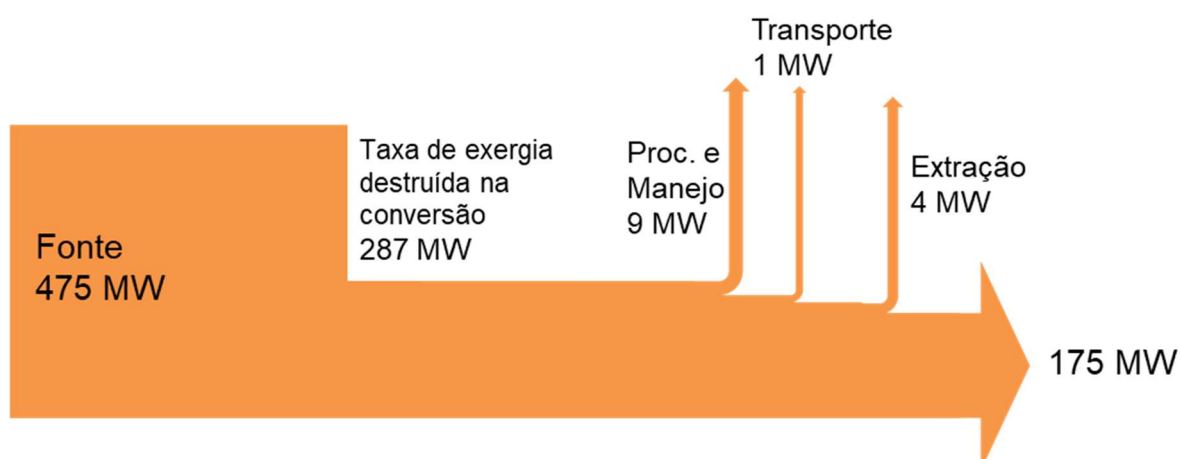


Figura 4-2 – Diagrama de Grassmann para os fluxos de exergia do cenário de Cogeração, em caldeira QP, com queima exclusiva de carvão.

Fonte: Elaborado pelo autor.

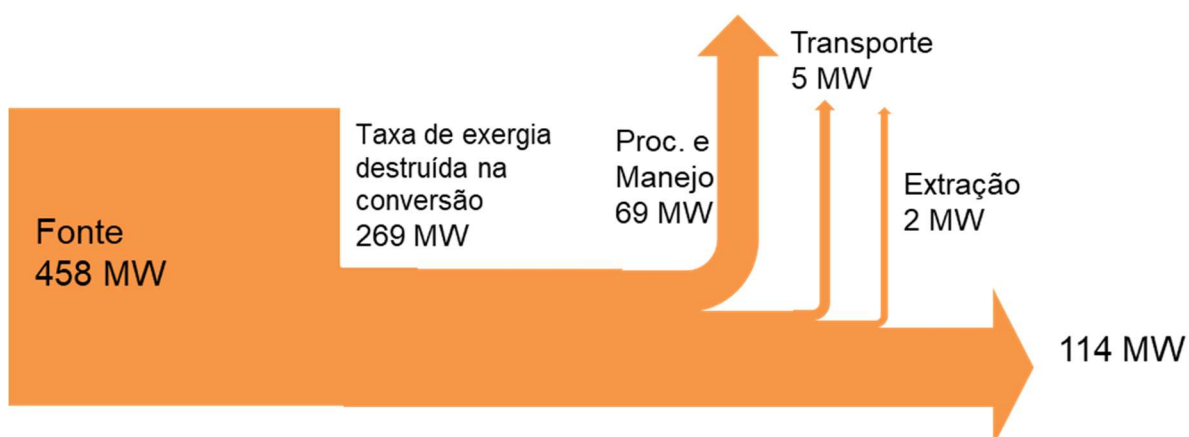


Figura 4-3 – Diagrama de Grassmann para os fluxos de exergia do cenário de Cogeração, em caldeira QP, com queima exclusiva de pellets de eucalipto.

Fonte: Elaborado pelo autor.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho pretendeu-se avaliar os impactos técnicos e ambientais entre manter a queima de carvão mineral nas centrais termelétricas existentes no Brasil, ou substituí-lo por tipos diversos de biomassa, sob a premissa de que esta transição inevitavelmente ocorrerá em prol do atendimento dos limites de emissão de CO₂e alinhados às metas propostas pelo Acordo de Paris. Esta abordagem pretende antecipar o movimento de conversão de instalações a carvão existentes ou até de seu desligamento em resposta aos novos limites de emissões que venham a ser estabelecidos. Mesmo que pouco presente na matriz elétrica nacional, a queima de carvão ainda respondia por mais de 24% das emissões de CO₂e neste setor até 2019 (EPE, 2020), portanto sua substituição – ainda que parcial - teria importante impacto ambiental e o estudo de alternativas ao carvão mostra-se relevante dentro das ações de descarbonização no país.

O levantamento do potencial de produção de biomassa apresentado no capítulo 2.4 indica que o país tem potencial de originação de eucalipto e demais resíduos agroflorestais em capacidade muito superior à demanda requerida para substituição do carvão, porém a logística de distribuição é desafiadora, já que é bastante elevada a quantidade de biomassa consumida em cada central termelétrica. Para aumento da segurança de abastecimento requerida tanto pelas indústrias com cogeração quanto pelas usinas termelétricas, é recomendável a concepção de projetos com flexibilidade dos equipamentos em admitirem combustíveis com diferentes caracterizações físico-químicas, não criando dependência em relação a poucos fornecedores ou tipos de biomassa. É característica frequente dentre os casos de referência avaliados que as caldeiras estejam aptas a queimar diferentes tipos de materiais, ou mesmo voltar temporariamente ao carvão, como combustível secundário.

A queima simultânea (*co-firing*) de carvão e biomassa em caldeiras costuma ter a participação da biomassa limitada a até 20%, em termos energéticos, sendo a principal motivação técnica para esta limitação a presença de elevados teores de inorgânicos na composição da biomassa, em especial o potássio e o cloro. Estes compostos acentuam a incrustação de sais nas paredes frias da fornalha, catalisam processos de corrosão e provocam redução da temperatura de amolecimento das cinzas da biomassa, fatos que expõem o equipamento à indisponibilidade operacional, perda de eficiência ou até limitação de carga. O uso de biomassa em queima simultânea ao carvão tem potencial de redução de emissões de CO₂e de até 19%, admitindo participação de 20% de biomassa no mix. Nos casos da participação de 100% de biomassa no mix, a redução de emissões de CO₂e atinge a faixa de 96% a 97%, já levando em conta emissões ao longo de todo o ciclo de vida dos combustíveis.

A substituição total de carvão por biomassa em caldeiras de queima pulverizada e leito fluidizado mostra-se viável, com base em casos anteriores levantados na seção 3.7.2, podendo inclusive não acarretar prejuízo à carga térmica de projeto do equipamento, a depender do tipo de biomassa utilizado. Especialmente em caldeiras de queima pulverizada, são numerosos os exemplos de substituições de carvão por biomassa bem-sucedidas, geralmente utilizando-se pellets de madeira ou serragem. Já na configuração de leito fluidizado, que também é presente

em centrais de cogeração a carvão nacionais, o atendimento de 100% da carga térmica com biomassa é dificultado pela característica da biomassa de baixa densidade energética por volume ocupado em relação ao carvão, além da sua baixa taxa de geração de cinzas, que são um componente necessário à operação contínua do leito. Diferentemente das usinas termelétricas, as centrais de cogeração podem ter maior tolerância à limitação de carga da caldeira após uma transição de combustível, especialmente naqueles casos em que houver folga de capacidade instalada em relação aos consumos térmico e elétrico atuais da unidade, permitindo com isto maior flexibilidade nas características dos combustíveis utilizados.

Nas caldeiras de queima pulverizada, tanto os pellets de eucalipto quanto a serragem são candidatos adequados à substituição do carvão, podendo atingir a carga nominal do equipamento com 100% de participação no mix. No entanto, sob os aspectos de energia, exergia e emissões de CO_{2e}, é expressiva a vantagem da serragem em comparação aos pellets, já que em seu ciclo de vida para a finalidade de conversão energética há menos etapas de processamento, considerando que os pellets também sofrem picagem e compactação, além da secagem. A abordagem pela análise do ciclo de vida mostrou-se fundamental neste tipo de comparação, pois não negligencia os impactos energéticos e ambientais das etapas de processamento do material realizadas fora dos limites das centrais termelétricas.

Embora o histórico de conversões de carvão para biomassa seja em sua maioria direcionado a tipos processados de biomassa, principalmente pellets de eucalipto, o estudo do uso de materiais *in natura* é particularmente interessante no caso do Brasil, que tem abundância e disponibilidade de resíduos agroflorestais, em oposição à Europa, que depende da importação de materiais processados para sua utilização. Sob os aspectos de eficiência energética e emissões, o uso de resíduos e tipos menos processados de biomassa é altamente preferível sobre o uso de pellets.

5.1 Trabalhos Futuros

Da experiência adquirida neste trabalho, listam-se abaixo algumas sugestões para aprofundamento do tema em trabalhos futuros:

- Levantamento de custos associados ao projeto de conversão de carvão para biomassa, para um dado porte de instalação e modelo de caldeira.
- Acompanhamento operacional de *co-firing* de biomassa com carvão em instalações existentes, buscando analisar, principalmente: interação entre cinzas na fornalha e o impacto na eficiência do equipamento para diferentes composições de mix.
- Levantamento de premissas locais quanto às etapas do ciclo de vida do carvão e da biomassa em central termelétrica selecionada, em que pesem: o modal de transporte do carvão até o local de consumo (marítimo ou terrestre), as características da mina de origem do carvão (equipamentos utilizados, liberação de metano) e as características do processo de extração da biomassa (equipamentos utilizados, emissões evitadas de metano devido à sua coleta no campo).

6 REFERÊNCIAS

AL MOUSSAWIA, H., FARDOUNA, F., LOUAHLIA, H. **Selection based on differences between cogeneration and trigeneration in various prime mover technologies.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, nº 74, p. 491-511, 2017.

ANDRITZ. **Reference List for Power Boilers**, 2023.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Sistema de Informações de Geração da ANEEL (SIGA)**, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/relatorios-e-indicadores/geracao>. Acesso em: 21/08/2023.

BBC. **Germany agrees plan to phase out coal power by 2038**, 2020. Disponível em: <https://www.bbc.com/news/world-europe-51133534>. Acesso em: 21/08/2023.

BESSION, V. **The Ukraine/Russia conflict: an accelerator to the energy crisis**, 2022. Disponível em: <https://kpmg.com/fr/fr/blogs/home/posts/2022/03/how-the-russia-ukraine-crisis-impacts-energy-industry.html>. Acesso em: 21/08/2023.

BIOFIT. **Sectoral Recommendation Factsheet: Coal to Biomass Conversions**, 2020. Disponível em: https://www.biofit-h2020.eu/publications-reports/Biofit-Factsheet_CoalConversions.pdf. Acesso em: 21/08/2023.

BWE. **Reference List for Biomass Firing Systems**, 2023.

BAZZO, E.; BZUNECK, M.; CANESCHI, M. D.; FELIPPE, L.; GOMES, E. R.; DALSSASSO, C. H.; MIYAKE, R. G.; RESTREPO, A. H.; REINALDO, E. B.; PEREIRA, F.; BURIN, E. K.; KLEVESTON, F.; DEO, V. A.; HESS, R. A.; FONTOURA, D. F.; ROSA, O.; FERREIRA, A. S.; SANTOS, C. S. DOS; PAGANELLI, P. **Utilização da Palha de Arroz em Processo de Co-Firing com Carvão Pulverizado.** Projeto P&D ANEEL 0403-005/2008, Tractebel Energia e UFSC, Capivari de Baixo, 2011.

CAILLAT, S.; VAKKILAINEN, E. **Large-scale biomass combustion plants: an overview.** University of Technology, Finland. Woodhead Publishing Limited, 2013.

CAMPILHO, P.; BARLEN, H. **Coal to biomass conversions: context and opportunities.** Afry AF Poyry, 2020.

CCS BRASIL. **1º Relatório anual de CCS no Brasil.** 2023.

CLIMATE ANALYTICS. **A stress test for coal in Europe under the Paris Agreement**, 2017. Disponível em: <https://climateanalytics.org/media/eu-coalstresstest-report-2017.pdf>. Acesso em: 21/08/2023.

CLIMATE ANALYTICS. **Global and regional coal phase-out requirements of the Paris Agreement: Insights from the IPCC Special Report on 1.5°C**, 2019. Disponível em: https://climateanalytics.org/media/report_coal_phase_out_2019.pdf. Acesso em: 21/08/2023.

COM. **Sustainability requirements for the use of solid and gaseous biomass sources in electricity, heating and cooling**. Report from the Commission to the Council and the European Parliament, Bruxelas, 2010.

COSTA, L. S. **Utilização do caroço de açaí como leito filtrante no tratamento de águas de abastecimento e residuária**. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2014.

DRAX. **Drax closer to coal-free future with fourth biomass unit conversion**, 2018. Disponível em: https://www.drax.com/press_release/drax-closer-coal-free-future-fourth-biomass-unit-conversion/. Acesso em: 21/08/2023.

DRAX. **Drax ends half a century of coal-fired power generation**, 2023. Disponível em: https://www.drax.com/press_release/drax-ends-half-a-century-of-coal-fired-power-generation/. Acesso em: 21/08/2023.

DUKES. **Digest of United Kingdom Energy Statistics Annual Data for UK 2022**. Department of Energy and Climate Change, National Statistics, 2023.

ENGIE. **Engie conclui venda do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda para a FRAM Capital**, 2021. Disponível em: <https://www.engie.com.br/imprensa/press-release/engie-conclui-venda-do-complexo-termeletrico-jorge-lacerda-para-a-fram-capital/>. Acesso em: 21/08/2023.

ENGIE. **Engie conclui venda da Usina Termelétrica Pampa Sul para Starboard e Perfin**, 2023. Disponível em: <https://www.engie.com.br/imprensa/press-release/engie-conclui-venda-da-usina-termeletrica-pampa-sul-para-starboard-e-perfin/>. Acesso em: 21/08/2023.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Análise da eficiência energética em segmentos industriais selecionados – Segmento Alumínio**, 2017 – Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-314/topico-407/PRODUTO%203_Vpublicacao.pdf. Acesso em: 21/08/2023.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional – Relatório Síntese – Ano Base 2019**. EPE, 2020. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-521/Relato%CC%81rio%20Si%CC%81ntese%20BEN%202020-ab%202019_Final.pdf. Acesso em: 21/08/2023.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional – Relatório Síntese – Ano Base 2021**. EPE, 2022. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-631/BEN_S%C3%ADntese_2022_PT.pdf Acesso em: 21/08/2023.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional – Relatório Síntese – Ano Base 2022**. EPE, 2023. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-748/topico-681/BEN_S%C3%ADntese_2023_PT.pdf. Acesso em: 21/08/2023.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Nota Técnica 17/18: Potencial Energético de Resíduos Florestais do Manejo Sustentável e de Resíduos da Industrialização da Madeira**, 2018. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-312/NT-EPE_17-2018_Biomassa-Lenhosa-Residual_2018-10-17.pdf. Acesso em: 21/08/2023.

ESCOBAR FARAGO, J. **A produção sustentável de biomassa florestal para energia no Brasil: O caso dos pellets de madeira**. Tese (Doutorado) – Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

FEPAM – Fundação Estadual de Proteção Ambiental do Rio Grande do Sul. **Diretriz Técnica nº 01**, 2018.

FERNANDO, R. **Cofiring high ratios of biomass with coal**. IEA Clean Coal Centre, 2012.

FLÓREZ-ORREGO, D., SILVA, J.A.M, OLIVEIRA JR., S. **Renewable and Non-Renewable Exergy Cost and Specific CO2 Emission of Electricity Generation: The Brazilian Case**. Energy Conversion and Management 85, p. 619-629, 2014.

GHG BRASIL. **Ferramenta do Programa Brasileiro GHG Protocol**, versão 2023.0.3, 2023.

Disponível em:

<https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSd28GUG1Kc8wXj8JNRAFhMRh32r24Wome4RBuEdsnEb3OLB0Q/viewform>. Acesso em: 21/08/2023.

BRASIL. Planalto. **Brasil na COP28: liderança climática e expectativas para futuro sustentável**. 2023.

Disponível em:

<https://www.gov.br/planalto/pt-br/acompanhe-o-planalto/noticias/2023/11/brasil-na-cop28-lideranca-climatica-e-expectativas-para-futuro-sustentavel>. Acesso em: 04/01/2024.

GreenDelta. **OpenLCA**, 2024. Disponível em: <https://www.openlca.org/>. Acesso em: 04/01/2024.

GRI - Global Reporting Initiative. **GRI 305: Emissões 2016**.

GTZ – Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit. **Foreign Direct Investment (FDI) in Land in Madagascar**. P.36, Alemanha, 2009.

HYDRO. **Pesquisa testará o uso do caroço de açaí como fonte de energia renovável nas caldeiras da refinaria Alunorte**, 2022. Disponível em: <https://www.hydro.com/pt-BR/imprensa/noticias/2022/acai-a-source-of-smoothies-and-possibly-renewable-energy-in-brazil/>. Acesso em: 21/08/2023.

IEA BIOENERGY. **Database of Biomass Cofiring initiatives**, 2017. Disponível em: <https://task32.ieabioenergy.com/database-biomass-cofiring-initiatives>. Acesso em: 21/08/2023.

IEA. **Coal in net zero transitions**. IEA, 2022. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/coal-in-net-zero-transitions>. Acesso em: 21/08/2023.

IEA. **Energy Technology Essentials – Biomass for Power Generation and CHP**, 2007.

IEEFA – Institute for Energy Economics and Financial Analysis. **Europe’s Coal-Fired Power Plants: Rough Times Ahead**, 2017. Disponível em: https://ieefa.org/wp-content/uploads/2017/05/Europe-Coal-Fired-Plants_Rough-Times-Ahead_May-2017.pdf. Acesso em: 21/08/2023.

HEMA - Instituto de Energia e Meio Ambiente. **Plataforma de Energia**, 2020. Disponível em: <https://energiaeambiente.org.br/produto/plataforma-de-energia>. Acesso em: 15/03/2022.

JOPPERT, C. L. **Análise da substituição energética de bagaço de cana-de-açúcar por biogás produzido a partir de resíduos de usinas de açúcar e álcool para produção de etanol 2G**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Energia, Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

LENZEN, M. **Life cycle energy and greenhouse gas emissions of nuclear energy: A review**. Energy Conversion and Management 49, p. 2178-2199, 2008.

MATTHEWS, F. **Global Wood Pellet Market Outlook**. In: WPAC Annual Conference, Halifax, 2015. Disponível em: [FionaMcDermottHawkinsWright.pdf \(pellet.org\)](#). Acesso em: 21/08/2023.

MHI (MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES). **Pulverized Biomass Fired Boiler Technology**. Acessado em Janeiro, 2021. Disponível em: <https://power.mhi.com/products/boilers/technology/pulverized-biomass-fired>. Acesso em: 21/08/2023.

MIEDEMA, J. H.; BENDERS, R.; MOLL, H. C.; PIERIE, F. **Renew, reduce or become more efficient? The climate contribution of biomass co-combustion in a coal-fired power plant**. Applied Energy, nº 187, p. 873-885, 2016.

MMA – Ministério do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA n°382**, 2006.

MOREIRA, M. A.; SOUSA, A. L. F. **Tratamento e análise de resíduos da produção de açaí: um estudo sob a ótica da ecoeficiência**. Revista Ambiente Contábil, Vol. 12, n. 2, p. 279-297, 2020.

MYLLYVIRTA, L. **Russia-Ukraine war has not led to increased fossil fuel consumption in the EU**, 2023. Disponível em: <https://energyandcleanair.org/russia-ukraine-war-has-not-led-to-increased-fossil-fuel-consumption-in-the-eu/#:~:text=Coal%20consumption%20and%20CO2%20emissions,shows%20this%20is%20not%20true>. Acesso em: 21/08/2023.

NERLINGER, M.; UTZ, S. **The impact of the Russia-Ukraine conflict on energy firms: A capital market perspective**. Finance Research Letters, volume 50, 103243, 2022.

NETTO, A. L. A.; ALVES, V. H.; PEYERL, D.; JACOBI, P. R.; SANTOS, E. M. **Panorama das políticas públicas e estratégias para desenvolvimento da captura e armazenamento de carbono: reflexões para o Brasil**. Rev. Gest. Ambient. e Sust. - GeAS, 10(1), p. 1-22, 2021.

NOGUEIRA, M. F. M. et al. **Relatório final de estudos logísticos para gasificação de caroço do açaí**. VSE/UFPA/FADESP, 2010.

OBERNBERGER I., BIEDERMANN F. **Biomass Energy Heat Provision in Modern Large-Scale Systems**. In: Kaltschmitt M., Themelis N.J., Bronicki L.Y., Söder L., Vega L.A. (eds) Renewable Energy Systems. Springer, New York, NY, 2013.

OBIDZINSKI, S.; DOLZYNSKA, M.; STASIELUK, W. Production of fuel pellets from a mixture of sawdust and rye bran. Earth and Environmental Science 214, 012073, 2019.

OLIVEIRA, A. T. **Experimental study of co-combustion of biomass with coal in a drop tube furnace**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

OLIVEIRA, L. G. S. **Aproveitamento energético de resíduos agrícolas – O caso da agroeletricidade distribuída**. Dissertação (Mestrado) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

PEDERSEN, L. S.; NIELSEN, H. P.; KIIL, S.; HANSEN, L. A.; DAM-JOHANSEN, K. D.; KILDSIG, F.; CHRISTENSEN, J.; JESPERSEN, P. **Full-scale co-firing of straw and coal**. Fuel, vol. 75, p. 1584- 1590, 1996.

PELISSARI, M. R. **Avaliação de reservatórios potenciais para armazenamento geológico de CO2 emitido pelo Complexo Termelétrico Jorge Lacerda, Santa Catarina**. Dissertação (Mestrado). Instituto de Energia e Ambiente, USP, São Paulo, 2021.

PEREIRA, M. F. **Análise exergoambiental da cadeia produtiva da biomassa energética florestal**. Tese (Doutorado) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

PEREIRA, B. L. C. **Propriedades de pellets: biomassas, aditivos e tratamento térmico**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014.

POWERFNESS®, versão 7.1.8.2. Licenciado por FIGENER, 2021.

PRé Sustainability. **SimaPro**, 2024. Disponível em: <https://pre-sustainability.com/solutions/tools/simapro/>. Acesso em: 04/01/2024.

PROJETO SUCRE. **Cartilha: Processamento e queima de palha de cana-de-açúcar**, 2019. Disponível em: <https://lnbr.cnpem.br/wp-content/uploads/2020/09/Cartilha-Indústria.pdf>. Acesso em: 21/08/2023.

PV MAGAZINE. **Austria's last coal power plant shuts down**, 2020. Disponível em: <https://www.pv-magazine.com/2020/04/17/austrias-last-coal-power-plant-shuts-down/>. Acesso em: 21/08/2023.

RESTREPO VICTORIA, A. H. **Metodologia de análise e avaliação exergoambiental de plantas termoelétricas operando em combustão combinada carvão-biomassa**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

ROCHEDO, P.R.R.; COSTA, I. V. L.; IMPÉRIO, M., HOFFMAN, B.S.; MERSCHMANN, P.R.; OLIVEIRA, C.C.N.; SZKLO, A.; SCHAEFFER, R. **Carbon capture potential and costs in Brazil**. Journal of Cleaner Production 131, p.280-295, 2016.

ROHLOFF, C. C. **Estudo comparativo de queima de carvão e biomassa em forno DTF**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2017.

SAVOLAINEN, K. **Co-firing of biomass in coal-fired utility boilers**. Applied Energy, vol. 74, p. 369-381, 2003.

SARTORI, R. S. **A indústria de Pellet de madeira para uso interno e exportação no Brasil**. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, USP / Universidade Estadual de Campinas / Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, 2022.

SEDAP - Secretaria de Desenvolvimento Agropecuário e da Pesca. **Panorama Agrícola do Pará 2015/2020 – Açaí**, 2021.

SILVA, F. T. F. **Avaliação da Torrefação e Densificação de Resíduos Agrícolas no Brasil**. Dissertação (Mestrado) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

SPATH, P. L.; MANN, M. K. **Coal versus biomass electricity generation – Comparing environmental implications using life cycle assessment**. National Renewable Energy Laboratory, Golden, EUA, 1998.

STRAUSS, W. **FutureMetrics: COVID-19 unlikely to reduce demand for industrial wood pellets**. Canadian Biomass. 2020. Disponível em: [FutureMetrics: COVID-19 unlikely to reduce demand for industrial wood pellets - Canadian Biomass Magazine](#). Acesso em: 21/08/2023.

SZARGUT, J. **Exergy Method: Technical and Ecological Applications**. Boston, WIT Press, 2005.

UTT, J.; GIGLIO, R. **Technology comparison of CFB versus pulverized-fuel firing for utility power generation**. IFSA 2011, Industrial Fluidization South Africa 91-99, 2011.

TILLMAN, D. A. **Final report: EPRI-USDOE Cooperative Agreement: Cofiring Biomass with Coal**. Foster Wheeler, 2001.

TOLMASQUIM, M. T. **Energia Termelétrica: Gás Natural, Biomassa, Carvão, Nuclear**. EPE: Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-173/Energia%20Termel%C3%A9trica%20-%20Online%2013maio2016.pdf>. Acesso em: 21/08/2023.

VAN LOO, S.; KOPPEJAN, J. **Handbook of Biomass Combustion and Co-firing**, Earthscan. ISBN 9781844072491, 2008, Londres, Reino Unido.

VC (VOTORANTIM CIMENTOS). **Açaí, o fruto da nossa energia**, 2020. Disponível em: <https://www.votorantimcimentos.com.br/estudo-de-caso/acai-o-fruto-da-nossa-energia/>. Acesso em: 21/08/2023.